

ЛАЗЕРЫ : ПРИМЕНЕНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Под редакцией А. С. Борейшо

*РЕКОМЕНДОВАНО
УМО вузов РФ по образованию в области
приборостроения и оптотехники для студентов вузов,
обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата
«Лазерная техника и лазерные технологии»,
«Фотоника и оптоинформатика», «Оптотехника»*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР
2016

ББК 32.86-5я73

Л 17

Л 17 Лазеры: применения и приложения: Учебное пособие / Под ред. А. С. Борейшо. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 520 с.: ил. (+ вклейка, 8 с.). — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-2234-0

В книге рассмотрено применение лазеров в различных отраслях народного хозяйства: научных исследованиях, медицине, промышленности, коммуникациях, мониторинге и защите окружающей среды, в военной технике и системах безопасности. Полнота информации обеспечивается иллюстративными материалами, многие из которых публикуются впервые.

Предназначено для широкого круга читателей: студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров «Лазерная техника и лазерные технологии», «Фотоника и оптоинформатика», «Оптотехника», аспирантов и магистров других технических специальностей, инженерно-технических работников и всех, интересующихся современным состоянием лазерной техники.

Рецензенты:

В. П. ВЕЙКО — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения СПб НИУ ИТМО;

Г. Г. ЩУКИН — доктор физико-математических наук, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ВКА им. А. Ф. Можайского, заслуженный деятель науки РФ.

Обложка
Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2016

© Коллектив авторов, 2016

© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее издание является продолжением книги «Лазеры: устройство и действие», вышедшей в издательстве «Лань» в 2016 г.

В учебном пособии представлены описания и примеры реализации современных лазерных технологий, некоторые из которых до сих пор вообще широко не обсуждались. Во многом это определяется большим собственным практическим опытом авторов (преподавателей, научных сотрудников и инженеров Института лазерной техники и технологий, кафедры лазерной техники БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова и НПП «Лазерные системы»), полученным в результате участия в реальных разработках в соответствующих предметных областях.

Цель издания – дать читателю целостное представление о применениях лазеров: от определения подходов к решению реальных задач, оценок условий эксплуатации, выбора технологий, формирования структуры лазерных систем и требований к их функциональным характеристикам, до технической реализации лазерных комплексов, оценки технологических параметров и описания конкретных примеров. При этом мы старались максимально полно показать отечественные достижения в предметной области.

Объединение описаний практически всех наиболее значимых применений лазеров в одной книге представляется особенно полезным в учебнике для широкого набора инженерных специальностей, где читателю с единых позиций дается максимально полное представление о возможностях лазерной техники, достоинствах и преимуществах применения лазеров для решения самых разнообразных задач.

Последний раз книга с подобным названием («Применение лазеров») выходила на русском языке более сорока лет назад. С тех пор как возможности лазеров, так и области их применения существенно расширились.

Несмотря на большое количество вышедших книг по лазерным технологиям, практически все они специализированы на отдельных достаточно узких областях применения и предназначены либо для обеспечения специальных курсов, либо для специалистов, работающих в конкретных направлениях. В то же время в России так и не появилось отдельного учебника или справочника, обобщающего современные представления обо всем многообразии лазерных технологий, в которых применения лазеров рассматриваются по возможности широко. Поэтому мы с коллегами постарались в меру наших сил восполнить этот пробел.

Авторы признательны рецензентам д. т. н., профессору В. П. Вейко и д. физ.-мат. н., профессору Г. Г. Щукину, за внимательное отношение и ценные замечания и предложения.

Авторы искренне благодарны всем коллегам за постоянное интересное творческое сотрудничество, а также внимание, терпение и поддержку во время нашей работы над книгой.

ЧАСТЬ I

ЛАЗЕРЫ

В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

А. В. Чугреев, М. А. Коняев

ВВЕДЕНИЕ К ЧАСТИ I

Свойства лазерного излучения – малая расходимость пучка света, монохроматичность, когерентность, стабильность частоты колебаний световой волны, большая плотность потока энергии и высокая пиковая мощность импульсов – делают лазерные источники незаменимыми в различных областях науки и техники. К 2015 году более 80 ученых по всему миру стали нобелевскими лауреатами за открытия в области оптики и лазерной физики.

Оптические методы применялись для проведения различных измерений издавна. С появлением лазеров и разработкой новых источников излучения с различными уникальными свойствами, оптические измерения вышли на новый уровень.

В этой части учебного пособия рассматривается использование лазеров для измерения различных параметров и величин, для дистанционного зондирования и для регистрации объемных изображений. Уделено внимание использованию лазеров в метрологии. Приводятся технические характеристики наиболее распространенных приборов, дается описание основных составных элементов.

ГЛАВА 1

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

1.1.

ЛАЗЕРНАЯ ДАЛЬНОМЕТРИЯ

Оптические методы позволяют бесконтактно и с высокой точностью проводить измерения расстояний, скорости объектов. Бесконтактные измерения расстояний методом триангуляции проводились еще до нашей эры. Интерферометрические методы контроля перемещений появились сравнительно недавно, два века назад, с развитием представлений о волновой природе света. Появление лазеров существенно расширило возможности оптических методов измерения расстояний и перемещений благодаря особенностям лазерного излучения.

По способу детектирования можно выделить несколько основных методов. Области их применения, обусловленные спецификой метода, варьируются в широких пределах. При измерениях расстояний используются различные принципы и различные физические свойства лазерного излучения. В зависимости от выбранного метода, проведение измерений с помощью лазеров имеет одно или несколько неоспоримых преимуществ, в том числе: высокую точность, дальность действия, быстроту проведения измерений, незаметность и т. д.

Методика измерений выбирается исходя из требуемой дистанции и точности измерений, ограничений по стоимости и надежности оборудования, лазерной безопасности и т. д. Лазерные дальномеры способны проводить измерения с очень большой скоростью (до нескольких миллионов измерений в секунду), либо очень высокой точностью измерений, либо на больших дистанциях и в большом диапазоне дальностей (от очень малых до очень больших расстояний). В некоторых наиболее совершенных устройствах возможно сочетание нескольких этих свойств.

К отдельным преимуществам лазерных методов измерения следует отнести следующие:

- высокая точность измерений;

– бесконтактность измерений и отсутствие ощутимого воздействия на объект измерений;

- высокая скорость получения результатов;
- большая дальность измерений.

Исходя из физических принципов, технологии измерений расстояний оптическими методами можно разбить на *следующие категории*:

- триангуляционные;
- времяпролётные;
- интерферометрические;
- фазового сдвига;
- частотной модуляции.

На рис. 1.1 сравниваются диапазоны измерений и точности различных методов измерения расстояний. Их достоинства и недостатки сведены в табл. 1.1.

Триангуляция – геометрический метод, используемый для измерения расстояний. Сам метод оптической триангуляции не обязательно предполагает использование лазеров, но использование лазерного излучения расширяет его возможности. Триангуляционный метод контроля основан на расчете искомого расстояния через соотношения треугольника. Он позволяет измерять как значение расстояния от датчика до контролируемого объекта, так и его относительное изменение. Контролируемое расстояние может иметь масштаб от нескольких микрометров (например, при контроле поверхности кристаллов микроэлектроники) до сотен и тысяч метров (при геодезических применениях). Датчики, использующие принцип триангуляции, широко применяются в промышленности для измерения малых дистанций и формы предметов.

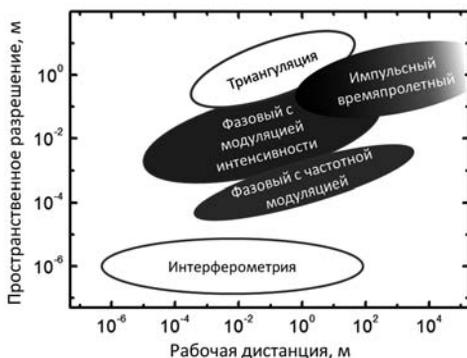


Рис. 1.1

Рабочие дистанции и пространственное разрешение (точность измерений) для различных типов дальномеров

Времяпролётный метод (или импульсный метод) – основан на измерении времени прохода лазерного импульса от измерительного прибора до цели и обратно. Такие методы обычно используются для измерения больших расстояний, от сотен метров до тысяч километров. Точность устройств для измерения расстояний времяпролётным методом зависит от параметров лазерного импульса, быстродействия электроники фотоприемной схемы, и варьируется от нескольких миллиметров до нескольких метров.

Таблица 1.1

Методы измерения расстояния

Название метода	Достоинства	Недостатки
Триангуляционный	Простота, надежность, быстроедействие, возможно использование недорогих компонентов	Для точных измерений необходима большая оптическая база, т. е. источник излучения и фотоприемник должны быть разнесены в пространстве. По этой причине используется в основном на малых дистанциях
Импульсный время-пролетный	Удобство одновременного измерения дальности до нескольких целей. Простота излучаемых импульсов, длящихся очень малое время, и принимаемых сигналов	Необходимость использования опасных для глаз лазеров с мощными импульсами; невозможность измерения малых дистанций, ограничения по точности
Фазовый	Малая мощность излучения, безопасность, низкая цена	Большое время измерения (не менее нескольких секунд), небольшая дистанция измерения
Метод частотной модуляции	Позволяет измерять малые и большие дальности. С использованием относительно безопасного для глаз непрерывного лазера можно измерять дальности в десятки километров с высокой точностью	Высокие требования к лазерному источнику и фотоприемной электронике, высокая стоимость
Интерферометрический	Контроль перемещений с наибольшей точностью	Используется только для измерения малых расстояний и перемещений

Интерферометрический контроль позволяет измерять малые перемещения с точностью до десятых долей длины световой волны. Метод применяется для контроля механических перемещений в прецизионных механических устройствах. К недостаткам метода следует отнести неоднозначность результата измерений при перемещениях больших, чем длина волны света, используемого для измерения, а также малую скорость проведения измерений.

Метод фазового сдвига основывается на использовании непрерывного лазерного излучения, модулированного по интенсивности. Этот метод широко используется в недорогих бытовых дальномерах, предназначенных для измерения расстояний до 100 метров. Дальномеры на основе метода фазового сдвига позволяют измерять расстояния с миллиметровой точностью.

В измерениях *по методу частотной модуляции* варьируется не интенсивность, а частота лазерного излучения. Этот метод меньше подвержен влиянию внешних помех, так как частота света, в отличие от его интенсивности, не меняется при направлении луча на неоднородную поверхность или за счет движения атмосферы. Метод частотной модуляции работает на малых и на больших расстояниях. Однако для дальномеров с частотной модуляцией света нужны лазеры с монохроматическим, изменяющимся по заданному закону излучением, электроника высокого класса, и поэтому они весьма дороги.

1.2.

ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД

С помощью простых законов тригонометрии еще в глубокой древности люди научились измерять расстояния до недоступных предметов и высоту сооружений. Тригонометрические построения позволяют рассчитать длины сторон треугольника, если известна другая сторона и углы. Метод триангуляции используется для измерений расстояний, контроля перемещений, анализа формы предметов. Лазер при этом нужен для указания и подсветки точки измерения; использование именно лазера удобно тем, что за счет малой расходимости лазерного луча удается получить достаточную освещенность на удаленной цели.

При триангуляционных измерениях источник лазерного излучения и оптическая система фотоприемника разнесены между собой на некоторое расстояние. Лазер, фотоприемник и объект измерений образуют треугольник с известной стороной и двумя углами при ней. Зная значения углов, можно с достаточной точностью не только определить расстояние до объекта, но и установить его положение в пространстве и отследить перемещение. Принцип триангуляции проиллюстрирован на рис. 1.2.

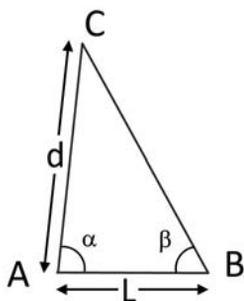


Рис. 1.2

Использование принципа триангуляции для измерения расстояний

Пусть источник лазерного излучения расположен в точке A . Фотоприемник находится в точке B , а точка C соответствует местоположению цели. Расстояние до цели d вычисляется по известным значениям базы L и углов α и β с использованием уравнения (1.1):

$$d = L \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (1.1)$$

Это уравнение справедливо для плоской или евклидовой геометрии. Результаты расчетов становятся неточными, если расстояния сравнимы с радиусом кривизны Земли. В этом случае ис-

пользуют более сложные уравнения сферической тригонометрии.

Для триангуляционного дальномера используются видимые или инфракрасные источники света. Использование лазера видимого диапазона удобно при настройке. Максимум чувствительности недорогих и эффективных фотодетекторов на кремниевой основе также лежит в видимом диапазоне. Лазерный источник для триангуляции должен иметь высокое качество пучка, чтобы осветить небольшое пятно на большом расстоянии. Также требуется достаточная мощность излучения, особенно для целей с рассеянным отражением.

В портативных триангуляционных датчиках обычно используются наиболее распространенные полупроводниковые лазеры 635 и 650 нм (рис. 1.3). Эти длины волн детектируются относительно недорогими кремниевыми фотоприемными матрицами. Для повышения соотношения сигнал/шум излучение лазера может быть модулировано по интенсивности синхронно с фотоприемником.

Если использование видимого луча нежелательно или недопустимо из-за опасности для глаз, возможно использование инфракрасных лазеров диапазона 1.5 мкм.

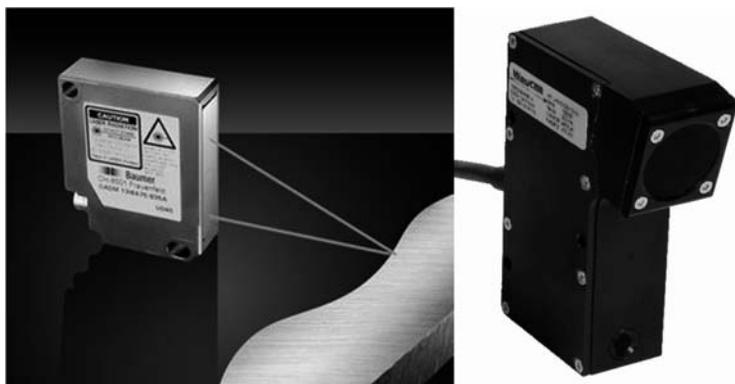


Рис. 1.3

Промышленные триангуляционные лазерные дальномеры

Метод триангуляции часто применяется в промышленных датчиках с диапазоном измерений от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Например, он используется для бесконтактного контроля расстояния до обрабатываемых поверхностей, в автоматических сварочных комплексах, поиска неровностей и т. д. Принцип действия такого датчика понятен из рис. 1.4.

Луч лазера, пройдя коллимирующую линзу, освещает точку на поверхности объекта, находящегося в положении X или X' . Изображение этой подсвеченной точки собирается с помощью объектива на многоэлементной фотоприемной матрице. В зависимости от удаленности объекта, освещенная точка проецируется

на различных участках матрицы. Из координаты освещенного пикселя матрицы электронный модуль рассчитывает расстояние до поверхности объекта.

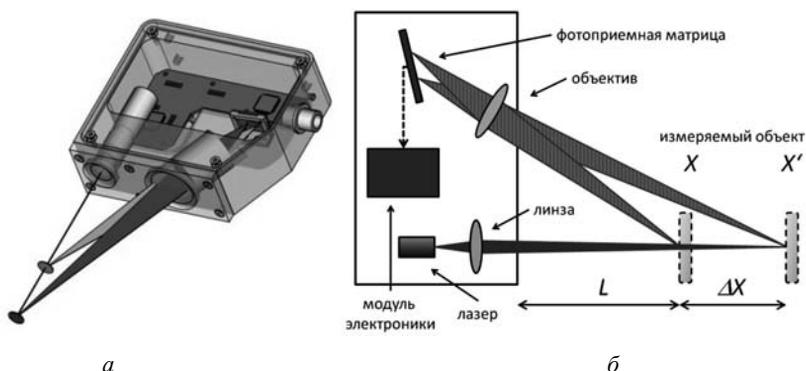


Рис. 1.4

Конструкция прибора (а) и принцип измерения расстояния до поверхности с помощью лазерного триангуляционного сенсора (б)

Точность измерений определяется геометрией (т. е. базой триангуляции), количеством пикселей матрицы, уровнем шума матрицы и ее динамическим диапазоном измерений, методом обработки сигнала. Точность измерений триангуляционного сенсора может достигать одной тысячной доли измеряемого расстояния.

Быстродействие триангуляционного дальномера зависит от скорости считывания информации с матрицы. При использовании быстрых диодных линеек измерения можно проводить с частотой до нескольких килогерц. Высокая скорость измерений позволяет использовать датчик для отслеживания положения движущейся или вибрирующей детали, подстраивать положение лазерной сварочной головки, контролируя положение области расплава и т. д.

1.3.

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД

Одним из наиболее простых и распространенных способов измерения расстояний и перемещений является метод измерения времени распространения сигнала до объекта и обратно – так называемый метод времени пролета.

Дальномер посылает короткий лазерный импульс и принимает отраженный от цели сигнал (рис. 1.5). Для измерения можно использовать лишь один лазерный импульс.

На этом же принципе измерений основана локация радаром в радиодиапазоне. Основными преимуществами времяпролетного метода являются его быстродействие и большие дистанции измерений.

Зная скорость распространения света в атмосфере и определив временной промежуток между моментами выхода лазерного импульса и прихода отраженного сигнала, можно рассчитать расстояние до цели.

Расстояние d рассчитывается по формуле:

$$d = 2c \cdot \Delta t, \tag{1.2}$$

где c – скорость света, $3 \cdot 10^8$ м/с, Δt – временной интервал между моментами выхода лазерного импульса и регистрации сигнала.

Поскольку скорость света велика, импульсный времяпролетный метод непригоден для измерения малых расстояний: электроника не успевает обработать сигнал. Для времяпролетных дальномеров существует так называемая «слепая зона» – область пространства непосредственно перед дальномером, в котором определение дальности до объекта невозможно.

Импульсный времяпролетный способ измерения расстояний обычно используется на дистанциях от нескольких десятков метров до нескольких километров, хотя возможно измерение и больших расстояний. Военные времяпролетные дальномеры позволяют мгновенно измерить дистанцию до цели в диапазоне до десятков километров. Максимальная дальность измерений определяется мощностью импульсов, чувствительностью фотоприемной аппаратуры и наличием мешающих факторов, в том числе оптической засветки, атмосферных помех.

Качество лазерного пучка имеет определяющее значение при измерениях на больших дистанциях. Как следует из законов оптики, для того, чтобы получить луч с малой расходимостью, надо расширить пучок лазерного излучения с помощью передающего телескопа. Для увеличения собираемого светового потока увеличивают апертуру принимающего телескопа.

Максимальная дальность измерений определяется энергией импульсов лазера, чувствительностью фотоприемника, коэффициентом отражения поверхности цели, интенсивностью фоновой засветки, технологией обработки принимаемого сигнала, статистикой проведения измерений (возможности усреднения результатов одиночных измерений).

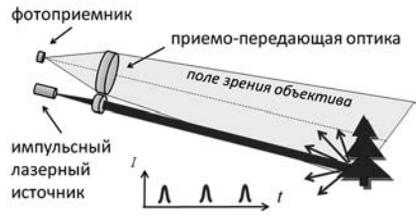


Рис. 1.5
Основные оптические элементы импульсного дальномера и временная диаграмма измерений

Точность измерения расстояния до цели зависит от крутизны фронтов нарастания или спада лазерного импульса (измеряется временной интервал между соответствующими границами фронтов), скорости обработки сигнала фотоприемником и электронной схемой. Причиной возможных погрешностей является изменения интенсивности принимаемого сигнала и, соответственно, неточность измерения положения фронта импульса. Поскольку момент регистрации отраженного импульса определяется по некоторому уровню сигнала (рис. 1.6), то результат измерения расстояния зависит от отражательной способности цели, ее габаритов и т. д.



Рис. 1.6

Погрешности измерения расстояний,
связанные с флуктуациями интенсивности отраженного сигнала

Разрешающая способность прибора по дальности определяется длительностью импульса. Времяпролетный лазерный дальномер может различить два отдельных объекта в том случае, если полученные от них сигналы не перекрываются во времени. Для этого необходимо, чтобы два объекта были разнесены в направлении лазерного луча не меньше, чем на расстояние, равное произведению длительности импульса на скорость света. Обычно используются лазеры с длительностью импульса 0.1...20 нс. Импульс в 0.1 нс имеет пространственную протяженность в воздухе или в вакууме 3 см, 10 нс – около 3 м.

Также минимальное измеряемое расстояние и пространственное разрешение дальномера зависят от быстродействия электроники фотоприемной схемы. Чтобы дальномер работал и на больших, и на малых расстояниях, фотоприемная схема (фотоприемник и электроника) должна обладать большим динамическим диапазоном чувствительности и низким собственным уровнем шумов.

Полученный импульс обрабатывается высокоскоростной электронной схемой, ширина полосы пропускания которой определяет скорость обработки сигнала. В момент выхода лазерного импульса начинается отсчет времени, который закан-

чивается после прихода стоп-импульса, формируемого при приеме отраженного сигнала. Погрешность измерения равна длительности одного такта.

С точки зрения количества тактов, расстояние до цели определяется уравнением:

$$d = cN / 2f_{\text{clk}}, \quad (1.3)$$

где N – число тактовых импульсов, рассчитанное между сигналами старта и остановки, f_{clk} – тактовая частота.

Среди факторов, снижающих точность измерений, необходимо перечислить собственный шум лазера, т. е. нестабильность интенсивности импульсов, джиттер (нестабильность последовательности импульсов во времени, дрожание сигнала). Иные связанные с шумом проблемы могут возникнуть из-за неоднородности рассеяния света на мишени (спекл-эффектов, т. е. наблюдаемой «зернистой» картины отраженного лазерного излучения), неоднородности атмосферы.

В качестве фотоприемников импульсного дальномера обычно используются PIN-фотодиоды или лавинные фотодиоды. В видимом и ближнем ИК-диапазоне это кремниевые фотодиоды, в диапазоне 1.5 мкм – на основе InGaAs. Фотодиод должен обладать высокими частотными характеристиками, т. е. быть способным детектировать форму лазерного импульса без искажений. Для детектирования импульсов длительностью 10 нс требуется фотодиод, время нарастания и спада сигнала которого не превышает 3...5 нс, что соответствует частотной полосе пропускания 200...300 МГц.

Если лазер дальномера работает в видимом диапазоне, то детектирование сигнала может проводиться фотоэлектронными умножителями, которые обладают высокой чувствительностью, быстрым откликом и имеют низкий уровень собственных шумов.

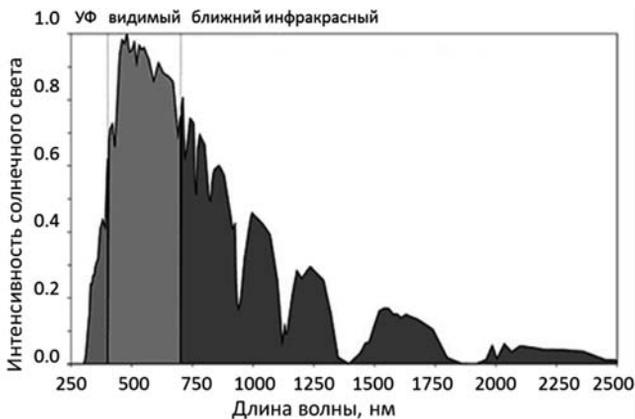
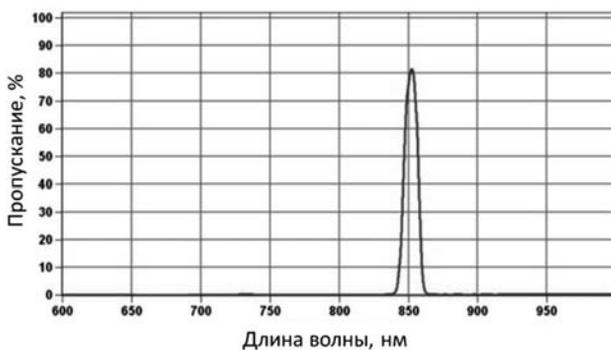
В оптической схеме дальномеров используются полосовые светофильтры (рис. 1.7), пропускающие излучение лазера и блокирующие свет на других длинах волн, – это уменьшает фоновую засветку фотодетектора.

При отражении от диффузно отражающей поверхности световой поток, попадающий на фотоприемник, сильно убывает с увеличением расстояния. Чтобы увеличить уровень сигнала на фотодетекторе, необходимо повышать энергию импульсов лазера и увеличивать апертуру фотоприемной оптики.

Качество лазерного пучка имеет определяющее значение при измерениях на больших дистанциях. Как следует из законов оптики, для того, чтобы получить луч с малой расходимостью, надо расширить пучок лазерного излучения с помощью передающего телескопа. Для увеличения принимаемого светового потока необходимо также увеличивать апертуру принимающего телескопа.

Максимальная дальность измерения расстояния определяется энергией импульсов лазера, чувствительностью фотоприемника, коэффициентом отражения

поверхности, до которой измеряется расстояние, интенсивностью фоновой за- светки, анализом принимаемого сигнала, статистикой проведения измерений (возможности усреднения результатов одиночных измерений).

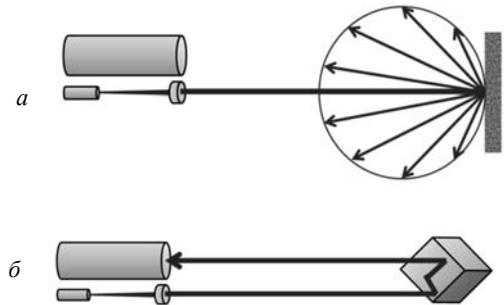
*a**b**в***Рис. 1.7**

Распределение энергии в спектре солнечного света (а);
внешний вид полосовых светофильтров (б);
спектр пропускания полосового светофильтра с центральной длиной волны 850 нм (в)

Величина сигнала, отраженного от диффузной поверхности, пропорциональна $1/R^2$, так как излучение рассеивается в широком угле (рис. 1.8, *а*).

Для измерений на больших дальностях цель должна быть оснащена световозвращателем (иначе: уголковым отражателем, ретрорефлектором, призматическим отражателем, катафотом) для увеличения количества отраженного обратно света. Уголковый отражатель состоит из трех жестко закрепленных взаимно перпендикулярных зеркал или изготавливается на основе стеклянной призмы. Независимо от того, под каким углом луч света попадает на уголковый отражатель, отраженный обратно луч будет строго параллелен падающему лучу (рис. 1.8, *б*).

Рис. 1.8
 Диаграмма направленности
 интенсивности света
 при отражении
 от диффузной поверхности (*а*)
 и от уголкового отражателя (*б*)



Световозвращатели обязательно используются при измерениях расстояний в космических масштабах. Например, призматическими световозвращателями (уголковыми отражателями) покрыта поверхность пассивных геодезических космических аппаратов «Эталон», выведенных на орбиту вокруг Земли для исследования влияния неоднородности гравитационного поля Земли на орбиту космических аппаратов и корректировки показаний систем геопозиционирования (рис. 1.9).

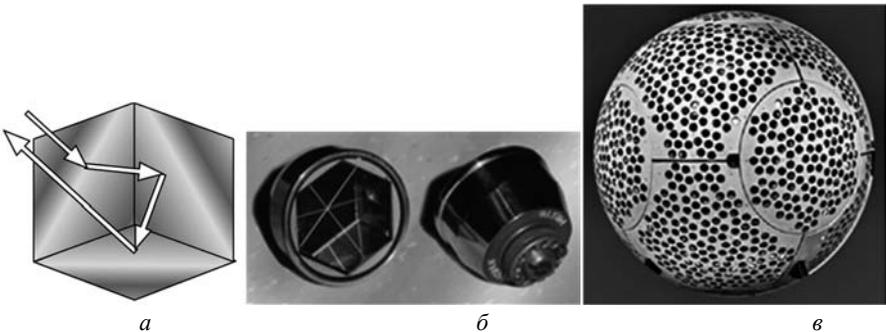


Рис. 1.9

Принцип действия (*а*) и внешний вид (*б*) уголкового отражателя.
 Пассивный геодезический космический аппарат «Эталон» (*в*), служащий для коррекции показаний системы ГЛОНАСС. Поверхность КА покрыта уголковыми отражателями

Наибольшее расстояние, которое было измерено с помощью времяпролетного метода, – это расстояние до Луны, значение которого изменяется от 363 104 км до 405 696 км при движении спутника Земли по орбите. Лазерные импульсы, посылаемые с Земли, отражаются обратно световозвращателем, установленным на Луне, и собираются телескопом. Для таких больших расстояний необходимо использование световозвращателя исключительно высокого качества, чтобы отраженный луч возвращался строго назад.

Интересно, что советский аппарат «Луноход-1», доставленный на поверхность земного спутника в 1970 году, был оборудован уголковыми отражателями. Однако после того как радиосвязь с луноходом прервалась, специалисты не могли «поймать» отражатель лазерным лучом, так как не знали точного местоположения аппарата.

Луноход был обнаружен на фотографии высокого разрешения в 2010 году, и спустя 40 лет после запуска удалось зарегистрировать сигнал обратного отражения от световозвращателя лунохода. В настоящее время расстояние от Земли до Луны измеряется с точностью до нескольких сантиметров.

1.3.1.

РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

Импульсные дальномеры применяются в основном для измерения больших расстояний. Для того чтобы принимаемый сигнал превышал собственный уровень шума фотоприемника и фоновую засветку, требуется большая пиковая мощность импульса.

В импульсных дальномерах могут использоваться различные типы импульсных лазерных источников, излучающие в области «окон прозрачности» атмосферы.

Длина волны лазера не должна совпадать с линией поглощения основных атмосферных газов. Среди используемых источников твердотельные, полупроводниковые, волоконные, газовые лазеры.

Вообще говоря, более длинноволновое излучение лучше распространяется в атмосфере: чем больше длина волны излучения, тем меньше рассеяние света на мелких аэрозольных частицах. Дальномеры с CO₂-лазерами (длина волны 10.6 мкм) использовались ранее, но вскоре уступили место более компактным и надежным дальномерам на основе твердотельных лазеров.

Лазер дальномера должен быть компактным и энергоэффективным; длительность импульса не должна превышать 10 нс. Этому требованию лучше всего удовлетворяют твердотельные лазеры с неодимовой или эрбиевой активной средой. Типичные параметры лазера для портативного дальномера с диапазоном измерений до 20 км следующие: мощность до 10 мДж в импульсе, частота следования импульсов 1 Гц. Активная среда этих лазеров – кристалл, стекло или керамика

с большой апертурой, что позволяет получить большую пиковую мощность импульса и малую расходимость пучка излучения.

На рис. 1.10 представлены типичные лазерные дальномеры военного применения.



Рис. 1.10

Военные дальномеры на основе твердотельных лазеров с дальностью измерений до 20 км

В современных военных лазерных дальномерах обычно используются твердотельные импульсные лазеры с большой энергией в импульсе и малой частотой повторения (5...30 импульсов в минуту). В их основе лазеры с модуляцией добротности резонатора (Q-switch). К этому типу лазеров относятся неодимовые (Nd:YAG или Nd:glass) с длиной волны генерации 1.06 мкм или эрбиевые на 1.54 мкм. Такие дальномеры способны измерять расстояния до 25 км с точностью лучше ± 5 м и часто изготавливаются в виде компактных, портативных устройств.

Обычно для вывода лазерного луча и для приема сигнала используются отдельные объективы. От диаметра передающего объектива зависит расходимость лазерного луча; увеличивая его, можно добиться минимальной расходимости лазерного луча и большей интенсивности света на цели. Величина светового потока принимаемого сигнала пропорциональна площади приемного объектива.

Если дальномер используется в системе слежения и сопровождения, и также используется для подсветки цели, то он должен иметь большую частоту повторения импульсов – до 10...50 импульсов в секунду. В этих областях применения используются исключительно неодимовые лазеры Nd:YAG, поскольку кристаллические активные среды лучше проводят тепло, и в них легче обеспечить теплоотвод.

Более доступны по цене дальномеры на основе мощных и энергоэффективных полупроводниковых лазеров на основе GaAs с длиной волны генерации диапазона 800...900 нм. Излучение этого спектрального диапазона опасно для глаз, но невидимо для человека и животных. В дальномерах гражданского назначения мощность лазерных импульсов ограничена, чтобы прибор соответствовал классу опасности 1М (безопасен для глаз, если смотреть невооруженным глазом).

Тем не менее, производители категорически запрещают направлять дальномеры в глаза или в объективы прицелов и биноклей – это может привести к травмам.

Импульсные дальномеры востребованы охотниками, спортсменами, строителями. Часто дальномер этого класса совмещается с биноклем (рис. 1.11) и системой ночного видения. Использование такого прибора очень удобно: можно наблюдать за обстановкой и в нужный момент померить расстояние до найденного объекта. Дальность измерений для такого класса дальномеров не превышает 500 м. Точность измерения расстояний достигает 0.5...1.0 м.



Рис. 1.11

Портативные дальномеры на основе импульсных полупроводниковых лазеров ближнего ИК диапазона (длина волны 870 нм)

При конструировании и использовании импульсных дальномеров необходимо рассматривать вопросы *лазерной безопасности* (см. приложение «Лазерная безопасность»). Наиболее эффективные импульсные дальномеры изготавливаются на основе неодимовых лазеров с длиной волны генерации 1.064 мкм, но они весьма опасны для зрения на расстояниях до нескольких километров даже при небольшой средней мощности излучения.

Свет основной гармоники неодимового лазера невидим для глаза человека и животных, однако излучение с этой длиной волны, пройдя через хрусталик и глазное яблоко, достигает сетчатки и фокусируется на ней.

По этой причине в наше время в дальномерах все чаще используются лазеры с эрбиевой активной средой на 1.535 мкм. Свет с длиной волны более 1.4 мкм относится к относительно безопасному диапазону, т. к. при попадании коллимированного излучения в зрачок оно не сфокусируется на сетчатке, а поглотится в объеме глазного яблока, не вызвав повреждений при небольшой мощности импульса (см. приложение «Лазерная безопасность»). Безопасный порог интенсивности излучения эрбиевых лазеров примерно в 10 000 раз выше, чем для неодимовых.

Еще одно преимущество дальномеров с длиной волны генерации 1.5 мкм – их излучение не детектируется наиболее распространенными приборами ночного

видения, работающими в диапазоне 1 мкм. Поэтому использование такого дальномера не имеет демаскирующего эффекта, что важно для военных применений.

1.4. МЕТОД ФАЗОВОГО СДВИГА

В бытовых лазерных дальномерах для измерения небольших расстояний часто используется метод фазового сдвига. В них излучение непрерывного лазера модулируется по амплитуде синусоидально или по некоторой более сложной функции. Расстояние до цели рассчитывается из разности фаз принимаемого и опорного сигналов. Метод фазового сдвига, по сути, также является времяпролетным, так как измеряемая величина – сдвиг фазы – возникает за счет времени полета света до цели и обратно (но все же чаще «времяпролетными» называют импульсные дальномеры).

За счет модуляции лазерное излучение уже является не непрерывным, а изменяющимся по интенсивности. Если сравнить фазу (задержку) сигнала модуляции выходящего и принимаемого излучения, то можно рассчитать пройденное светом расстояние. На рис. 1.12 схематически показаны вид световой волны, модулированной по интенсивности, и сдвиг фазы сигнала, возвращающегося после отражения от удаленного объекта.

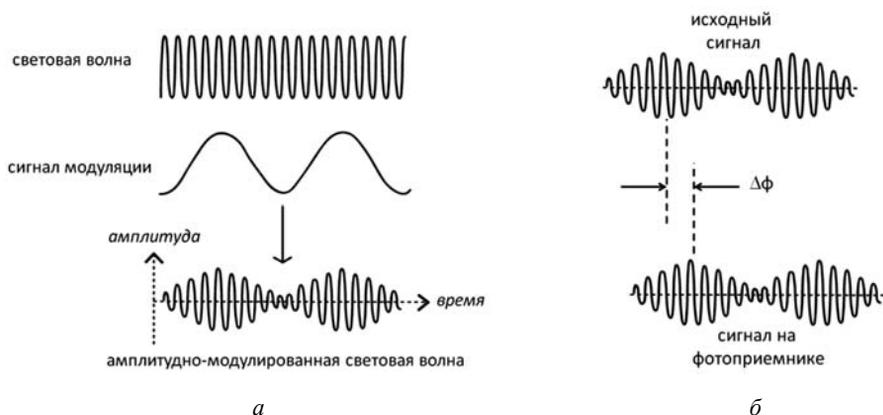


Рис. 1.12

Модуляция световой волны по интенсивности (а);
сдвиг фазы $\Delta\phi$ сигнала при прохождении светом расстояния до цели и обратно (б)

Частота модуляции лазера выбирается, исходя из диапазона измеряемых расстояний: время прохождения сигнала до цели должно быть меньше, чем период

модуляции, иначе получится неоднозначный результат измерения. С другой стороны, если частота модуляции слишком мала, то правильность измерений расстояний снижается: сдвиг фазы можно измерить с точностью не более 1-2%.

Для простых бытовых фазовых дальномеров особых требований к спектру источника излучения нет.

В фазовых дальномерах в качестве источника излучения часто используются диодные лазеры, интенсивность излучения которых модулируется изменением тока накачки.

В строительных и бытовых дальномерах используется красный диодный лазер видимого диапазона (635 или 650 нм), в охотничьих приборах – невидимый диодный лазер ближнего ИК-диапазона (850...900 нм).

Требований по спектральной ширине излучения нет, поэтому такие лазеры стоят недорого. Излучатель и приемник используют отдельные оптические каналы, чтобы избежать перекрестных помех.

Максимальная частота модуляции интенсивности излучения ограничена возможностями электроники и не может превышать нескольких гигагерц. Это на много порядков меньше, чем собственная частота электромагнитной волны световых колебаний, которая лежит в диапазоне сотен терагерц.

Отраженный от цели свет (диффузно рассеянный или зеркально отраженный) попадает на фотоприемник. Из электрического сигнала фотоприемника выделяется периодическая составляющая на частоте модуляции, далее сравниваются фазы отраженного от объекта сигнала и опорного сигнала, и рассчитывается расстояние. Точность определения сдвига фаз при достаточном времени накопления сигнала составляет 1–2% от частоты модуляции, и пространственное разрешение фазовых дальномеров достигает нескольких миллиметров.

При измерении фазового сдвига периодического сигнала всегда присутствует неоднозначность измерений, так как расчет можно провести с точностью до $2\pi n$, где n – любое целое число. Поэтому в дальномерах используется модуляция интенсивности излучения не по синусоидальному закону, а более сложной функцией (например, с использованием различных частот модуляции), что позволяет избежать неоднозначности измерений, сохранив высокую точность на разных дистанциях. При использовании нескольких частот модуляции удастся померить расстояния на дистанциях от нуля до нескольких сотен метров с сантиметровой и даже миллиметровой точностью.

По сравнению с интерферометрическими методами измерений, в которых сравниваются фазы световой волны, фазовые дальномеры с модуляцией интенсивности луча уступают 3–4 порядка по точности (см. рис. 1.1). Однако они позволяют однозначно измерять большие расстояния за счет того, что допускают использование нескольких частот модуляции или сложных алгоритмов кодирова-

ния сигнала. Кроме того, они подходят для целей с рассеянным отражением от шероховатой поверхности.

1.4.1. БЫТОВЫЕ ФАЗОВЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

Фазовые дальномеры являются наиболее дешевым классом дальномеров, так как все используемые в них компоненты не имеют особых требований по своим характеристикам. Они используются в строительстве и отделке, при земляных работах и геодезических измерениях.

В них обычно используются диодные (полупроводниковые) лазеры красного цвета. Фазовые дальномеры безопасны, удобны в работе и дают однозначный результат в диапазоне измеряемых расстояний от сантиметров до сотен метров. Используя нехитрые вычисления, можно измерять расстояния между двумя недоступными точками или высоту объектов (рис. 1.13).

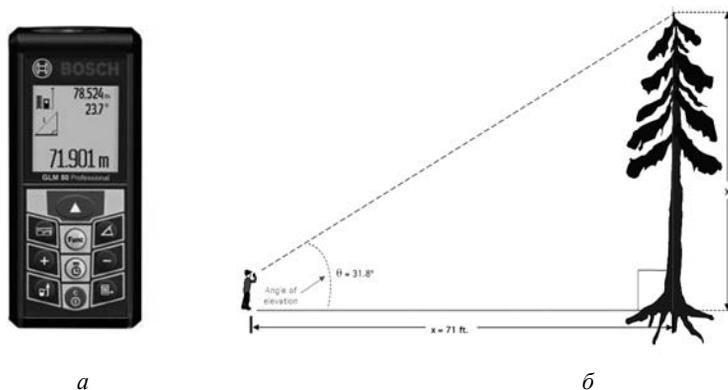


Рис. 1.13

Бытовой лазерный дальномер (а); измерение высоты объекта (б)

Время проведения одного измерения фазовым дальномером составляет несколько секунд, так как для проведения точного измерения требуется накопление сигнала. Поэтому дальномеры такого типа могут использоваться лишь для решения простых задач измерения расстояния, но не оперативных измерений.

Отметим, что дешевые бытовые дальномеры, в которых используется лазер, часто на самом деле являются не лазерными, а ультразвуковыми дальномерами. Расстояние измеряется ими с помощью звуковой волны (как, например, в автомобильном парктронике), а лазерный луч используется лишь как указатель направления измерений.

1.5.

МЕТОД МОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТЫ

Метод измерения дальности с помощью частотно-модулируемого непрерывного лазера аналогичен используемой в радиолокации частотной модуляции сигнала радара. Некоторые разновидности лазеров (в частности, полупроводниковые) могут обладать свойством изменения частоты генерации при изменении тока накачки или температуры кристалла. Частота излучения лазера с непрерывным по интенсивности излучением меняется по линейному закону от f_1 до f_2 . Отраженный свет попадает на фотоприемник дальномера с задержкой, соответствующей расстоянию до цели.

Анализ картины биений сигнала позволяет с достаточно высокой точностью определить время задержки сигнала, а следовательно, и расстояние до объекта.

Диапазон измерений и чувствительность дальномера с фазовой модуляцией сигнала зависит от длины когерентности лазера, т. е. ширины спектральной линии. С помощью дальномера с частотной модуляцией можно достичь дальности измерений до нескольких сотен километров с точностью лучше, чем 1.0 м при достаточной мощности лазерного источника и чувствительности фотоприемника.

Принцип работы дальномера проиллюстрирован на рис. 1.14 и 1.15. Частота излучения модулируется «пилообразно» генератором развертки: длина волны лазера меняется по линейному закону за некоторый промежуток времени. Необходимо, чтобы световой импульс успел пройти до цели и обратно за один период модуляции. Часть излучения лазера (опорный сигнал) сразу подается непосредственно на фотодетектор. Основная часть излучения, пройдя путь до цели и обратно, поступает на тот же фотодетектор с задержкой, соответствующей времени пролета импульса до цели и обратно.

Поскольку частота световой волны меняется во времени, на фотоприемник попадают одновременно две разные оптические частоты. При смешении двух оптических сигналов на фотоприемнике возникают биения интенсивности светового потока, причем частота биений равна разности частот. По значению разностной частоты вычисляется дальность до цели.

Если сравнивать дальномеры с модуляцией амплитуды излучения и с модуляцией частоты, то последний обладает лучшим соотношением сигнал/шум (SNR, signal-to-noise ratio).

Дело в том, что интенсивность принимаемого сигнала может меняться из-за внешних факторов, например, движения атмосферы, неоднородности отражательной способности цели и т. д. Это влияет на точность измерений.

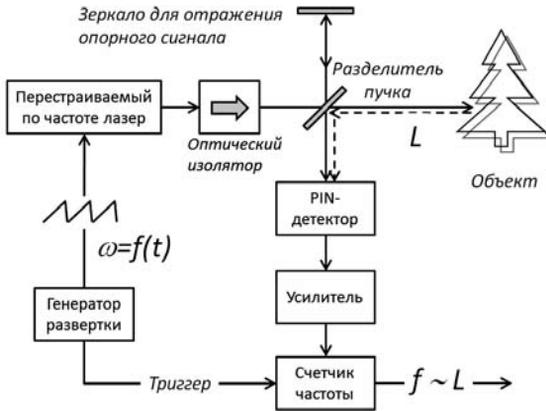


Рис. 1.14
Блок-схема дальномера с частотной модуляцией

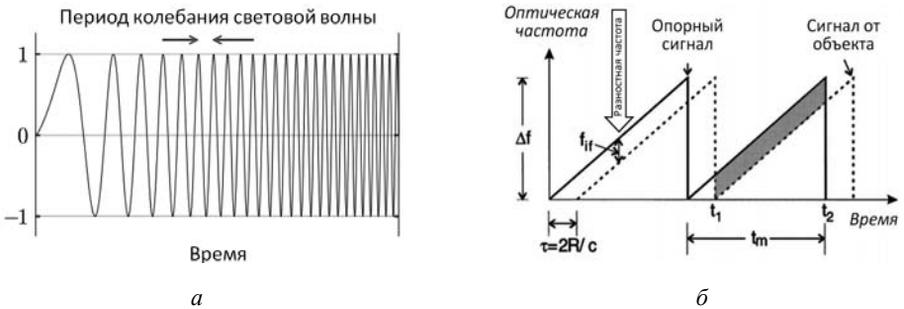


Рис. 1.15
Частотно-модулированная волна с линейной зависимостью от времени (а); зависимость частоты излучаемого (непрерывная линия) и принимаемого (пунктир) дальномером сигналов от времени (б)

Напротив, значение частоты световых колебаний практически не подвержено внешнему влиянию при прохождении сигнала через атмосферу или при отражении его от цели.

Дальномеры с модуляцией частоты излучения обладают лучшими характеристиками, но они требуют использования более дорогого лазера, сложной электроники фотоприемной схемы и поэтому существенно дороже.

При частотной модуляции используется лазер с узкой спектральной шириной излучения и при этом с возможностью быстрой перестройки длины волны.

Для этой цели хорошо подходят полупроводниковые лазеры, в которых длина волны задается встроенными брэгговскими решетками: DFB (distributed feedback, т. е. распределенная обратная связь) и DBR (distributed Bragg reflector, т. е. распределенный брэгговский отражатель лазеры) (рис. 1.16). При использовании отдельной дифракционной решетки обеспечить быструю смену длины волны достаточно сложно.

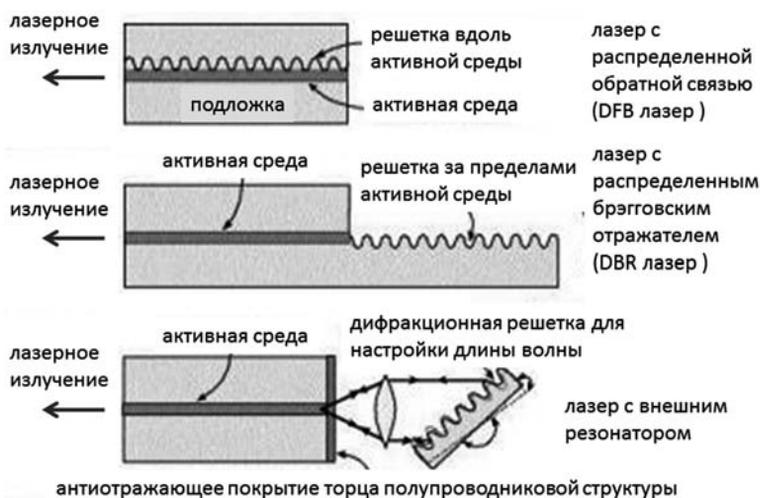


Рис. 1.16

Различные варианты конструкции полупроводниковых лазеров с перестройкой длины волны

Длина волны излучения DFB- и DBR-лазеров несколько сдвигается при изменении тока накачки лазера, в основном за счет нагрева структуры и изменения периода решетки. На рис. 1.17 приведены спектры излучения полупроводникового лазера с брэгговской структурой при различных токах накачки и значение сдвига длины волны генерации в зависимости от тока питания.

Чтобы получить постоянную частоту биений на протяжении цикла измерений, перестройка длины волны должна осуществляться по линейному закону. Обычно в полупроводниковых лазерах длина волны генерации определяется током накачки, и изменение частоты происходит нелинейно. Существуют различные технические решения для того, чтобы обойти это ограничение, например, непрерывный контроль длины волны и наличие обратной связи в управлении лазером.

Также используется оптоволоконная линия задержки до нескольких километров длиной в опорный канал, чтобы повысить точность измерений на больших расстояниях.

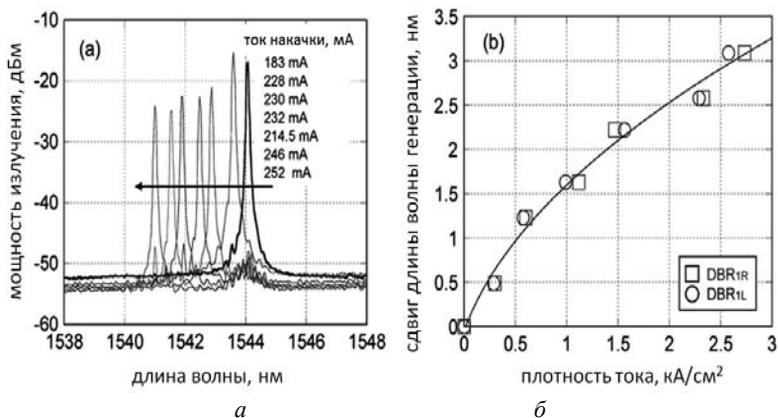


Рис. 1.17

Перестройка длины волны полупроводникового лазера при изменении силы тока питания. Спектр излучения (а), значения сдвига длины волны генерации (б)

Мощность перестраиваемых по длине волны полупроводниковых лазеров не более 10...100 мВт, поэтому для проведения измерений на больших расстояниях требуется усиление оптического излучения. Для этого можно, например, использовать усилители на основе эрбиевого оптоволокна. Эрбиевые усилители широко используются как телекоммуникационное оборудование, однако они весьма дороги. Также возможно использование усилителей на твердотельных объемных активных элементах.

1.6.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ

Интерферометрия – стандарт в области точных измерений. Слово «интерферометрия» имеет латинские корни: inter – между, ferens (ferentis) – несущий, metre – измерять. Для того чтобы контролировать перемещения с субмикрометровой точностью, используются когерентные свойства света. При интерферометрических измерениях перемещению соответствует изменение разности фаз самой электромагнитной волны. Использование законов интерференции света для измерений впервые было продемонстрировано в 1880-х годах. С появлением лазеров интерферометрия получила новое развитие.

Интерферометр – это оптическое устройство, принцип работы которого основан на взаимодействии нескольких когерентных световых волн (пучков). Как известно, интерференционная картина является результатом суперпозиции двух и более волн, близких по частоте. Поскольку результат интерференции определяется фазовым сдвигом между ними, такой метод измерения крайне чувствителен к любым эффектам, влияющим на фазу световой волны. Существуют различные типы интерферометров. В интерферометрах свет сначала делится с помощью полупрозрачного зеркала (или другого оптического элемента) на две части, а затем оба пучка опять сводятся вместе, чтобы сравнить фазы световых волн, прошедших по разным траекториям.

Классический пример интерферометра – двухлучевой интерферометр Майкельсона, изобретенный в 1887 году, впервые позволивший измерить длину волны света. В интерферометре Майкельсона используется полупрозрачное зеркало или светоделительный куб для разделения и объединения световых пучков.

Интерферометр Майкельсона может быть использован для контроля перемещений. Для этого свет от источника делится на так называемую объектную волну, направляемую на измеряемый объект, и опорную волну, проходящую известный оптический путь. На рис. 1.18 показаны два варианта конструкции: с использованием зеркал и уголковых отражателей. Интерферометр с уголковыми отражателями более надежен, так как при различных механических или тепловых воздействиях юстировка интерферометра не сбивается.

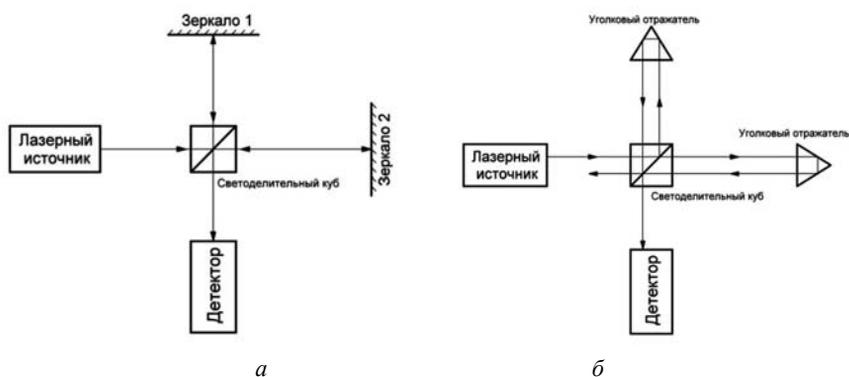


Рис. 1.18

Интерферометр Майкельсона на основе зеркал (а) и уголковых отражателей (б)

Вообще, интерферометр может использоваться с любыми источниками света. Плечи интерферометра, т. е. длины оптических путей обоих пучков света, должны быть одинаковыми. При использовании монохроматического источника света плечи интерферометра могут быть разными, однако разница должна быть меньше длины когерентности источника.

Когерентность является одним из важнейших понятий оптики и означает способность света проявлять интерференционные эффекты. Свет называется когерентным, когда есть фиксированная связь фаз между напряженностью электромагнитного поля в разных местах или в разное время. Монохроматическое лазерное излучение может обладать огромной длиной когерентности в сотни и тысячи метров, то есть теоретически километровые расстояния можно измерять с микрометровой точностью с помощью интерферометра.

Для контроля относительного перемещения двух механических деталей одно из зеркал (или уголкового отражатель) должны быть закреплены на перемещаемом элементе (рис. 1.19).

В процессе перемещения необходимо вести подсчет пройденных интерференционных минимумов/максимумов. На практике для измерения расстояния необходимо перемещать зеркала без расстройки интерферометра и при этом подсчитывать минимумы/максимумы интерференции. Поэтому в интерферометрах используется прецизионная механика, а измерение требует времени. Длина перемещения не превышает нескольких метров.

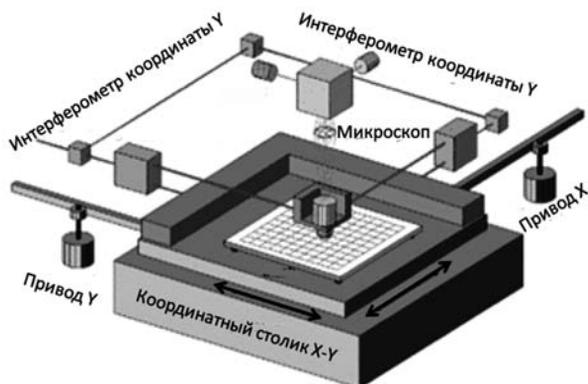


Рис. 1.19

Позиционирование фотомаски для литографии с помощью интерферометров

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1.1. Измерение расстояний посредством лазеров имеет ряд неоспоримых преимуществ. Основные – бесконтактность и высокая скорость проведения измерений. Отсутствие механического воздействия на объект измерений. Также можно перечислить большой диапазон измеряемых дистанций, высокую точность, возможность незаметного проведения измерений, проведения измерений в разных прозрачных средах и в вакууме.

1.2. Выбор типа лазерного дальномера для проведения измерений обусловлен несколькими факторами. При постановке задачи необходимо выяснить следующие параметры проведения измерений:

- минимальная и максимальная дистанции проведения измерений;
- необходимая точность измерений;
- время проведения одного измерения;
- возможность статистической обработки результатов;
- требования лазерной безопасности;
- необходимость незаметного проведения измерений;
- энергопотребление, габариты и вес прибора;
- цена прибора;
- срок жизни прибора.

1.3. Измерение расстояния лазерными дальномерами можно осуществлять разными способами: за счет геометрических построений (триангуляционные методы), исходя из времени полета светового сигнала до цели и обратно (импульсный времяпролетный, фазовый с модуляцией интенсивности и частоты света) и за счет волновых свойств света (интерференционные измерения).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ 1

1. Что ограничивает диапазон и точность измерений лазерных дальномеров?
2. Есть ли опасность для глаз при использовании лазерных дальномеров?
3. В чем особенность измерений расстояний в космических масштабах?
4. Каковы отличия амплитудной и фазовой модуляции лазерного излучения и в чем их преимущества и недостатки?
5. В чем заключается сложность измерения больших дистанций методами интерферометрии?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 1

1.1. Бокшанский В.Б. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. пособие / В.Б. Бокшанский, Д.А. Бондаренко, М.В. Вязовых [и др.] / Под ред. В.Е. Карасика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

1.2. Федоров Б.Ф. Лазеры. Основы устройства и применение / Б.Ф. Федоров. М.: ДОСААФ, 1988.

1.3. Сборник «НИИ «Полус» им. М.Ф.Стельмаха» - 50 лет». М.: Техносфера, 2012.

1.4. Amann M.-Ch.et al. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. Opt. Eng. 40 (1). 2001.

1.5. Garry Berkovic and Ehud Shafir, «Optical methods for distance and displacement measurements». Adv. Opt. Photon. 4, 441-471. 2012.

1.6. Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение / Ю.В.Коломийцов. Л.: Машиностроение. Лен. отд. 1976.

1.7. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2008.

ГЛАВА 2

ПОЛУЧЕНИЕ ОБЪЁМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.1. 3D-СКАНЕРЫ НА ОСНОВЕ «СТРУКТУРИРОВАННОГО СВЕТА»

Обычная фотография, выполненная фотокамерой, является двумерным массивом данных, в котором собрана информация о световом потоке, попавшем с различных направлений в объектив и зафиксированном фотоприемной матрицей или фотопленкой. В этом массиве данных отсутствует информация о расстоянии до тех точек в пространстве, с которых пришел этот световой поток.

Для того чтобы «оцифровать» форму некоторого предмета, пространственные координаты предметов, нужно получить трехмерный массив данных, иначе «облако точек», каждой точке которого соответствуют три пространственные координаты (рис. 2.1).

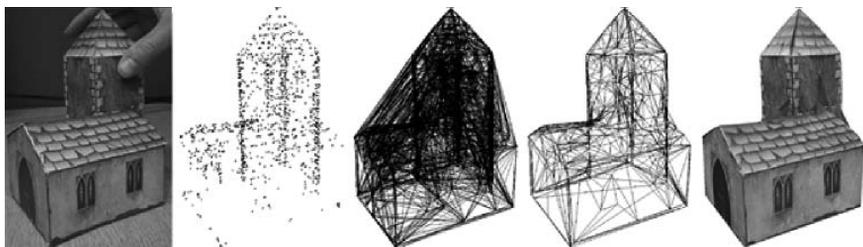


Рис. 2.1
Объект и его модель, сформированная на основе «облака точек» –
трехмерного массива данных

Построить трехмерный массив данных можно, измерив расстояние до каждой точки объекта с помощью дальномера. Помимо лидара, получение простран-

ственных изображений возможно с помощью ультразвуковых или радио- и микроволновыми устройств (радаров). Основное преимущество лазерных методов измерения расстояния состоит в том, что лазерное излучение обладает гораздо меньшей длиной волны, что позволяет направить узкий сканирующий пучок (исходя из законов дифракции электромагнитного излучения) и, таким образом, достичь более высокого пространственного разрешения.

Фотографирование с различных ракурсов позволяет создать стереофотографию, то есть оценить расстояние до каждого объекта в поле зрения объектива. По сути, стереофотография построена на принципе триангуляции, но анализ стереопары с помощью компьютера требует сложных алгоритмов (мозг человека, птиц, млекопитающих пока справляется с этой задачей намного быстрее).



Рис. 2.2

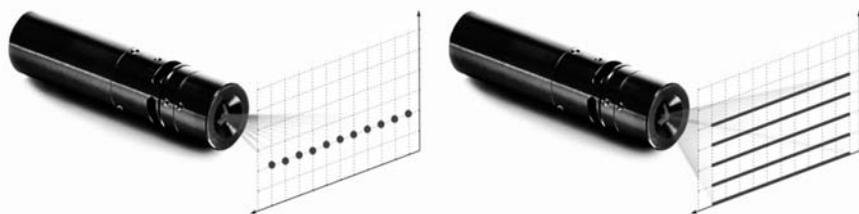
Использование структурированного света для получения объемных изображений

Наиболее простой и быстрый способ «оцифровки» формы объектов – использование так называемого «структурированного света». Для этого объект освещается не равномерным светом, а некоторым световым узором. Расстояние до каждой точки поверхности, рассчитывается по методу триангуляции. Оптический 3D-сканер с помощью лазера или проектора формирует на поверхности предмета некоторый световой узор.

Если наблюдать освещенную поверхность с иного ракурса, этот узор искажается в зависимости от глубины рельефа (рис. 2.2).

По искажениям узора рассчитывается 3D-модель объекта. По такому принципу работают, например, 3D-сканеры для оцифровки небольших моделей, человеческого лица, позволяющие бесконтактным методом получить точное объемное изображение.

В качестве источника света могут использоваться ламповые проекторы, но более четкую картину структурированного света можно получить с помощью дифракционных оптических элементов (масок), превращающих луч лазера в полосы или более сложные световые структуры (рис. 2.3).

**Рис. 2.3**

Лазерные источники с дифракционными оптическими элементами, создающие «структурированный свет»

2.2.

ЛАЗЕРНЫЕ СКАНЕРЫ С МЕХАНИЧЕСКОЙ РАЗВЕРТКОЙ

Для получения объемных изображений крупногабаритных объектов, сканирования земной поверхности применяются системы, в которых луч лазера сканирует заданный пространственный сектор и последовательно строит объемное изображение.

Лазерные сканеры, предназначенные для получения объемных изображений, часто называют лидары (LIDAR – LIght Detection And Ranging (англ.) – детектирование и измерение расстояний с помощью света).

Современные лазерные сканеры обеспечивают возможность генерации измерительных импульсов с частотой до нескольких сотен тысяч в секунду. С помощью системы подвижных зеркал или призм, вращения самого сканера, перемещения сканера на мобильном носителе, лазерные импульсы распределяются по всей поверхности объекта. Таким образом, сканер собирает информацию о координате до каждой точки. В результате таких измерений или «сканирования» мы за короткое время получаем «облако точек», или трехмерный массив данных, с большой точностью и полнотой описывающий форму обследуемого объекта.

По назначению сканеры можно разделить на три основных типа:

- наземные;
- воздушные;
- мобильные.

Лазерные сканеры применяются для получения трехмерных моделей различных предметов, зданий, сооружений. Направление измерения задается с помощью оптомеханической системы (сканера), дальность до каждой точки измеряется времяпролетным методом (рис. 2.4). При необходимости, для получения полной картины, производится сканирование с нескольких точек/ракурсов, после чего облака отражений «сшиваются» в единый массив.

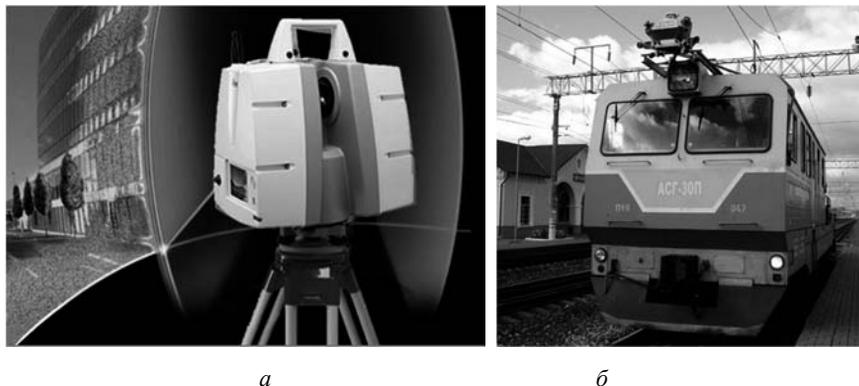


Рис. 2.4

Лазерные сканеры для построения 3D-моделей: *а* – используемый в строительстве; *б* – установленный на локомотиве

Основные области применения наземного 3D-сканирования – внутренняя и наружная съемка и моделирование архитектурных сооружений, промышленных объектов (строительных площадок, цехов, горных выработок и т. п.).

2.3. СКАНИРУЮЩИЙ ЛИДАР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Для некоторых применений требуется получение достаточно подробного облака точек с пространственной информацией в режиме реального времени с большой скоростью обновления данных.

Подобная задача появляется при размещении лидара на мобильном носителе, когда требуется большая скорость записи одного «кадра». Например, лидары являются основным сенсором в используемых в настоящее время системах управления автомобилей без водителя (беспилотных автомобилей).

Для получения одного 3D-массива данных нужно измерить расстояния до каждой точки в поле зрения. Поэтому, в отличие от простой фотографии, запись одного кадра с помощью лазерного сканера требует времени. Это время можно рассчитать, умножив время единичного измерения на количество точек (пикселей) изображения.

На малых расстояниях время получения одного кадра будет определяться скоростью обработки сигнала. На расстояниях в сотни метров ограничением уже будет время пролета светового импульса до цели и обратно. Это фундаментальное

ограничение, которое ограничивает быстродействие сканирующих систем для получения изображений с высоким разрешением.

Для примера: свет пролетает 300 метров за 1 микросекунду. Поэтому, чтобы получить изображение здания с расстояния 150 метров с разрешением 1920×1080 точек, потребуется не менее 2 секунд. Этой скорости съемки достаточно для получения трехмерных изображений неподвижных объектов, но недостаточно для видеосъемки с пространственным разрешением или контроля быстрых процессов на больших расстояниях.

Увеличить скорость получения кадров можно, например, используя несколько лазерных источников и одновременно измерять расстояния по нескольким направлениям. По этому принципу работают лазерные сканеры, устанавливаемые на автономных автомобилях (автомобилях без водителя), где требуется высокая скорость получения информации для оперативного анализа дорожной обстановки (рис. 2.5, вкл. ил. 1).

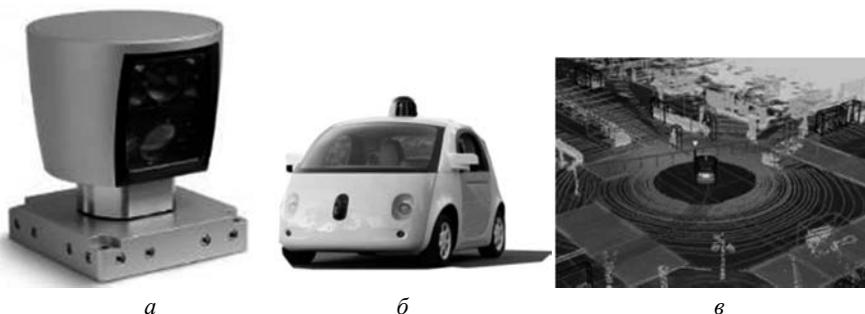


Рис. 2.5

Лазерный сканер для анализа дорожной обстановки (а);
Google car с установленным сканером (б); 3D-облако точек, получаемое сканером (в)

Например, в разработке компании Velodyne (Google car) используются 32 или 64 лазерных диода, одновременно посылающих импульсы по разным направлениям в вертикальной плоскости. В горизонтальном направлении развертка кадра осуществляется за счет вращения сканера. Поток данных, получаемых системой анализа дорожной обстановки, достигает 1 Гбит в секунду.

2.3.1.

ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ В ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ

Дальномер, установленный на самолете или вертолете и проводящий измерения непрерывно, позволяет получить профиль земной поверхности. Высота полета и координаты воздушного судна измеряется с помощью спутниковых систем

геопозиционирования и инерциальных систем (гироскопов, акселерометров). Обработка данных сканирования с учетом мгновенных координат прибора позволяет построить объемную карту местности.

Лазерный дальномер, проводящий последовательные измерения, часто называют лидаром. Для измерения профиля поверхности измерения проводятся с использованием сканера, который отклоняет луч лазера с помощью качающегося зеркала или вращающейся призмы (рис. 2.6).

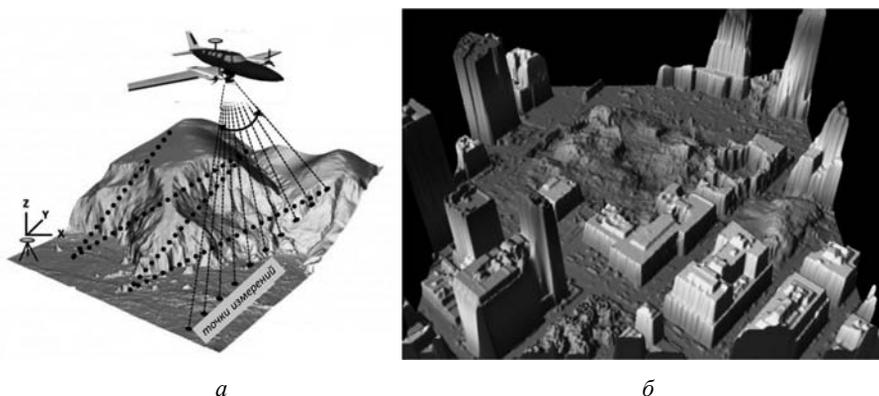


Рис. 2.6

Получение профиля местности с помощью лидара воздушного базирования (*а*); трехмерный массив данных лазерного сканирования (*б*)

Привязывая результаты лидарных измерений к данным систем геопозиционирования, можно построить объемную карту местности при движении воздушного судна – трехмерный массив данных (облако точек) с абсолютными значениями высот.

В табл. 2.1 представлены различные принципы пространственного сканирования лазерным лучом.

В табл. 2.2 приведены характеристики основных систем, используемых в топографии для построения цифровых синтезированных карт местности.

Если проводится профилирование поверхности, покрытой лесом, то развертка принимаемого сигнала по времени представляет собой не одиночный отраженный импульс, а последовательность импульсов, получаемых при отражении от кроны деревьев, ветвей, травы и т.д.

В лидарном сигнале скрыта информация не только о профиле земной поверхности, но и о количестве деревьев и их высоте, плотности крон, состоянии листвы и т. д.

Таблица 2.1

Различные типы сканирующих систем

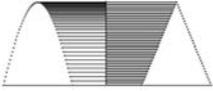
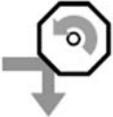
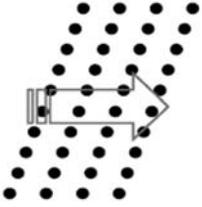
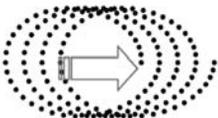
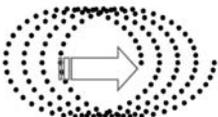
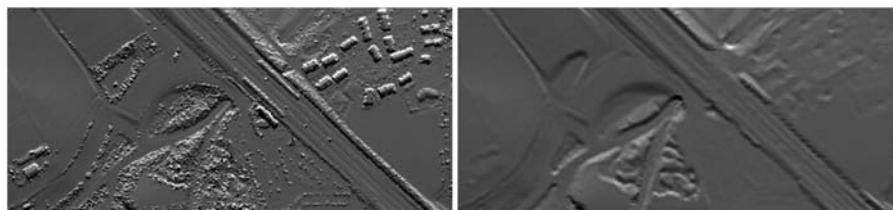
Тип сканера	Схема узла	Распределение точек на цели	Достоинства (+) и недостатки (-)
Осциллирующее зеркало			<ul style="list-style-type: none"> + Управление скоростью сканирования и углом обзора + возможность использовать большие апертуры - Нелинейность на краях поля
Вращающееся полигональное зеркало			<ul style="list-style-type: none"> + Низкое энергопотребление и стабильность. + Постоянное расстояние между точками по ходу движения - Увеличение расстояния между точками на краях поля (при большом угле). - Небольшие апертуры (~50 мм)
Вращающееся зеркало (сканер Палмера)			<ul style="list-style-type: none"> + Постоянное расстояние между точками по ходу движения - Фиксированное поле зрения. - Небольшие апертуры (~50 мм) - Эллипс
Оптический клин			<ul style="list-style-type: none"> + Постоянное расстояние между точками по ходу движения - Фиксированное поле зрения. - Небольшие апертуры (~50 мм) - Эллипс

Таблица 2.2

**Характеристики основных систем, используемых в топографии
для построения цифровых синтезированных карт местности**

Система	OptechALTMGemini	Leica ALS50-II	Riegl LMS-Q560	Toposys Falcon-III
Лазер	1064 нм	1064 нм	1550 нм	1550 нм
Высота (дальность), м	80 ... 4000	6000	30 ... 1800	30 ... 2500
Количество уровней по высоте	До 4-х	До 4-х	Полный сигнал	9 или полный сигнал
Частота сканирования, Гц	До 100	До 90	До 160	До 415
Угол сканирования, °	Макс. ± 25	Макс. ± 37.5	Макс. ± 22.5	± 13.5 (фикс.)
Частота импульсов, кГц	33 ... 167	макс. 150	До 200	До 125
Расходимость лазерного пучка, мрад	0.15/0.25, 0.8	0.15/0.22	0.5	0.7
Тип сканирования	Качение, пила	Качение, пила	Зеркало-полигон	Волоконный модуль

Анализируя данные сканирования, можно построить профиль земной поверхности и собрать объемную и детальную информацию о лесном покрове, что позволяет создать цифровую модель поверхности (digital surface model (DSM)) и цифровую модель грунта (digital terrain model (DTM)) (рис. 2.7).



а

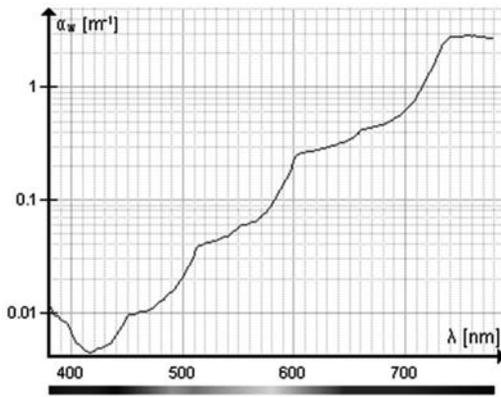
б

Рис. 2.7

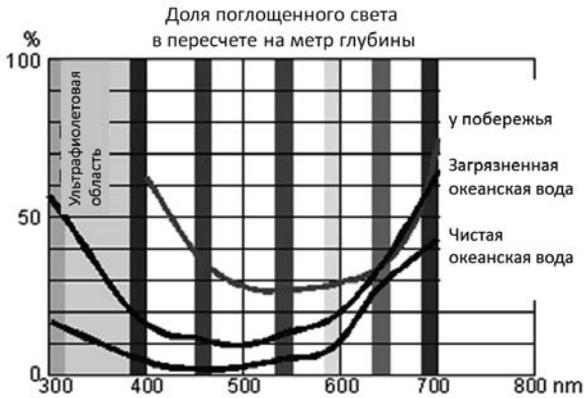
Цифровые модели поверхности (а) и грунта (б),
получаемые с помощью лазерного сканера

2.3.2. БАТИМЕТРИЯ – ЗОНДИРОВАНИЕ ДНА ВОДОЕМОВ

В батиметрии (от греч. bathys – глубокий) для зондирования дна водоемов лазерным излучением используется лазер видимого диапазона, синего или зеленого цвета. Минимум поглощения дистиллированной воды находится в синей части спектра (рис. 2.8, *a*), однако в реальных условиях из-за растворенных в воде веществ минимум смещен в зеленую область спектра (рис. 2.8, *б*). Поэтому неодимовые импульсные лазеры с удвоением частоты наилучшим образом подходят для профилирования дна: затухание света с длиной волны 532 нм в пресной и морской воде минимально.



a

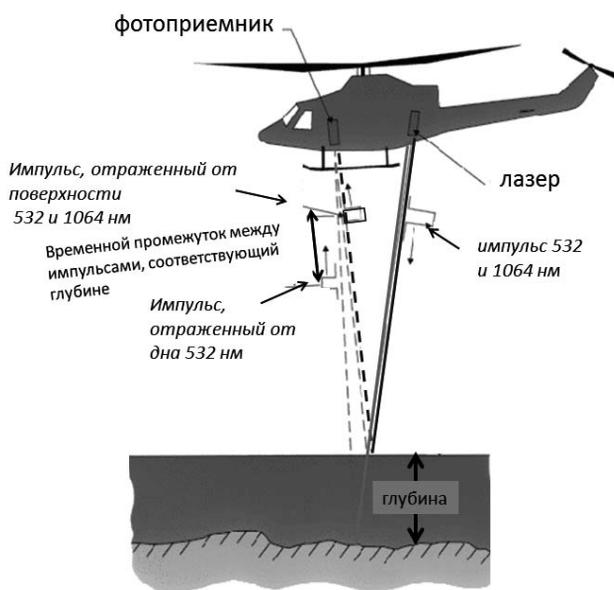


б

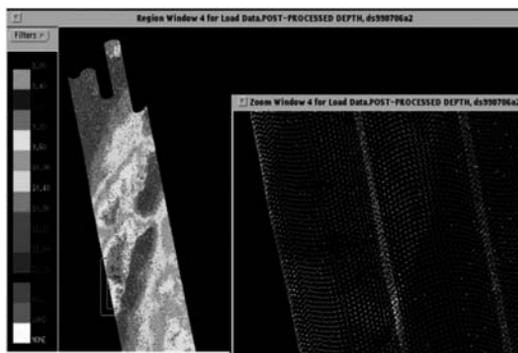
Рис. 2.8

Зависимость коэффициента поглощения света от длины волны: *a* – в дистиллированной воде; *б* – в реальных условиях в чистой и загрязненной океанской воде

На рис. 2.9, *а* приведена схема проведения авиационной батиметрической съемки. При проведении измерений получается карта, на которой различные цвета соответствуют различным глубинам (рис. 2.9, *б*).



а



б

Рис. 2.9

Схема проведения батиметрических измерений (*а*); массив данных, получаемый при батиметрической съемке (*б*)

Для измерения профиля дна используется обычно импульсный неодимовый лазер с удвоением частоты. Пройдя через нелинейный кристалл, часть излучения с длиной волны 1064 нм преобразуется в свет 532 нм. Лазерный передатчик посы-

ляет по одной и той же траектории импульс с двумя длинами волн, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Поскольку поглощение инфракрасного излучения в воде достаточно сильно, то сигнал на длине волны 1064 нм не доходит до дна и может быть получен только от поверхности воды. С другой стороны, зеленый луч глубже проникает через толщу воды и отражается от дна.

В фотоприемном канале 532 нм наблюдаются последовательно два импульса, соответствующие отражениям от поверхности воды и от дна водоема. Импульс лазера отражается как от поверхности воды, так и от дна водоема. На фотоприемнике наблюдаются последовательно два пика, интервал между которыми соответствует глубине.

В основном, батиметрия оперирует данными, получаемыми с помощью гидроакустических лотов (эхолотов, или сонаров), вмонтированных в дно судна. В реальных условиях лазерное сканирование не всегда может составить конкуренцию звуковой эхолокации: максимальная глубина, на которой удастся зарегистрировать сигнал, отраженный от дна, для самой чистой морской воды не превышает 70 м. В реках, в мутной воде глубина сканирования ограничена всего несколькими метрами.

Однако в некоторых случаях лазерная батиметрия имеет неоспоримые преимущества. С помощью лазерного сканера можно проводить профилирование морского дна с самолета или вертолета с большой скоростью на очень больших территориях. Акустическое зондирование весьма уязвимо в местах, изобилующих отмелями и поэтому более пригодно для использования в глубоких водах. Гидроакустика обеспечивает радиус обзора примерно в два раза больший, чем глубина (рис. 2.10, а). Это означает, что охват рельефа дна ограничен на мелководье и в прибрежных зонах.

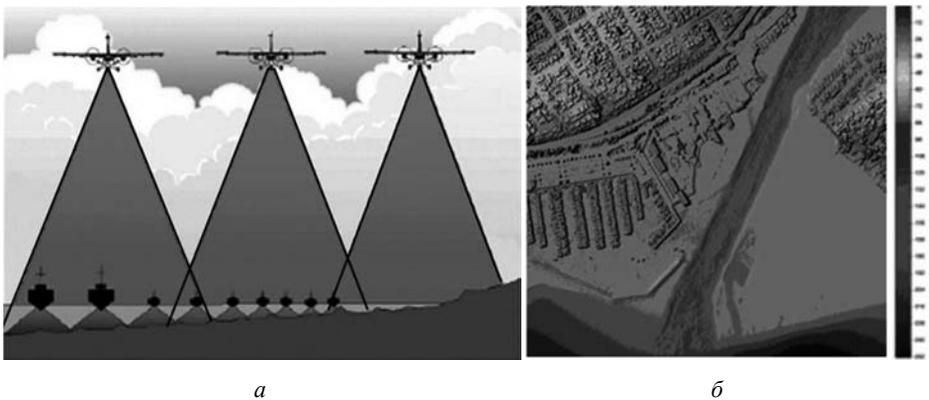


Рис. 2.10

Сравнение информативности оптической (с самолета) и акустической (с кораблей) локации морского дна (а); карта прибрежной зоны (б).

Различным цветам соответствуют высота над уровнем водной поверхности или глубина

С водного транспорта гидроакустическими методами трудно сканировать перемежающиеся отмели и мелководье. Воздушное лазерное батиметрия, напротив, обеспечивает возможность большого охвата участков рельефа дна на мелководье, недискретный, цельный поток данных через раздел суша / море.

В реальной системе зеркальное отражение лазерного луча от поверхности воды при ветреной погоде, приводящей к образованию мелких волн, существенно усложняется, поскольку эти мелкие волны действуют как грани зеркала. В спокойных условиях поверхность представляет собой одно большое зеркало и, таким образом, направляет отраженное излучение прямо на приемник.

Следует отметить, что исходящий лазерный луч при сканировании образует угол до 20° по отношению к вертикали. Зеленый лазерный луч на 532 нм при прохождении морской поверхности преломляется на угол порядка 15° в зависимости от структуры поверхностных волн. Поэтому датчик также должен учитывать коэффициент преломления при вычислении глубины дна или объекта (рис. 2.11).

В приведенной на рисунке формуле: K – коэффициент учитывающий эффективность приемной системы, выходную энергию лазера, условия атмосферы и т. д.; H – высота полета, z – глубина проникновения в воду, n_{H_2O} – показатель преломления воды, $\beta(z)$ – коэффициент обратного рассеяния воды, $c'(z)$ – коэффициент поглощения воды.

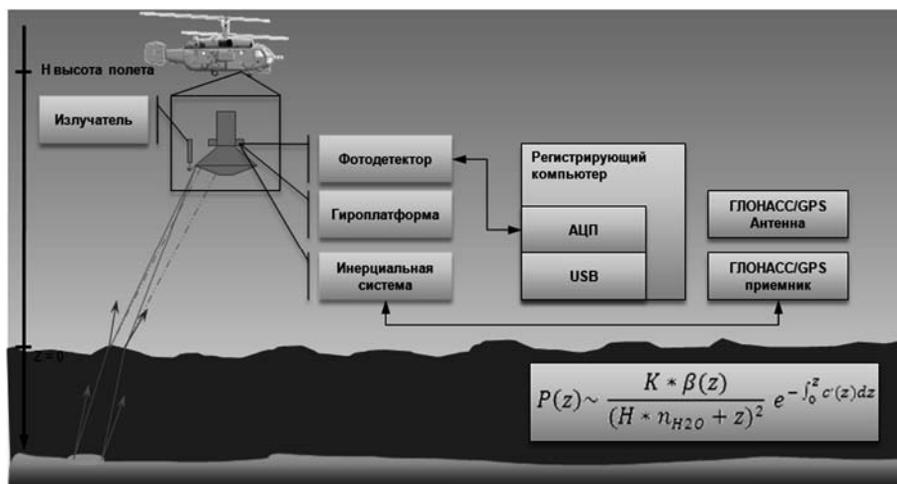


Рис. 2.11

Принцип действия авиационной батиметрической системы, установленной на вертолете Ка-32

2.4. ФЛЭШ-ЛИДАРЫ

Для получения пространственных изображений могут использоваться фотоприемные матрицы, каждый пиксель которой независимо регистрирует получаемый сигнал с разрешением по времени. Такие устройства называются флэш-лидарами, или иначе времяпролетными камерами (time-of-flight camera).

Вместо узконаправленного светового луча флэш-лидар посылает короткий расфокусированный импульс лазера в некоторый телесный угол, засвечивая вспышкой область наблюдения. Обратный отраженный сигнал с помощью телескопа собирается на фотоприемную матрицу, но не обычную, а позволяющую измерить время прихода светового импульса на каждый пиксель по отдельности (рис. 2.12).

Эта технология появилась совсем недавно, разрешение матриц флэш-лидаров существенно уступает обычным камерам. Существуют матрицы на основе лавинных InGaAs-фотодиодов (область спектральной чувствительности 1.5 мкм) и кремниевых PIN-диодов (видимый диапазон). Типичное разрешение матрицы, принимающие световой сигнал с разрешением по времени, меньше 0.1 мегапикселя (например, 128×128, 224×172 пикселей).

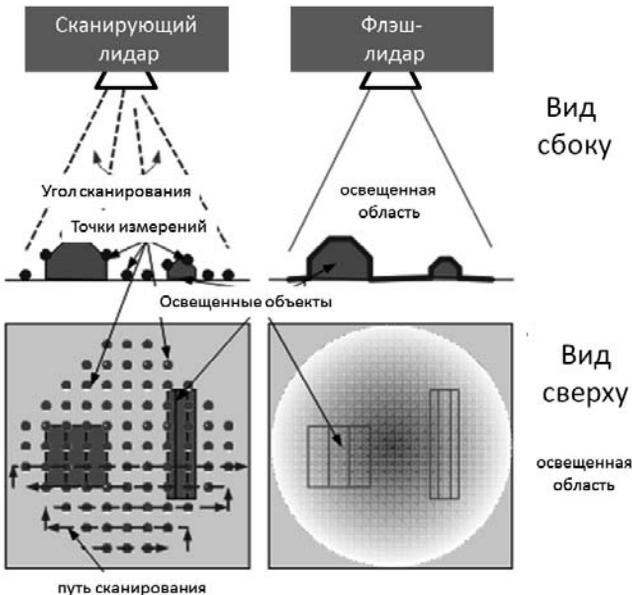


Рис. 2.12
Сравнение принципов получения изображения сканирующими лидарами и флэш-лидарами

Матрицы позволяют обрабатывать световой поток с частотой кадров, позволяющей вести видеосъемку (30 кадров в секунду и более). Пространственное разрешение камеры по дальности, определяемое временными характеристиками матрицы, достигает 3 м («ширина» временного окна 10 нс) и в некоторых моделях достигает 200 пс (пространственное разрешение 45 мм).

Несмотря на невысокое разрешение, подобные матрицы получают все большее распространение (рис. 2.13). Например, они используются в игровых устройствах и компьютерной технике, устройствах, где требуется распознавать жесты человека.

Флэш-лидары с рабочей дистанцией до 100 метров используются в компактных системах контроля дорожной обстановки автомобилей без водителя (рис. 2.14).



Рис. 2.13

Изображения, полученные камерой с пространственным разрешением по трем координатам. Рабочий диапазон 0.1–4 м. Пространственное разрешение 1–2% от измеряемого расстояния. (PMD Technologies GmbH)

Более подробно лидарная техника рассматривается в главе 21 «Лидары (лазерные радары)». Трёхмерная лазерная локация с использованием матричных приёмников описана в разделе 21.1.

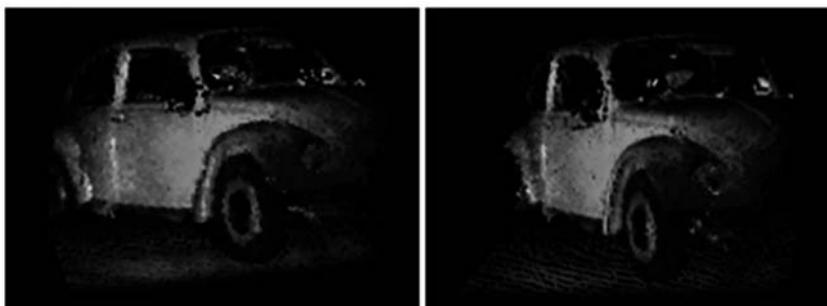


Рис. 2.14

Два изображения с разных ракурсов, извлеченные из трехмерного массива данных, полученных флэш-лидаром

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

2.1. Лидары для построения пространственных изображений можно разделить на две категории.

2.2. К первой относятся приборы, которые строят изображения неподвижных объектов, получая данные с высоким пространственным разрешением в течение достаточного промежутка времени, который может составлять от нескольких секунд до минут в зависимости от задачи. Подобные устройства служат для «оцифровки» формы предметов, строительных конструкций и зданий, мест происшествия и т.д.

2.3. Ко второй категории можно отнести лидары для формирования модели оперативной обстановки для контроля положения движущихся предметов. К этим лидарам относятся устройства, используемые для контроля быстро меняющейся дорожной обстановки в системах помощи водителю и в «беспилотных» автомобилях. Также к ним можно отнести сканеры, устанавливаемые на быстро движущихся транспортных средствах, в том числе поездах, самолетах, и служащие для построения пространственных изображений окружающей обстановки по ходу движения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 2

2.1. В чем отличие сканирующих лидаров от флэш-лидаров?

2.2. В каких спектральных диапазонах работают лидары, регистрирующие пространственные изображения?

2.3. Какие факторы ограничивают пространственное разрешение и дальность действия 3D-лидаров?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 2

2.1. George Heritage, Andy Large. Laser Scanning for the Environmental Sciences. John Wiley&Sons, 6 мая 2009 г.

2.2. Weitkamp, 2005. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer, Berlin.

2.3. Michel Jaboyedoff et al. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. Nat Hazards (2012) 61: 5–28.

2.4. Payne, E.M., (2013). Imaging Techniques in Conservation. Journal of Conservation and Museum Studies. 10(2).

2.5. Публикации компаний RIEGL (www.riegl.ru) и Renishaw (www.renishaw.com).

ГЛАВА 3

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ

3.1.

РАСЧЁТ СКОРОСТИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА

Этот способ измерений прост и надежен. Применяется для измерения скорости крупногабаритных объектов, движущихся в одном из двух направлений вдоль оси наблюдения. Для того чтобы измерить расстояние до объекта в некоторый момент времени, используется быстродействующий времяпролетный лазерный дальномер.

Из значений двух (или нескольких) последовательных измерений расстояния, с учетом временного промежутка между этими измерениями, рассчитывается скорость движения. Результат расчета – средняя скорость на участке между двумя измерениями, но при большой частоте следования импульсов она примерно соответствует мгновенной скорости.

Обычно лазерный радар посылает короткие импульсы света в инфракрасном диапазоне, которые отражаются от транспортного средства и попадают на фотоприемник прибора. Задержка времени прихода отраженного сигнала зависит от длины оптического пути. Расстояние до объекта и время задержки сигнала на фотодетекторе рассчитываются как и в импульсном дальномере (см. раздел 1.3, посвященный импульсным дальномерам).

Скорость транспортного средства (вернее, проекция скорости на направление лазерного луча) рассчитывается исходя из изменения расстояния за промежутки времени между импульсами.

$$V = (L_1 - L_2) / \Delta t \quad (3.1)$$

На принципе расчета скорости по изменению расстояния до объекта основано действие полицейских лазерных радаров (рис. 3.1). Большинство лазерных радаров – измерителей скорости работают на длинах волн 805 или 905 нм, т. е. в них используются полупроводниковые лазерные источники с частотой следования импульсов 1...2 кГц. Энергия импульсов небольшая, поэтому полицейские лазерные радары безопасны для глаз.

Дальность измерений составляет несколько сотен метров, расходимость лазерного луча – несколько миллирадиан, т. е. на расстоянии в 100 метров диаметр луча будет меньше, чем габариты машины. Поэтому лазерный радар может быть наведен на определенную машину в потоке, что минимизирует возможность ошибки и злоупотреблений. При этом и возможность детектирования лазерного радара антирадаром меньше, т. к. лазерный луч распространяется в пределах прямой видимости, и вероятность того, что излучение лазера попадет на антирадар заранее, до самого измерения, невелика.



Рис. 3.1
Полицейские лазерные радары

3.2.

ДОПЛЕРОВСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ

3.2.1.

ДОПЛЕРОВСКИЕ ЛИДАРЫ

Лазерные приборы, измеряющие скорость движущихся объектов за счет эффекта Доплера, называются доплеровскими лидарами. Эффект Доплера заключается в изменении частоты излучаемой или отраженной от движущегося объекта волны, электромагнитной или звуковой. Если объект движется по направлению к измерительному прибору, то частота сигнала увеличивается пропорционально скорости, вернее, ее проекции на ось наблюдения. И, наоборот, при движении в противоположном направлении частота уменьшается.

Доплеровские лидары за счет их высокой чувствительности могут измерять скорость движения не только макроскопических объектов, но и, например, *скорость движения воздуха* за счет приема сигнала, отраженного от воздушного аэрозоля (пыли или водяного пара).

Скорость движения объекта рассчитывается по формуле

$$\Delta f = 2V_r / \lambda, \quad (3.2)$$

где V_r – радиальная составляющая скорости, то есть проекция мгновенного вектора скорости $V = \{V_x, V_y, V_z\}$ на направление зондирования. $\Delta f = f_D$ – непосредственно измеряемый доплеровский сдвиг частоты лазерного излучения.

Ширина спектральной полосы генерации лазера должна быть очень малой, если требуется измерять скорость медленно движущихся объектов. Также, высокие требования предъявляются к фотоприемной схеме для детектирования столь малого сдвига частоты. Сдвиг частоты света при измерении скоростей составляет примерно 1 МГц (0.008 пикометра) при скорости движения объекта 1 м/с. В доплеровских лидарах обычно применяется гетеродинный метод детектирования, основанный на появлении разностной частоты, или частоты биений, при смешении принимаемого и опорного сигнала.

Сравним параметры и области применения радаров, работающих в радиодиапазоне, и лидаров, также использующих электромагнитное излучение, только с длиной волны меньшей на 3–6 порядков, т. е. световых волн инфракрасного, видимого или ультрафиолетового диапазонов.

Согласно теории рассеяния электромагнитных волн (теория Ми, по имени немецкого ученого Густава Ми), эффективность рассеяния велика, только если длина волны не превышает размер объекта. По этой причине радиорадары хорошо «видят» макрообъекты (летательные аппараты), а также плотные атмосферные образования – облака, грозовые фронты, снежные бури, но не могут детектировать движение чистой атмосферы. Напротив, длины волн оптического диапазона соответствуют размерам аэрозольных частиц, поэтому с помощью лазерного доплеровского лидара можно измерить скорость движения мельчайших пылевых частиц, а значит, и скорость ветра (подробнее см. главу 13).

3.2.2.

ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ АНЕМОМЕТРИЯ

Доплеровский метод измерения также применяется для определения скорости потока жидкостей или газов в трубах. Такая техника носит название *лазерная доплеровская анемометрия* (ЛДА) (от греческого «*anemos*» – ветер, движение). Свет лазера с большой длиной когерентности (например, гелий-неонового лазера) расщепляется на два пучка, которые затем скрещиваются под некоторым углом в потоке жидкости или газа (рис. 3.2).

При пересечении двух пучков и рассеянии света на коллоидных частицах в жидкости или газе образуется пространственная интерференционная картина. Период чередования светлых и темных полос зависит от угла пересечения лучей и от длины волны света.

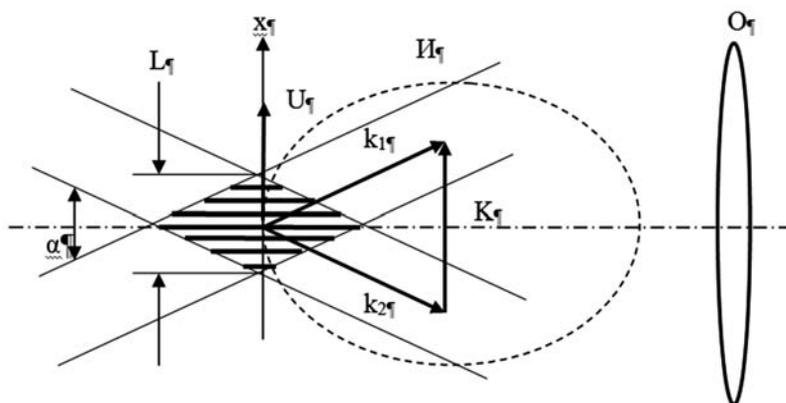


Рис. 3.2

Интерференционная модель лазерной доплеровской анемометрии
(И – индикатриса рассеяния, О – приемный объектив)

Поскольку проекции направлений распространения лучей света на направление движения жидкости (газа) имеют разные знаки, то для рассеянного света от разных пучков частота колебаний будет отличаться на значение доплеровского сдвига.

В результате, в области пересечения двух когерентных монохроматических пучков с разными частотами вместо неподвижной картины интерференции наблюдается бегущая световая решётка. Скорость движения полос пропорциональна скорости потока жидкости или газа. Если собрать с помощью объектива рассеянный свет и направить его на фотоприемник, то интенсивность сигнала на нем будет периодически изменяться, на основе чего рассчитывается скорость потока.

3.3.

МЕТОД ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Метод цифровой трассерной визуализации (в англоязычной литературе PIV – Particle Image Velocimetry метод) относится к классу бесконтактных методов измерения скорости в потоках. Есть и другие названия этого метода. Иногда

используется название «стробоскопическая визуализация», также его называют времяпролетным, но при этом принцип измерения координат движущихся объектов (частиц) отличается от времяпролетных дальномеров и лазерных радаров.

Метод возник задолго до появления лазеров. В качестве источников света использовались механические стробоскопы или лампы-вспышки. Лазеры позволили получить более короткие и стабильные импульсы с узкой областью фокусировки и большой яркостью, поэтому точность метода повысилась.

В качестве источника излучения обычно используются твердотельные импульсные Nd:YAG-лазеры. Такие лазеры имеют малую длительность импульса ($\sim 4 \dots 10$ нс) и достаточно высокую энергию в импульсе. Использование двух лазеров, работающих на одной оптической оси, позволяет получать короткую временную задержку между импульсами, что необходимо для исследования высокоскоростных потоков. Иногда для освещения частиц применяют непрерывные лазеры, сканирующие поток при помощи вращающихся призм и зеркал.

Конфигурация установки показана на рис. 3.3. Лазер посылает короткий импульс, который с помощью цилиндрической линзы лазерный луч расширяется только по одной координате и создает «лазерный нож» – тонкую ярко освещенную область в потоке жидкости или газа. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Размер, плотность и объемная концентрация частиц подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. Если в освещенную «лазерным ножом» область попадают движущиеся в потоке частицы, то они рассеивают свет, и фотокамера регистрирует их мгновенное расположение.

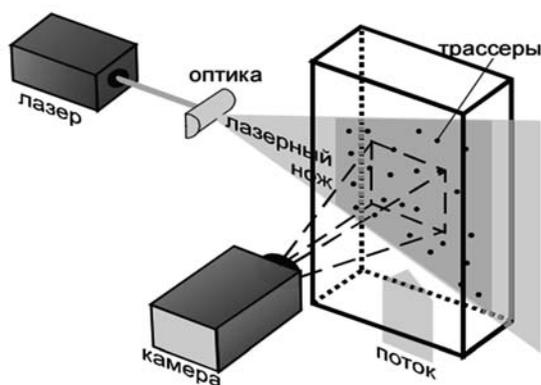


Рис. 3.3

PIV-метод (цифровой трассерной визуализации)

Затвор фотокамеры синхронизирован с лазером, и следующий снимок делается при следующем импульсе лазера. Сравнивая два последовательных снимка,

можно проследить за перемещением каждой частицы, если она не успевает выйти из освещенной области. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на фотопленку или электронный матричный фотодетектор (цифровую камеру).

Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц аппаратуры. Для измерения трех компонент скорости используют, как правило, два регистрирующих модуля, оптические оси которых ориентированы под определенным углом относительно друг друга.

Методы цифровой трассерной визуализации в настоящее время востребованы во многих практических приложениях. В авиастроительной индустрии, автомобилестроении в промышленных аэродинамических трубах производится диагностика полной картины обтекания элементов летательных аппаратов и автомобилей. В энергетике, химической и нефтегазодобывающей промышленности, машиностроении проводится оперативная диагностика и оптимизация аэрогидродинамики в реальных аппаратах или их моделях. В медицине проводится физическое моделирование работы искусственных сосудов и клапанов.

3.4.

ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ

3.4.1.

СРАВНЕНИЕ ГИРОСКОПОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Гироскоп – это устройство, которое служит для контроля ориентации тела в пространстве относительно инерциальных систем отсчета. Существует два основных класса гироскопов – механические и оптические. Механические гироскопы известны с незапамятных времен – примером служит обыкновенный волчок. В качестве прибора для навигации механические гироскопы используются с XIX века.

Большие механические гироскопы обладают достаточно высокой точностью. Они используются и по сей день, однако постепенно уступают свое место оптическим гироскопам в большинстве применений.

В настоящее время механические гироскопы являются единственным решением при использовании в миниатюрных приборах. Ни один современный смартфон не обходится без устройства, контролирующего его положение в пространстве. Миниатюрные механические гироскопы на основе МЭМС – микроэлектромеханических систем, объединяющих в себе микроэлектронные и микромеханические

компоненты, завоевали свою нишу и применяются в приложениях, не требующих большой точности.

Гироскопы на основе МЭМС (рис. 3.4) являются непревзойденными по размерам (габариты устройства могут быть менее 1 мм) и энергопотреблению. Также могут применяться для навигации, если требуется миниатюрный прибор, например, в беспилотных летательных аппаратах. Обычно МЭМС-гироскоп совмещается с МЭМС-акселерометром, что позволяет получать полную информацию о движении объекта. На диаграмме (рис. 3.5) в координатах «точность – динамический диапазон» сравниваются гироскопы различных типов.

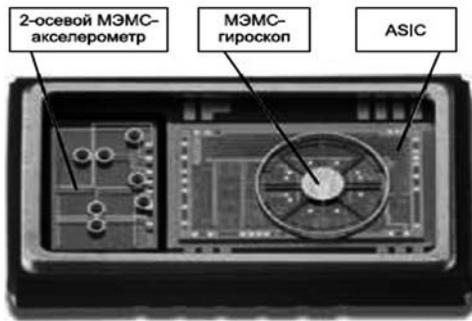


Рис. 3.4
МЭМС-гироскоп (микроэлектромеханический)

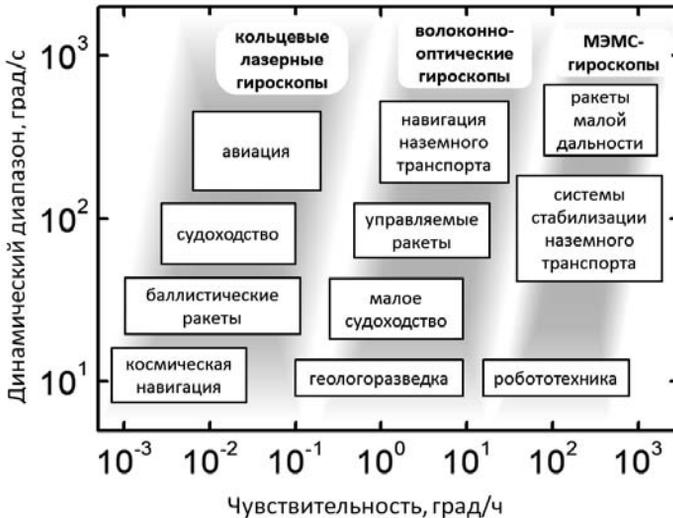


Рис. 3.5
Параметры гироскопов различных типов и их области применений

3.4.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Принцип действия оптических гироскопов основан на эффекте Саньяка, открытом в 1913 году. Эффект Саньяка объясняется в рамках специальной теории относительности (СТО).

Он является следствием релятивистского закона сложения скоростей – линейной скорости вращения кольцевого интерферометра и фазовой скорости каждой из встречных волн. Релятивистский закон сложения скоростей, в свою очередь, является следствием преобразований Лоренца. Эффект Саньяка, наряду с экспериментами Майкельсона-Морли, является одним из основополагающих опытов теории относительности.

Согласно СТО, скорость света c постоянна в любой инерциальной системе отсчёта, в то же время в неинерциальной системе отсчета (связанной с корпусом гироскопа) она может отличаться от c .

В оптическом гироскопе два луча света распространяются по замкнутой траектории в некоторой плоскости в противоположных направлениях.

Если сравнить времена прохождения света по некоторой замкнутой траектории в направлении вращения прибора и против направления вращения, то результат будет различен в зависимости от скорости вращения прибора. Разница во времени прихода лучей измеряется с помощью интерферометра: для этого надо получить картину интерференции двух лучей и измерить ее сдвиг. Из разницы длин оптического пути в инерциальной системе отсчёта рассчитывается поворот прибора за время прохождения луча.

Существует два основных типа оптических гироскопов: *кольцевые лазерные* и *волоконно-оптические*. В кольцевых лазерных гироскопах генерация излучения происходит непосредственно в замкнутом контуре гироскопа. В волоконно-оптических гироскопах источник света (лазер или светодиод) находится за пределами замкнутого контура. Принципы проведения измерений для кольцевых лазерных и волоконно-оптических гироскопов отличаются.

Оптические гироскопы имеют ряд существенных преимуществ перед механическими:

- отсутствие движущихся частей позволяет снизить время выхода прибора на режим с 20...30 с до 0.5...1.0 с и повысить устойчивость прибора к механическим воздействиям;

- лазерный гироскоп нечувствителен к линейным ускорениям до 1000g, в то время как механический гироскоп дает значительную ошибку при ускорении от 50g и выше;

- лазерный гироскоп выдает информацию в дискретном виде, что удобно при преобразовании ее в цифровую для последующей обработки.

Оптический гироскоп измеряет вращение вокруг одной оси. Для того чтобы получить полную информацию о вращении объекта в пространстве, используются трехосевые гироскопы, состоящие из трех взаимно перпендикулярных кольцевых лазерных или волоконно-оптических гироскопов.

3.4.3.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИРОСКОПОВ

Точность гироскопа обычно определяется важнейшим параметром – стабильностью смещения. Стабильность смещения представляет собой точность показаний датчика при отсутствии вращения в течение всего срока службы. В идеале стабильность смещения должна быть равна нулю, но в реальных условиях достижение такой точности невозможно вследствие изменений в самом датчике (рассогласование, шум, старение и др.), а также влияния условий и среды на измерения (температурные колебания, вибрации, линейные ускорения и др.).

Также важны такие характеристики, как:

- нестабильность смещения;
- угловой случайный уход (шум);
- ошибка или дрейф смещения гироскопа – общая или под влиянием конкретных факторов, например температуры;
- собственно смещение – показания гироскопа в отсутствие вращения;
- измерительный диапазон (динамический диапазон);
- температурная чувствительность;
- чувствительность к вибрации, ускорениям и ударам;
- старение.

Нестабильность смещения показывает, как смещение изменяется во времени. В спецификациях производителей стабильность смещения обычно специфицируется как σ значение в $^{\circ}/ч$ для более точных или в $^{\circ}/с$ для менее точных устройств. Нестабильность показаний гироскопа можно охарактеризовать аллановской девиацией (кривой Аллана), которая показывает зависимость ошибки показаний прибора от времени усреднения измерений. Кривая Аллана строится в логарифмическом масштабе по обеим осям (рис. 3.6).

Нестабильность смещения определяется как минимальная точка на кривой Аллана и используется для характеристики гироскопа. Расчет аллановской девиации является мощным математическим методом, который дает возможность пользователю оценить реальную эффективность любого гироскопа в зависимости от области применения, принимая во внимание эффекты смещения, шум, дрейф и долговременную нестабильность датчика.

Случайный угловой уход (случайное блуждание угла) (Angle Random Walk, ARW) – это мера шума сигнала стационарного (в отсутствие вращения)

гироскопа после интегрирования (в отличие от стабильности смещения, которая измеряется до интегрирования сигнала ориентации). Значение ARW дается в спецификациях производителя в $^{\circ}/\sqrt{ч}$ или $^{\circ}/\sqrt{с}$.

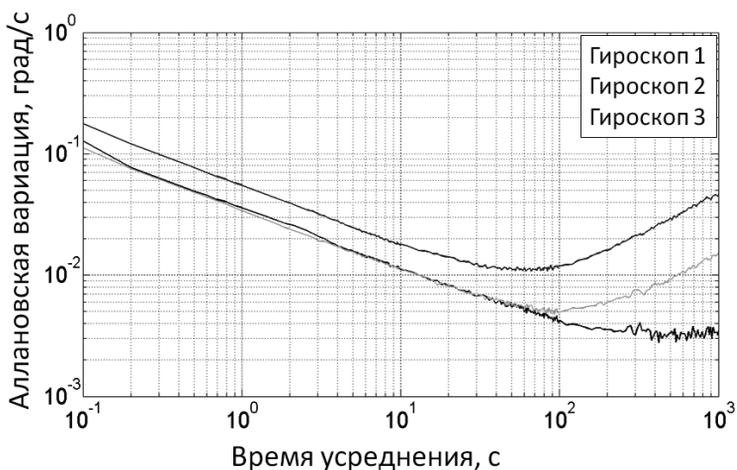


Рис. 3.6
Зависимость ошибки гироскопа от времени измерения

3.4.4. КОЛЬЦЕВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП

Кольцевой лазерный гироскоп обычно представляет собой кольцевой резонатор с тремя или четырьмя зеркалами, расположенными по углам полости, вырезанной в монолитном блоке с малым тепловым коэффициентом расширения. В современных гироскопах блок резонатора кольцевого лазера изготавливается из прозрачного стеклокерамического материала с коэффициентом теплового расширения $\pm 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ в диапазоне температур от 0 до 50 $^{\circ}\text{C}$. Жесткость конструкции и малая подверженность влиянию температурных колебаний нужны для обеспечения стабильности настройки и точности показаний гироскопа.

Полость в монолитном блоке заполняется газом (обычно смесью неона и гелия), также в нее вводятся высоковольтные электроды. Таким образом, кольцевой лазерный гироскоп представляет собой гелий-неоновый лазер с кольцевым резонатором, в котором свет распространяется одновременно в двух направлениях.

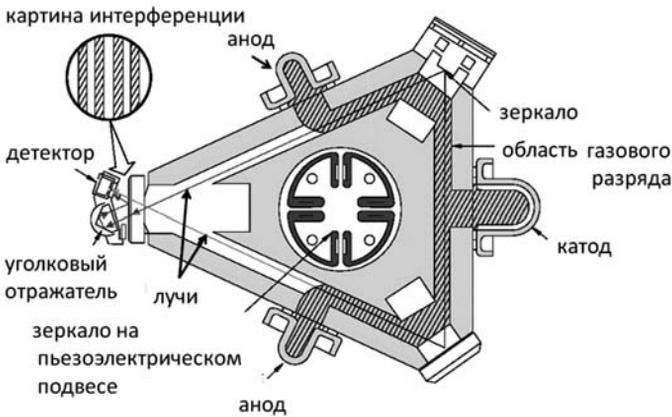
В лазерах часто применяются кольцевые резонаторы, однако, как правило, требуется получить только один выходящий луч, и одновременная генерация в двух направлениях является нежелательной. Поэтому в них ставятся дополнительные элементы, блокирующие движение света по резонатору в одном из направлений, например, изоляторы Фарадея.

Одно из зеркал резонатора выполнено полупрозрачным, и через него выходит часть излучения, используемая для измерений. Свет распространяется по резонатору в двух направлениях, поэтому через полупрозрачное зеркало выходят два пучка света. Далее они с помощью оптических элементов направляются на фотодетектор, причем при этом они скрещены под малым углом. На фотодетекторе наблюдается интерференция лучей (рис. 3.7, вкл. ил. 2).



a

б



в

Рис. 3.7

Кольцевые лазерные гироскопы различной конструкции (*a*, *б*); устройство кольцевого лазерного гироскопа (*в*)

Длина волны излучения, генерируемая лазером такова, что при обходе резонатора в нем укладывается целое число длин волн. При сложении интенсивностей волны света, распространяющегося в двух направлениях, образуется стоячая вол-

на, то есть минимумы и максимумы интенсивности. Как следует из специальной теории относительности эта стоячая волна «привязана» к инерциальной системе отсчета. Поэтому, если поворачивать кольцевой лазерный гироскоп, максимумы интенсивности останутся на месте. При этом картина интерференции, наблюдаемая на фотодетекторе, сместится.

Сдвиг фазы интерференции на фотодетекторе пропорционален абсолютному значению поворота прибора в пространстве. Это обуславливает высокую точность кольцевого лазерного гироскопа. Из скорости и направления смещения полюсов определяются скорость и направление вращения корпуса гироскопа.

Если используется одноэлементный фотодетектор, то он регистрирует модуляцию интенсивности, т. е. некоторую частоту биений, зависящую от скорости вращения. Установив два фотоприемника на расстоянии в четверть ширины полосы интерференционной линии, можно подсчитать число интерференционных полюсов, пришедших в одном и другом направлении.

Возникновение частоты биений можно объяснить и иначе: при вращении гироскопа длина оптического пути (a не геометрическая длина пути) для двух лучей различна: зеркала движутся по направлению распространения света или против него и за время прохода света по замкнутой траектории успевают сместиться. Поскольку на длине резонатора лазера должно укладываться целое число длин волн, то частота генерации в каждом направлении подстраивается под эффективную длину резонатора. Благодаря разности частоты света для пучков, генерируемых в противоположных направлениях, на фотодетекторе наблюдается частота биений. В соответствии с уравнением Саньяка, разность частот $\Delta\omega$ задается уравнением

$$\Delta\omega = 4A\Omega/\lambda P, \quad (3.3)$$

где A и P – площадь и периметр резонатора гироскопа, λ – длина волны света, Ω – угловая скорость вращения.

Если вращение происходит по часовой стрелке, распространяющийся по часовой стрелке лазерный луч пройдет большую оптическую длину пути, чем тот, который распространяется в противоположную сторону, то есть против часовой стрелки. Для вращения против часовой стрелки все будет наоборот. Как видно из уравнения Саньяка, от величины контура зависит угловое разрешение кольцевого лазерного гироскопа.

В кольцевом лазерном гироскопе наблюдается отрицательный эффект, называемый *захватом* частоты, который препятствует проведению измерений при малых скоростях вращения. При вращении лазерного гироскопа со скоростью, меньшей некоторого критического значения, называемого порогом захвата, частоты противоположно направленных бегущих волн в лазерном гироскопе синхронизируются, а частота биений становится равной нулю. Поэтому при вращении ла-

зерного гироскопа со скоростью, меньшей пороговой измерения угловой скорости связано с ошибками.

Явление захвата частот объясняется взаимной связью противоположно направленных бегущих волн. Необходимо отметить, что подобное явление наблюдается во многих связанных автоколебательных системах: это могут многоэлементные механические осцилляторы, автогенераторы в радиотехнике, акустические связанные системы. В случае лазерного гироскопа связь обеспечивается рассеянием света на поверхности зеркал. Для устранения эффекта захвата частоты резонатор кольцевого лазерного гироскопа размещается на пружинном подвесе, и с помощью небольших механических угловых колебаний резонатора создается начальное частотное расщепление встречных волн, которое позволяет избежать захвата частот.

Кольцевые лазерные гироскопы используются в областях, требующих наибольшей точности измерения поворота. Например, для навигации кораблей и подводных лодок, в геодезии, в научных экспериментах. Недостатками КЛГ являются их относительно высокая стоимость, большие габариты (точность зависит от площади контура) и вес, высокое энергопотребление (несколько ватт), требование высоковольтного питания. На времени жизни прибора сказываются утечка (диффузия) газа, чистота условий сборки прибора и т.д.

3.4.5. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП

Волоконно-оптический гироскоп – это интерферометр Саньяка, в котором круговой оптический контур заменен на катушку из длинного одномодового оптического волокна (рис. 3.8).

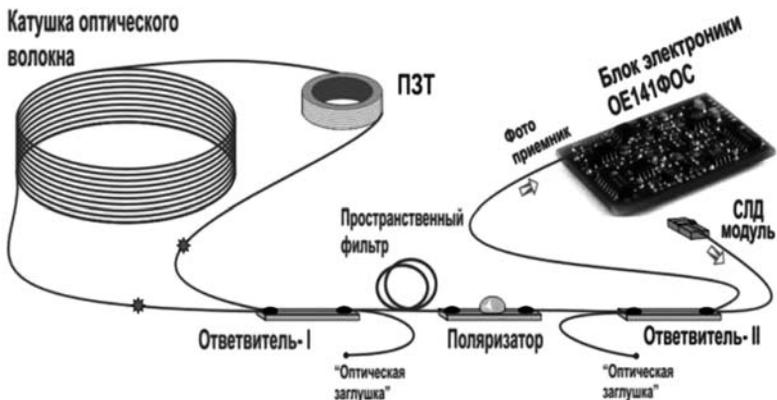


Рис. 3.8

Основные компоненты волоконно-оптического гироскопа (ЗАО «Физоптика»)

Лазерный луч разделяется на два луча и вводится в одно и то же волокно, но с противоположных сторон и в противоположных направлениях. Благодаря эффекту Саньяка луч, проходящий в направлении, противоположном вращению, имеет более короткий оптический путь, чем луч, проходящий в направлении, совпадающем с направлением вращения. В результате образуется дифференциальный фазовый сдвиг, измеряемый при помощи интерферометрии, переводя один из компонентов угловой скорости в сдвиг интерференционной картины, который можно измерить фотометрическим путем.

Величина сигнала зависит от эффективной площади закрытого оптического пути в соответствии с эффектом Саньяка. Эта площадь равна площади одной петли, умноженной на количество витков в катушке. Поэтому точность ВОГ определяется длиной оптоволоконна.

В отличие от кольцевого лазерного гироскопа, волокно является пассивным элементом, в контуре гироскопа нет процесса лазерной генерации, и это определяет их отличия. Если кольцевой лазерный гироскоп измеряет абсолютное значение поворота, то волоконный – только его производную, то есть скорость вращения. Поэтому точность и стабильность волоконно-оптических гироскопов несколько хуже, чем кольцевых лазерных.

ВОГ получили развитие, начиная с 70-х годов XX века в связи с появлением технологии производства полупроводниковых диодных лазеров и одномодового оптического волокна с низким коэффициентом потерь. В настоящее время выпускается оптоволоконно с очень низкими потерями: в гироскопах используются катушки с длиной волокна до 5 км. Катушку нельзя сделать очень маленькой: при уменьшении радиуса сгиба потери в волокне возрастают, поэтому диаметр катушки с волокном обычно не менее 5 см.

В волоконных гироскопах используются источники света с малой длиной когерентности. Дело в том, что при распространении света в волокне некоторая его часть рассеивается в обратном направлении на неоднородностях, дефектах, за счет рэлеевского рассеяния. Это приводит к ошибке измерений, так как свет с «неправильного» направления попадает на фотоприемник. Но если длина когерентности источника мала, то это исключает возникновение паразитной интерференции, так как интерферировать могут только пучки некогерентного света, прошедшие одинаковые расстояния. Поэтому в качестве источника света в интерференционных волоконно-оптических гироскопах используются суперлюминесцентные светодиоды, а не монохроматические лазеры.

Помимо потерь, связанных с затуханием света в волокне, в гироскопе должна быть решена проблема вращения поляризации излучения в волокне. В обычном оптическом волокне, профиль показателя преломления в сечении одинаков во всех направлениях. Однако в волокне всегда присутствует незначительное двулучепреломление, поскольку на практике всегда есть некоторое механическое

напряжение или другие эффекты, которые нарушают симметрию волокна. Как следствие, поляризация света, распространяющегося в волокне, постепенно меняется случайным образом. Процесс зависит также от каких-либо изгибов волокна и от его температуры.

Эта проблема устраняется при использовании оптического волокна, *сохраняющего состояние поляризации*, т. е. волокна с сильным встроенным двулучепреломлением (так называемое РМ-волокно, или polarization maintaining fiber). При условии, что свет заводится в волокно с поляризацией, параллельной одной из двулучепреломляющих осей, поляризация света в волокне остается линейной независимо от внешних воздействий на волокно.

Сердцевина оптоволокна (рис. 3.9) окружена оболочкой с неоднородным в поперечном сечении коэффициентом преломления. Затемненные области соответствуют увеличенному значению коэффициента преломления кварцевого стекла. Такая конструкция волокна не позволяет изменяться направлению колебаний электромагнитной волны света при распространении в волокне под действием малых случайных неоднородностей.

Волоконно-оптический гироскоп (рис. 3.10) является, пожалуй, самой надежной альтернативой механического гироскопа.

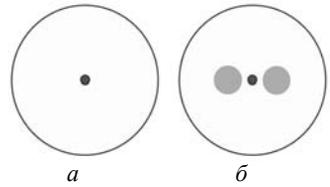


Рис. 3.9
 Поперечное сечение обычного оптоволокна (а) и волокна с сохранением поляризации (б)

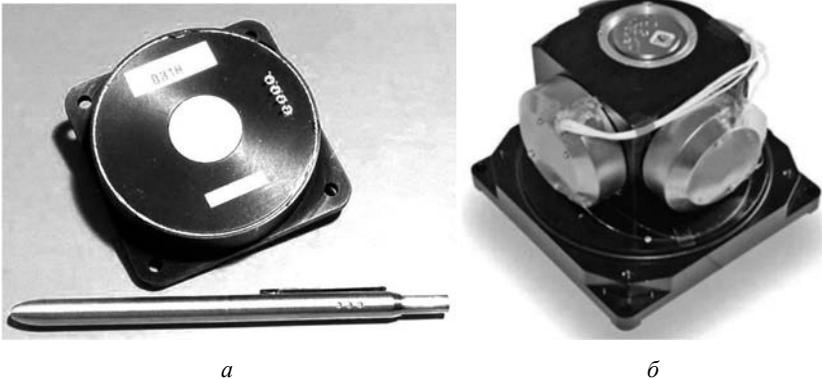


Рис. 3.10
 Одноосевой (а) и трехосевой (б) оптические гироскопы

В силу своей высокой надежности, волоконно-оптические гироскопы используются в космической технике. По сравнению с кольцевым лазерным гироскопом он, как правило, имеет более высокое разрешение, но худшие характеристики

дрейфа и масштабного коэффициента. Как правило, чувствительность ВОГ составляет порядка $0.1^\circ/\text{час}$ и значительно уступает чувствительности КЛГ $0.001^\circ/\text{час}$.

ВОГ имеют такие преимущества перед кольцевыми лазерными гироскопами как малый вес, меньшие габариты, меньшее энергопотребление, длительный срок службы и низкая стоимость. Это дает волоконно-оптическим гироскопам преимущества в автомобилестроении и робототехнике, где не требуется высокая чувствительность и хорошие характеристики дрейфа, но важны малые габарит и вес, и низкая стоимость (рис. 3.10).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

3.1. Лазерные методики повсеместно используются для измерений скоростей движения макроскопических объектов, воздушных потоков и жидкостей. Существуют два принципиально отличающихся способа измерения скоростей:

- по изменению координат объекта измерений;
- по доплеровскому сдвигу частоты излучения.

3.2. Выбор методики измерений определяется дистанцией измерений, требуемой точностью, требованиями лазерной безопасности и т.д. Измерения могут проводиться с помощью импульсных или непрерывных лазеров. Измерения посредством лазерного излучения отличаются точностью, надежностью и удобством применения.

3.3. Лазерные гироскопы обладают рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с механическими гироскопами. Они малочувствительны к механическим воздействиям, стабильны в работе, точны и долговечны, имеют небольшое энергопотребление. Действие лазерных гироскопов основано на эффекте Саньяка, который является следствием релятивистского закона сложения скоростей и имеет объяснение в рамках теории относительности. При повороте кольцевого резонатора в инерциальном пространстве оптические пути, проходимые лучами, движущимися по часовой стрелке и против нее, оказываются неодинаковыми. Разность между оптическими путями приводит в этом случае к возникновению разности частот генерируемых колебаний, из которой и рассчитывается скорость вращения резонатора. Появление лазерных гироскопов открыло новую страницу в обеспечении навигации.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1

В кольцевом лазерном гироскопе используется гелий-неоновый лазер, работающий на длине волны 0.633 мкм. Кольцевой лазер имеет равносторонний тре-

угольный резонатор с плечом, равным 10 см. Определить частоту биения для скорости вращения, равной 0.1° ч^{-1} .

Решение:

Согласно основному уравнению кольцевого лазерного гироскопа $\Delta\theta = 4A\Omega/\lambda P$,

$$P = 3 \times 10 = 30 \text{ см};$$

$$\lambda = 0.633 \text{ мкм} = 0.633 \times 10^{-4} \text{ см};$$

$$A = \sqrt{3} \times 10^2 / 4 = 173.2 / 4 = 43.3 \text{ см}^2;$$

$$\text{Таким образом, } \Delta F \text{ (в Гц)} = (4 \times 43.3 / 0.633 \times 10^{-4} \times 30) \times \Omega = 25.33 \times \Omega \text{ (}^\circ/\text{с)};$$

$$\text{Для } \Omega = 0.1^\circ \text{ час}^{-1}, \Delta F = 25.33 \times 0.1 = 2.533 \text{ Гц.}$$

Задача 2

Определите процентное улучшение масштабного коэффициента двух треугольных кольцевых лазерных гироскопов с длиной оптического пути 30 см (каждое плечо кольцевого лазера имеет длину 10 см) и 45 см (каждое плечо кольцевого лазера имеет длину оптического пути 15 см) соответственно, при условии, что другие параметры идентичны.

Решение:

Масштабный коэффициент пропорционален отношению площади оптического контура к оптической длине пути. Если известно, что другие параметры КЛГ идентичны, это отношение можно записать как $\sqrt{3}/12 \times L$, где L – оптическая длина пути.

Таким образом, улучшение масштабного коэффициента $L_2/L_1 = 45/30 = 1.5$.

Это означает, что масштабный коэффициент 45 см КЛГ в 1.5 раза больше, чем у 30 см КЛГ.

Таким образом, улучшение масштабного коэффициента равно 50%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 3

- 3.1. На каких принципах основаны оптические измерения скорости?
- 3.2. Каковы требования к источнику излучения лазерного радара?
- 3.3. Каковы требования к источнику излучения доплеровского измерителя скорости?
- 3.4. Какие физические эффекты определяют действие механического и оптического гироскопов?
- 3.5. В чем преимущество оптических гироскопов перед механическими?
- 3.6. Чем отличаются кольцевой лазерный и волоконно-оптический гироскопы?
- 3.7. От чего зависят точность измерений и стабильность оптических гироскопов?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 3

- 3.1. Застрогин Ю.Ф. Контроль параметров движения с использованием лазеров: Методы и средства. Москва: Издательство «Машиностроение», 1981.
- 3.2. Андреев М., Васильев Д., Пенкин М., Смоленцев С., Борейшо А., Клочков Д., Коняев М., Орлов А., Чугреев А. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки. Фотоника. 6/2014.
- 3.3. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука 1982 г.
- 3.4. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 114 с.
- 3.5. Merlo S., Norgia M. and Donati S., “Fiber Gyroscope Principles”, Handbook of Fibre Optic Sensing Technology, John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, 2002.
- 3.6. Juang, J.-N. Radharamanan, R. “Evaluation of Ring Laser and Fiber Optic Gyroscope Technology” Proc. American Society for Engineering Education, Middle Atlantic Section ASEE Mid-Atlantic Fall 2009.

ГЛАВА 4

МЕТРОЛОГИЯ ВРЕМЕНИ, ЧАСТОТЫ И ДЛИНЫ

4.1.

ОПТИЧЕСКИЙ ЭТАЛОН ДЛИНЫ

Для измерения расстояний и размеров издревле использовались различные единицы, в зависимости от задачи и диапазона измерений, отличающиеся большей или меньшей точностью: аршин, пядь, локоть, лапоть, шаг, верста и т. д. Требования к точности и стандартизации измерений возрастали, и возникла идея создать единый эталон.

Впервые понятие метра появилось во Франции в период Великой французской революции. Учёные того времени решили заимствовать единицу измерения длины, так сказать, из самой природы, и в качестве неизменного прототипа длины специальная комиссия Французской академии наук предложила взять длину одной десятиmillionной доли четверти Парижского меридиана. Это расстояние и назвали метром (*mètre vraiet dé finitif* – метр подлинный и окончательный).

Но далее оказалось, что благодаря всё возрастающей точности геодезических измерений эталонное значение метра и длина соответствующей части меридиана расходились все сильнее. Кроме того, длина меридианов не остаётся строго постоянной из-за смещения полюсов. Было принято решение больше не связывать значение меры длины с одной сорокаmillionной частью Парижского меридиана. Метр перестал быть «естественной» мерой.

За точное значение метра был принят так называемый международный прототип из платиново-иридиевого сплава с двумя штрихами, расстояние между которыми равно размеру метра, и в 1889 году на I Генеральной конференции по мерам и весам его приняли в качестве международного прототипа метра. Было изготовлено 30 эталонов, два из них были доставлены в Россию. Один из эталонов хранится до сих пор во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в Санкт-Петербурге.

Поскольку существующие эталоны хотя и очень мало, но всё же изменяются с течением времени и метр нельзя считать естественной мерой единицы длины, резонно привязать эталон длины к стабильным природным процессам или явлениям.

С развитием точных методов интерферометрических измерений появилась идея выразить метр в длинах световых волн, и в 1927 году VII Генеральная конференция по мерам и весам постановила: 1 метр равен 1 553 164.13 длины волны красной линии кадмия при определённых условиях (температуре, давлении и пр.). В 1960 году XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра: он стал равен 1 650 763.73 длины волны излучения в вакууме, соответствующей оранжевой линии спектра изотопа криптона с атомным весом 86 (86Kr).

Поскольку скорость света является фундаментальной константой, то частота колебаний электромагнитной волны и длина волны неразрывно связаны. Поэтому в 1980-х годах было принято решение о создании единого эталона времени-частоты-длины. В наше время метр определяется как расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды.

4.2.

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Тысячелетиями для измерения времени люди использовали астрономические единицы, то есть время измерялось сутками, солнечными часами. После того как Галилей (1564–1642) создал теорию маятника, а Гюйгенс изобрёл вращающийся балансир, появились маятниковые часы. В XX веке были изобретены кварцевые часы, в которых роль колебаний маятника играют упругие колебания кварцевых пластинок под действием электрического напряжения.

Для установки времени на часах и периодической проверки нужен эталон. Эталон для измерения времени должен быть основан на каком-либо периодическом процессе, период которого постоянен с большой точностью. Первоначально единственным известным процессом такого рода было вращение Земли вокруг своей оси. Единица времени – секунда – определялась как $1/86\,400$ часть периода этого вращения, то есть суток. К середине XX века стало ясно, что точность лучших часов превосходила точность нашего природного эталона времени – суток. Возможности астрономических методов измерения времени оказались исчерпанными.

Принципиально новые и более точные методы измерения времени пришли из радиоспектроскопии и квантовой электроники. Атомы или молекулы избирательно поглощают или излучают кванты электромагнитного излучения определенной частоты, при этом частота этого излучения с большой точностью постоянна.

Это позволило создать квантовые стандарты частоты, а следовательно, и времени (вспомним, что частота – величина, обратная периоду, то есть времени одного колебания) и построить шкалу атомного времени, задаваемую конкретным атомным или молекулярным эталоном.

Атомная секунда – промежуток времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 (^{133}Cs). Другими словами, за атомную секунду совершается число периодов колебаний цезиевого генератора, равное его частоте, составляющей 9 192 631 770 Гц (~ 9.2 ГГц). Стабильность этой частоты очень высока (то есть относительная нестабильность $\Delta f/f$, где Δf – уход частоты, очень мала). Кроме цезиевого, в качестве стандартов частоты используют также рубидиевый и водородный генераторы (последний наиболее стабилен, см. табл. 4.1).

Таблица 4.1

Генераторы, используемые в качестве стандартов частоты

Тип генератора	Рабочая частота, Гц	Нестабильность частоты	Соответствующий уход часов
Рубидиевый $^{87}\text{Rubidium}$	6 834 682 610.904 324	$5 \cdot 10^{-12}$	0.15 с за 1000 лет
Цезиевый $^{133}\text{Caesium}$	9 192 631 770	$3 \cdot 10^{-13}$	0.01 с за 1000 лет
Водородный $^1\text{Hydrogen}$	1 420 405 751.77	$1 \cdot 10^{-14}$	0.2 с за 1000000 лет
Стронциевый $^{87}\text{Strontium}$	429 228 004 229 873.4	10^{-17}	

Для того чтобы синхронизировать кварцевые часы с атомными часами или с другими эталонами времени, надо осуществлять переход эталонной частоты в другой диапазон, то есть умножать или делить частоту на некоторые целочисленные значения. Для этой цели используется радиооптический частотный мост (РОЧМ), в котором при помощи многозвенной цепочки различных СВЧ-генераторов и промежуточных лазеров субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов выполняется последовательное умножение эталонной частоты 5 МГц до значений 1014 Гц.

4.3. ЕДИНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ ВРЕМЕНИ-ЧАСТОТЫ-ДЛИНЫ

До 70-х годов единые мировые эталоны времени и длины были независимы. Эталон длины был определен следующим образом: метр равен длине 1650 763.73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p^{10}$ и $5d^5$ атома криптона-86.

Согласно теории относительности, скорость света в вакууме считается мировой константой, и поэтому время, частота и длина связаны между собой и могут быть пересчитаны с использованием константы c . Поскольку скорость связывает расстояние и время, это позволило дать новое определение метра – через единицу времени.

В 1983 году на XVII Генеральной конференции по мерам и весам постановили: «Метр – это расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды». Это определение полностью отменило криптоновый эталон длины и вообще сделало метр не зависящим от какого-либо источника света.

С развитием метрологической техники повышается точность эталонов и удобство их использования. Первое поколение атомных часов работало на радиочастотах. При использовании более высоких частот атомных колебаний повышается точность часов и уменьшается время, необходимое для проведения измерения. Для синхронизации цезиевых часов с частотой колебаний порядка 10^{10} с точностью до 10^{-15} требуется несколько дней, тогда как оптические часы с частотой колебаний 10^{15} синхронизируются с той же точностью за несколько секунд.

В настоящее время наибольшая точность часов, на два порядка превышающая цезиевые атомные часы, достигнута на основе оптических переходов в изотопах стронция ^{87}Sr и ^{88}Sr (рис. 4.14).



Рис. 4.14
Стронциевые часы

В перекрестье шести лазерных лучей образуется оптическая ловушка, удерживающая ионы стронция, которые излучают на частоте 429 терагерц (красный свет) (см. также гл. 22.4 «Лазерное охлаждение атомов»).

Задача синхронизации часов оптического диапазона и часов радиодиапазона в недавнем времени решалась с помощью каскадных преобразований частоты на основе нескольких газовых лазеров с разной частотой генерации. Для таких часов требовалось большое помещение. В 2000-х годах был предложен метод «оптических гребенок», получаемых с помощью фемтосекундных лазеров и фотоннокристаллического волокна, который позволил синхронизировать часы с помощью компактной настольной установки.

Первые атомные часы занимали размер комнаты, теперь часы со сходными характеристиками точности имеют габариты не больше персонального компьютера.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

4.1. Создание эталонов, которые по своей точности соответствуют потребностям современной техники, стало возможным благодаря использованию оптических технологий.

4.2. По мере роста научных знаний стало понятно, что время, расстояние, энергия неразрывно связаны, и это привело к созданию единого эталона длины, времени и частоты.

4.3. Дальнейшее повышение точности эталонов связано с переходом к новым оптическим стандартам с использованием более высоких частот колебаний, охлаждению атомов эталона до сверхнизких температур посредством лазерного охлаждения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 4

4.1. Почему возникла необходимость перехода от материального эталона длины к оптическому?

4.2. За счет чего достигается стабильность атомных часов?

4.3. Дайте описание принципа лазерного охлаждения атомов.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 4

4.1. Котюк А.Ф., Степанов Б.М. Измерение спектрально-частотных и корреляционных параметров и характеристик лазерного излучения. М.: Радио и связь, 1982 г.

4.2. Балыкин В.И. Атомная оптика и ее приложения, Вестник РАН, 2011, том 81, № 4, с. 291–315.

4.3. Глобальные горизонты /Развитие глобальной науки и технологий/, Итоговый доклад ВВС США, Релиз SAF/PA №2013-0434, Перевод с английского НПП «Лазерные системы», 2013.

4.4. Poli N., Oates C.W., Gill P., Tino G.M. Optical atomic clocks. Nuovo Cimento. 2013, pp. 555-624.

ЧАСТЬ II

ЛАЗЕРЫ

В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А. А. Ким, Л. Б. Кочин, А. В. Чугреев

ВВЕДЕНИЕ К ЧАСТИ II

Развитие лазерной техники, совершенствование полупроводниковых технологий, создание оптоволокна с низкими потерями – все вместе это способствовало возникновению и развитию новой области – оптоинформатики.

Изобретение первого лазера в 1960 г. открыло дорогу в мир генераторов стабильных электромагнитных колебаний с частотами, которые недостижимы для электроники. В то время как современные стандартизированные для связи радиочастоты достигают величины нескольких единиц-десятков гигагерц, лазерные источники, работающие в инфракрасном и видимом диапазоне, имеют частоту излучения в несколько сотен терагерц.

Свет, являясь высокочастотной электромагнитной волной, способен распространяться в диэлектрических средах при условии их оптической прозрачности. Важной особенностью света является тот факт, что он, в отличие от микроволнового излучения, может быть собран в луч с очень узкой диаграммой направленности и распространяться с малой угловой расходимостью. Эта особенность позволяет значительно сократить энергетические потери на передачу и прием сигнала и обеспечивает практическую помехозащищенность и скрытность канала связи.

Эпоха бурного роста оптоволоконной передачи данных началась с 80-х годов XX века, и теперь оптоволоконные сети окутали весь земной шар. Информация посредством лучей света может передаваться в свободном пространстве: в вакууме, в воздухе или в воде, в области прозрачности среды.

Ученые, давшие миру эти открытия, были отмечены Нобелевскими премиями. Это А.М. Прохоров, Н.Г. Басов и Ч. Таунс, реализовавшие явление стимулированного излучения, на основе чего был создан первый лазер. В 2000 г. премия была вручена Ж.И. Алферову и Г. Кримеру за создание гетероструктурных полупроводниковых лазеров, ставших основой оптоэлектроники. В 2009 г. в числе лауреатов нобелевской премии в области физики премию получил Чарльз Као за «разработки в области передачи данных по волоконно-оптическим линиям».

Можно с уверенностью сказать, что появление лазера как источника оптического сигнала и оптоволокна как среды передачи во многом предопределило ход технического прогресса и глобальной информатизации человечества.

ГЛАВА 5

ОПТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ

5.1.

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Передача информации на большие расстояния в оптическом диапазоне имеет ряд преимуществ, и главное среди них – огромная полоса пропускания светового канала, то есть возможность передавать данные с очень высокой скоростью.

Пропускная способность линии связи напрямую связана с частотой несущего сигнала, то есть частотой электромагнитной волны, которая используется для передачи информации. Чем больше частота несущей, тем выше может быть пропускная способность линии и скорость передачи информации. Поэтому скорость передачи данных в оптическом диапазоне по лазерному лучу или по оптоволокну на много порядков выше, чем по радиоканалам и по электрическим проводам. Например, в спектральном диапазоне от 1.3 до 1.6 мкм (это основные диапазоны для передачи данных по оптоволокну) частота колебаний несущей волны составляет сотни терагерц, тогда как частоты несущих в радиосвязи или электрических соединениях не превышают десятков гигагерц.

5.1.1.

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ СИГНАЛА НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

С момента изобретения радиосвязи и до сегодняшнего дня частота несущего сигнала неизменно повышалась. Потребность в передаче все больших объемов данных требовала организации более высокоскоростных каналов связи, которые, в свою очередь, должны были использовать более высокие частоты несущих. Вне зависимости от того, какой сигнал передается – аналоговый или цифровой, именно частота несущей определяет максимально возможную скорость передачи.

Рассматривая простейшую цифровую передачу данных в бинарном коде, очевидно, что один передаваемый символ должен содержать в себе не менее одной полуволны несущего сигнала. Следовательно, чем выше частота несущей, тем короче по времени может быть каждый передаваемый символ и, следовательно, тем больше символов можно передать за единицу времени.

Несмотря на то, что в реальности один передаваемый символ содержит в себе гораздо больше периодов волн несущей, общее правило остается неизменным: чем выше частота, тем короче по времени каждый передаваемый символ и тем выше скорость передачи.

Исходный сигнал для передачи данных создается высокочастотными электронными схемами. Увеличение частоты несущего сигнала традиционными средствами полупроводниковой электроники возможно лишь до определенного предела, который, к сожалению, является фундаментальным ограничением: *p-n*-переход не может работать на частотах выше определенного уровня – электроны и дырки не успевают рекомбинировать. Самый быстрый современный полупроводниковый транзистор может работать на частотах около 1 ТГц, но при этом требует охлаждения до 4.7 К и работает исключительно в лабораторных условиях.

Внутри компьютерных чипов и для передачи данных внутри приборов используются электрические соединения. Проблемы электроники начинаются при передаче электрического сигнала на расстояние. Если используются электрические провода, то искажения формы сигнала и потери в них растут с ростом частоты. Электрические провода для передачи высокочастотного сигнала весьма дороги. При увеличении расстояния падает скорость передачи данных. Скорость связи между двумя устройствами всегда меньше, чем скорость передачи данных по внутренним шинам компьютера.

Если используется радиоканал, то скорость передачи данных ограничена несущей частотой. Высокочастотный радиосигнал имеет особенности, усложняющие работу с ним: сложность генерации стабильной высокочастотной несущей большой мощности, большие потери в коаксиальных кабелях и на соединениях, трудности согласования и стыковки волноводов и множество других препятствий.

При использовании оптического канала связи электрический сигнал преобразуется в оптический, передается с использованием оптических усилителей без искажений на большое расстояние и затем опять конвертируется в электрический.

Системы связи на открытой оптике предъявляют гораздо более высокие требования к точности наведения и слежения приемопередающих антенн (объективов источника и приемника) и могут работать лишь в условиях прямой видимости приемопередатчиков.

5.2. ЛИНИИ СВЯЗИ С ОТКРЫТОЙ ОПТИКОЙ

Существует ряд применений беспроводной оптической связи: для связи в космосе, а также наземных линиях связи, где прокладка оптоволоконна экономически менее выгодна, чем организация оптического моста.

Оптическая передача сигнала уже несколько десятилетий используется в пультах дистанционного управления бытовой техникой, но при этом объем передаваемой информации ничтожно мал.

Беспроводные линии связи могут работать исключительно в пределах прямой видимости. Они предъявляют высокие требования к угловой расходимости передающего лазерного луча и точности наведения. Имеются и ограничения по используемой длине волны света, связанные с прозрачностью той или иной среды. Несмотря на эти недостатки, отсутствие необходимости в организации особой среды передачи делает эти линии связи весьма распространенными, но в достаточно узких областях.

На рис. 5.1 представлена блок-схема построения линии связи на открытой оптике.

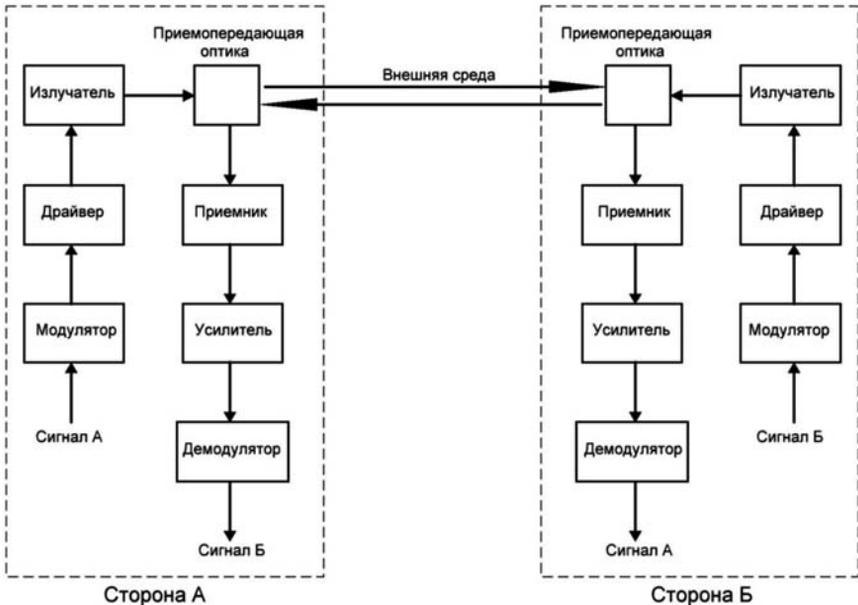


Рис. 5.1

Блок-схема построения линии связи на открытой оптике

5.2.1. НАЗЕМНЫЕ (АТМОСФЕРНЫЕ) ОПТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ

Наиболее распространенной разновидностью оптической связи на открытой оптике является атмосферная (воздушная) связь (АОЛС или FSO) наземного базирования. На практике такая связь, как правило, осуществляется с помощью лазерного излучения, хотя передачу данных с низкой скоростью на короткие расстояния можно осуществить и с помощью светодиодов. Максимальная дальность для наземных линий обычно не превышает 3–4 км, хотя бывают и исключения. Скорость передачи данных с помощью открытой оптики достигает 10 Гбит/с для некоторых коммерчески реализуемых моделей наземных линий связи.

Стабильность и качество связи сильно зависит от атмосферных факторов, таких как дождь, туман, пыль и температура. Погодные факторы приводят к тому, что расчет линий связи зачастую становится нетривиальной задачей, требующей сбора и учета погодной статистики за длительные промежутки времени. В отношении АОЛС принято говорить о доступности линии связи, выражаемой в процентах или десятичной дроби. Так, доступность линии связи 0.99 означает, что в течение года линия может быть недоступна из-за метеоусловий не более 1% времени. Этот параметр определяется для конкретной климатической и географической зоны. В системе связи на основе АОЛС обязательно присутствует резервный канал связи, работающий в радиодиапазоне. Поскольку плохие метеоусловия (дождь, снег, туман) существенно не препятствуют прохождению радиоволн, в случае недоступности оптического канала сохраняется возможность передачи данных по радиоканалу, хоть и на существенно меньшей скорости.

Предпочтительными длинами волн для оптической связи с открытой оптикой являются 0.85 мкм и 1.55 мкм. Диапазоны 3–5 мкм и 8–14 мкм также могут быть использованы благодаря их отличным характеристикам прозрачности атмосферы. Выбор оптимальной длины волны для связи с открытой оптикой является компромиссом между доступностью элементной базы, безопасностью для глаз и большой дальностью передачи.

Диапазоны 3...5 и 8...14 мкм на практике почти не используются, так как для них отсутствуют доступные и надежные источники излучения и средства модуляции сигнала. Фотоприемники для этих диапазонов требуют охлаждения для снижения уровня шума.

Длина волны 1550 нм лежит в безопасном для глаз диапазоне, поэтому мощность передатчика может быть на много порядков выше, чем при использовании спектрального диапазона 850 нм. Но излучатели и фотоприемники для диапазона 1550 нм дороже, поэтому на малых дистанциях и при малых мощностях передачи данных их использование экономически выгоднее.

Атмосферные линии связи чаще всего устанавливаются на крышах домов или на других высоких строениях. Их неоспоримым преимуществом перед традиционными кабельными или радиочастотными системами передачи информации является простота установки и минимум подготовительных мероприятий. Не требуется трудоемкое и бюрократически сложное одобрение у регулирующих органов, поскольку частоты света не попадают в диапазон сертифицируемых радиоволн и, соответственно, не требуют согласования. С другой стороны, как уже упоминалось, АОЛС сильно зависят от погодных условий.

На рис. 5.2 представлены отечественные атмосферные системы связи производства ЗАО «Мостком».

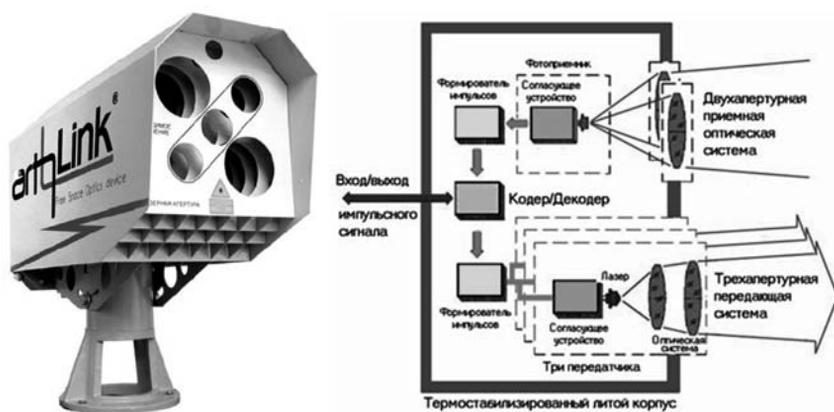


Рис. 5.2

АОЛС Artolink производства ЗАО «Мостком»

К беспроводным линиям связи относится также разрабатываемая технология передачи данных *Li-Fi* (*лай-фай*), аналог *Wi-Fi*, только в оптическом диапазоне. Скорость передачи данных по *Wi-Fi* уже достигла своего теоретического предела (600 Мбит/с, а при большом количестве пользователей реальная скорость *Wi-Fi* не превышает 50 Мбит/с), несмотря на высокую несущую частоту в 2.4...5 ГГц. При подключении большого количества пользователей скорость уменьшается. В 2011 году был изобретен *Li-Fi*: вместо привычных радиочастот в *Li-Fi* для беспроводной передачи данных используется свет светодиодов. Связь через видимый свет (VLC) использует сверхскоростные импульсы света для передачи информации. Мерцание светодиодов на высоких частотах остается незаметным для человеческих глаз и безопасно.

Li-Fi является быстрой и дешевой версией Wi-Fi, которая работает в видимом диапазоне длин волн. Передача данных с использованием видимого света осуществляется в диапазоне от 400 ТГц (780 нм) до 800 ТГц (350 нм) – одновременно используя в качестве оптического носителя данных и для освещения помещения. Видимый свет не вреден для зрения. Типичный пример организации сети Li-Fi показан на рис. 5.3.

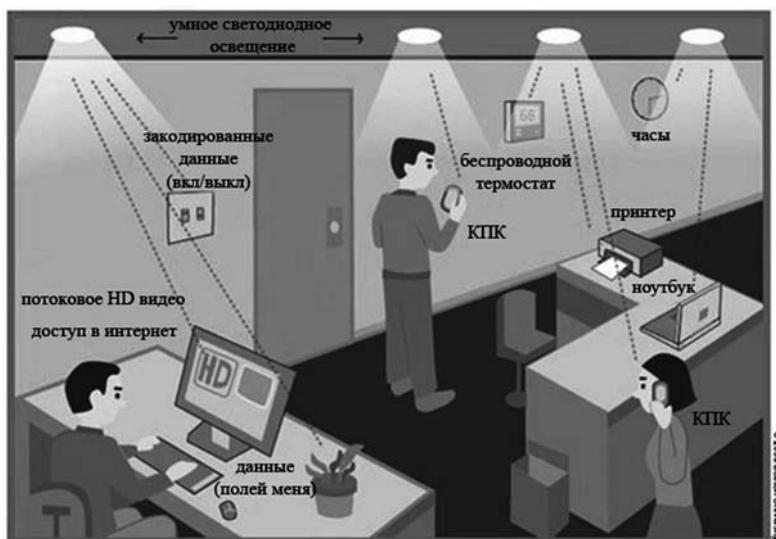


Рис. 5.3

Иллюстрация принципа работы сетей Li-Fi

Нисходящий информационный поток передается с помощью света на устройства пользователей, в то время как менее скоростной восходящий поток может быть транслирован по радиоканалу. То есть телефон или другое устройство не передает информацию в оптическом диапазоне и не мешает этим пользователю. При освобождении радиочастот от нисходящих потоков возможно значительное увеличение скорости передачи информации в восходящих потоках от абонентов. Следует отметить, однако, что данная концепция сегодня лишь приближается к коммерческой реализации.

Преимущества Li-Fi:

- Высокая скорость передачи данных, 500 Мбит/с или 30 Гбайт/мин.
- Li-Fi решает вопрос с нехваткой пропускной способности радиочастот.
- Возможно использование в медицинских устройствах и больницах, где использование Bluetooth и Wi-Fi может быть ограничено.
- В мире для освещения используется 19 млрд лампочек. Если хотя бы часть из них заменить светодиодными лампами, предназначенными для поддержания

сети Li-Fi, то можно обеспечить широкополосный доступ в интернет практически везде.

– Информационная безопасность – еще одно важное преимущество, т. к. свет не проникает сквозь стены.

5.2.2.

КОСМИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВЯЗЬ

Надатмосферные (космические) линии связи могут быть организованы на большие расстояния, поскольку в вакууме отсутствуют потери на рассеяние и поглощение. В таких условиях первостепенной задачей становится обеспечение точного наведения и малой угловой расходимости излучения.

В космическом пространстве дальность оптической связи с открытой оптикой в настоящее время составляет порядка несколько тысяч километров. Дальность может быть увеличена до межпланетных расстояний в миллионы километров при помощи мощных оптических телескопов.

Рекорд дальности для двусторонней связи был установлен лазерным высотомером Mercury, находящимся на борту Messenger (космический зонд для исследования поверхности Меркурия). Прибор был построен на основе неодимового ИК лазера с диодной накачкой, с основной задачей использования в лазерном высотомере для орбитальной миссии на Меркурий.

Этот прибор установил рекорд дальности двусторонней связи на расстоянии 24 млн км, когда аппарат приблизился к Земле в мае 2005 г.

Впервые лазерная связь в космосе между двумя космическими аппаратами была осуществлена 21 ноября 2002 года. Европейский спутник дистанционного зондирования Земли SPOT 4, находящийся на орбите высотой 832 км, установил контакт с экспериментальным космическим аппаратом Artemis, обращающимся на высоте 31 000 км и передал снимки земной поверхности.

В настоящее время существуют системы лазерной связи между спутниками на высоких (геостационарных) орбитах и низкоорбитальными аппаратами. Разработки в этой области продолжают вестись как отечественными, так и зарубежными учеными.



Рис. 5.4

Терминал лазерной связи
Земля – МКС (Международная
космическая станция)

Оптический канал связи «Космос–Земля» налажен и российскими специалистами. В 2012 году с российского сегмента Международной космической станции впервые по лазерному каналу была передана широкополосная информация на наземный пункт на лазерный терминал (рис. 5.4) наземного пункта станции оптических наблюдений «Архыз» на Северном Кавказе. (Из новостей Федерального космического агентства). Была достигнута скорость передачи 125 Мбит/с.

В 2014 году с помощью системы LLCD (НАСА) состоялся сеанс лазерной связи Земля–Луна на рекордной скорости в 622 Мбит/с. Для расстояний более 380 000 км это очень высокий показатель. Такая скорость может обеспечить передачу с научных аппаратов огромного количества информации. Прежде всего, удастся увеличить разрешение фотокамер аппаратов и вести передачу 3D-изображений из самых удаленных уголков Солнечной системы.

5.2.3.

ПОДВОДНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

В военной среде существуют проекты и проводятся эксперименты по развитию оптических каналов связи «спутник – подводная лодка». Актуальность таких военных систем связи объясняется тем, что данный способ связи позволит передавать информацию по недоступным для радиоперехвата оптическим каналам, при этом не требуется всплытия подводной лодки для передачи и приема сигнала. Передача может быть осуществлена со спутника напрямую через атмосферу и водную среду на глубину порядка 10–20 метров.

Сложность таких систем заключается в необходимости учета большого количества факторов, каждый из которых может стать преобладающим в тех или иных условиях. Область применения также является весьма ограниченной, поскольку говорить о надежной и постоянной связи не приходится – слишком велика зависимость от метеоусловий (облачность, турбулентность атмосферы, ее прозрачность) и прозрачности, волнения и турбулентности воды. Тем не менее, преимущество скрытности и невозможности перехвата сообщения делают такие военные разработки востребованными, пусть и с большими эксплуатационными ограничениями.

Связь с автономными подводными аппаратами с помощью радиосигнала является сложной нетривиальной задачей и вызывает большие затруднения, поскольку короткие радиоволны в водной среде очень быстро затухают, а длинные и сверхдлинные радиоволны, которые сейчас используются для связи с подводными лодками, не могут быть применены для двусторонней передачи данных со сколь-нибудь ощутимой скоростью. Используемые в настоящее время сверхдлинноволновые радиосистемы обеспечивают лишь передачу в одностороннем порядке простейших команд на крайне низких скоростях.

Существует принципиальная возможность организации связи с помощью систем оптического диапазона, функционирующих в водной среде. Разработки в области подводных коммуникаций на открытой оптике уже ведутся как зарубежными, так и отечественными командами ученых.

Вода имеет максимум прозрачности в сине-зеленой области видимого спектра, в то время как для ближнего инфракрасного и ультрафиолетового света затухание значителен. Это приводит к тому, что пригодной для связи становится лишь весьма узкая полоса видимого спектра. Для подводной связи используется видимый спектральный диапазон, в области синих и зеленых волн (500–550 нм) (см. параграф 2.3.2).

Относительная простота получения второй гармоники Nd:YAG-лазера на 532 нм с достаточно высокой оптической мощностью позволяет организовать подводную связь на открытой оптике с использованием указанного лазера. Несмотря на принципиальную возможность организации подводной лазерной связи, практические реализации имеют крайне ограниченную область применения.

Сказывается множество факторов: состав и загрязненность воды, мутность, турбулентные завихрения, температурные неоднородности, искажения сигнала, вызванные дисперсионными свойствами воды, резонансные взаимодействия лазерного излучения с водной органикой и многие другие. В реальных условиях дальность связи может быть обеспечена на расстояния от нескольких метров мутной воде до 100–200 метров в самой прозрачной неподвижной воде.

Согласно оценке, если в качестве излучателя в системе связи использовать источник с максимумом излучения в районе 530 нм, соответствующим наименьшему поглощению света в морской воде, то ослабление мощности сигнала составит около 75 дБ для дистанции порядка сотни метров. При мощности источника 50 мВт уровень сигнала на приемнике в этом случае будет находиться в диапазоне, достаточном для достоверной расшифровки информации.

Оптический канал связи может обеспечить не только передачу изображений в реальном времени одновременно с нескольких видеокамер для наблюдения динамичных видеосюжетов, но и обмен управляющими сигналами и вспомогательной информацией. Он позволит расширить функциональные возможности подводных аппаратов при их взаимодействии посредством приема-передачи видеосигналов и сигналов управления по лазерному лучу.

При этом, во-первых, можно будет отказаться от управления необитаемыми подводными аппаратами (НПА) по кабелю и, во-вторых, добиться передачи большого потока информации (например, вести видеотрансляцию или передавать фотографии большой четкости) на дальностях в несколько десятков метров, а при использовании ретрансляторов и более. При этом в перспективе пропускная способность лазерного канала связи может быть увеличена до 1 Гбит/с.

Существуют проекты подводных систем связи, использующих локальный массив ретрансляторных необитаемых подводных аппаратов, обеспечивающих оптическую связь с подводными лодками и другими аппаратами в прямой видимости на небольших территориях (рис. 5.5 – 5.7).

Подобные системы могут найти применение в исследовательской деятельности, океанографии, картографировании донной поверхности, при прокладке подводных коммуникаций, в составе аварийно-спасательных систем и комплексов, а также в разведывательных и военных целях.



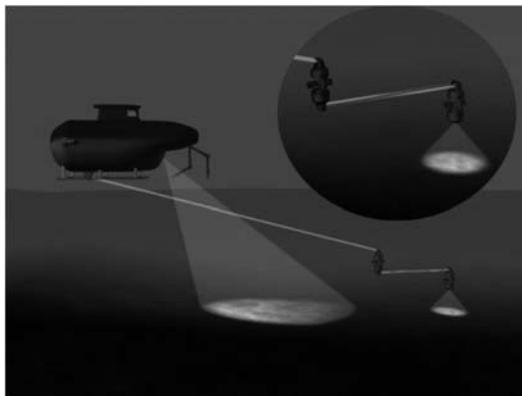
Рис. 5.5

Использование оптических систем связи на необитаемых (автономных) подводных аппаратах для наблюдения за объектами инфраструктуры



Рис. 5.6

Передача оптического сигнала между подводными аппаратами

**Рис. 5.7**

Построение информационной системы подводной связи с использованием автономных ретрансляторов

5.3.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

С появлением и развитием волоконной оптики вопрос организации высокоскоростных линий связи традиционными методами кабельной канализации обрел свое решение. В настоящее время именно оптоволоконная кабельная инфраструктура по всему миру является основой глобальной телекоммуникационной системы.

В волоконно-оптической связи роль передающей среды играет оптическое волокно, по которому распространяются световые сигналы. В отличие от открытых систем передачи, где среда не обладает направляющими свойствами, оптоволокну для света подобно коаксиальному кабелю для высокочастотных электрических сигналов – оно ограничивает распространение света по двум осям и способно изменять его направление движения по третьей. Современные волокна, обладающие крайне низким затуханием для оптического сигнала, позволяют организовывать линии связи протяженностью от нескольких метров до многих сотен и тысяч километров, при этом скорости передачи могут достигать десятков и сотен терабит в секунду.

Особое преимущество оптоволоконной связи на протяженных линиях дает возможность усиления светового сигнала без преобразования в электрический сигнал и обратно (регенерации). Эта особенность является чрезвычайно актуальной и востребованной при построении линий связи большой протяженности.

5.3.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В основе работы большинства оптических волокон лежит явление полного внутреннего отражения (ПВО). Если свет распространяется в более плотной оптической среде (стекле), то при некотором остром угле падения свет не выходит наружу, а полностью отражается обратно (рис. 5.8). Если поверхность идеально гладкая, то коэффициент отражения на границе двух сред при этом приближается к 100%. Для сравнения, от обычного алюминиевого зеркала отражается менее 95% падающего на него света, и уже после нескольких десятков отражений останется менее 1% исходного сигнала.

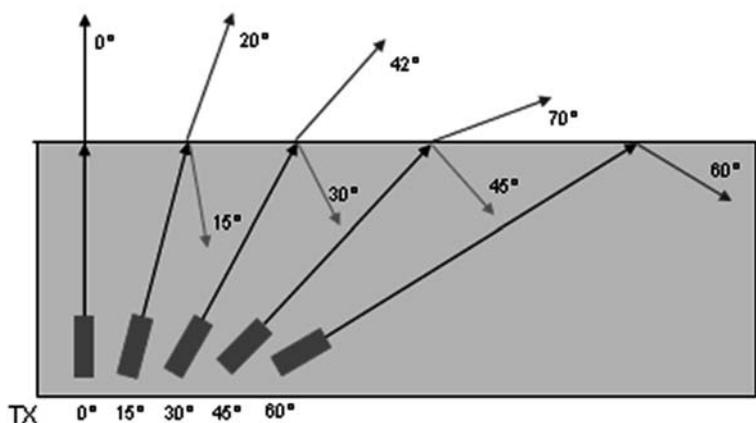


Рис. 5.8

Отражение света на границе двух сред. Критический угол полного внутреннего отражения (все углы отложены от нормали)

По закону Снеллиуса, предельный угол падения света, при котором будет наблюдаться полное внутреннее отражение, может быть определен по формуле

$$\theta_c = \arcsin(n_2/n_1), \quad (5.1)$$

где n_2 – показатель преломления менее плотной оптической среды, n_1 – показатель преломления менее плотной среды.

Если взять длинный стеклянный брусок и направить в него луч лазера под острым углом к длинной стороне, то после многократных отражений свет выйдет с противоположной стороны (рис. 5.9).

Если направить свет в тонкую пластиковую или стеклянную нить, то свет будет распространяться по ней, повторяя все изгибы. Пластиковые световоды часто

используются в декоративной подсветке и в коротких оптоволоконных соединениях, например для передачи сигнала между модулями акустических систем (рис. 5.10).

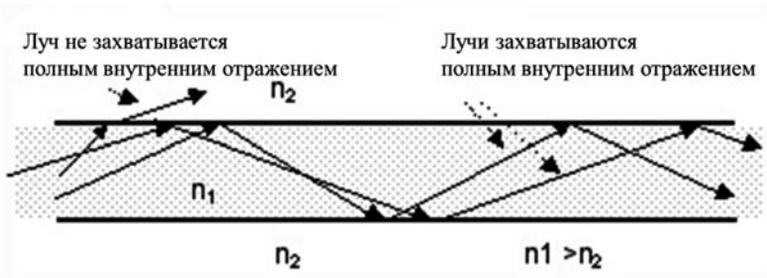


Рис. 5.9

Демонстрация явления полного внутреннего отражения в прямоугольной стеклянной призме на границе раздела стекло–воздух



а



б

Рис. 5.10

Оптоволокну для передачи сигналов в акустических системах (а) и в декоративном освещении (б)

Для передачи информации на большие расстояния такое волокно не годится. На поверхности стеклянной нити обязательно образуются царапины, загрязнения, и принцип полного внутреннего отражения нарушится. Дело в том, что при отражении от раздела двух сред и при полном внутреннем отражении поле электромагнитной волны проникает на небольшую глубину через границу раздела, а не отражается строго на поверхности.

Характерная глубина проникновения неоднородной волны во вторую среду порядка длины волны. Поэтому если на поверхности стекла есть загрязнения, то свет будет частично поглощаться в них. Это приводит к возрастанию потерь и потерям сигнала в волокне.

Поэтому оптоволокно для передачи данных изготавливают из прозрачных материалов с разным коэффициентом преломления, и отражение света происходит на внутренней границе волокна, где есть разница коэффициентов преломления (рис. 5.11).

В случае оптических световодов роль светонесущей сердцевины выполняет прозрачный материал с большим показателем преломления, а в качестве отражающей подложки (или оболочки) используется материал с меньшим показателем преломления. В этом случае свет будет распространяться вдоль оси световода, не выходя на поверхность волокна, конечно, в случае соблюдения условия ПВО для всех участков световода.

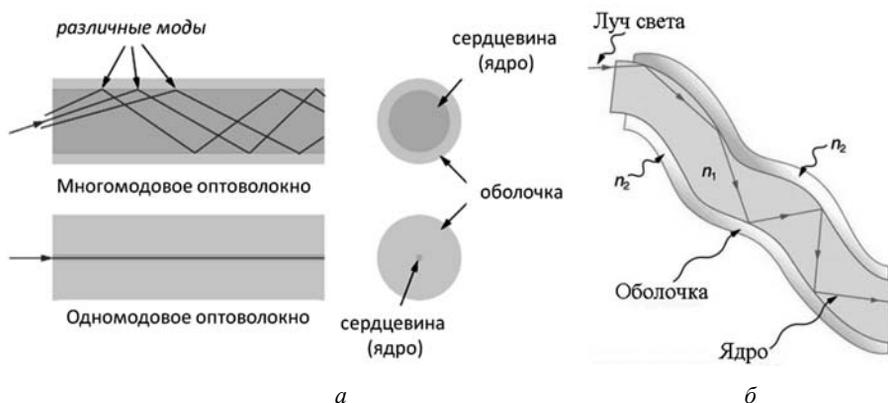


Рис. 5.11

Сечение оптоволокна (а)

и распространение света в оптоволокне за счет отражения на внутренней границе (б)

На практике это означает, что оптический волновод нельзя изгибать меньше определенного радиуса, поскольку в месте изгиба часть света будет излучаться наружу, что приведет к потерям световой энергии.

Оптические световоды изготавливают из прозрачных материалов, при этом при выборе материала стремятся обеспечить минимальный коэффициент затухания для используемой длины волны света. Наиболее распространенными материалами являются кварцевые и фосфатные стекла, а также различные виды прозрачных полимеров. Разность показателей преломления обычно обеспечивается легированием сердцевины световода присадками, увеличивающими коэффициент преломления вещества.

Световоды по режиму их работы принято классифицировать на одномодовые и многомодовые. В ограниченном пространстве световода, когда его размеры сравнимы с длиной волны света, световой луч, распространяющийся в этом пространстве, распадается на несколько дискретных пространственных структур, которые и называются световыми модами.

Световая мода – это стоячая световая волна, возникшая в поперечном сечении световода. Моды – это устойчивые дискретные пространственно-энергетические структуры распределения электромагнитного поля световой волны, обусловленные возникновением интерференции на отражениях света от стенок световода. При уменьшении размеров светонесущей сердцевины можно добиться одномодового режима работы световода. При этом стоячая волна в нем имеет только одну пучность.

В толстых волокнах, размеры сердцевины которых значительно превышают длину волны света, количество мод очень велико. Такие волокна называются обыкновенными световодами, к ним можно с некоторой оговоркой применять законы лучевой оптики. Световоды с относительно малым числом мод, а также одномодовые принято называть волноводами, а при их расчетах необходимо учитывать волновые свойства света. Оптические волноводы являются аналогами коаксиальных кабелей для света.

5.3.2.

ДИСПЕРСИЯ И ЗАТУХАНИЕ, ТИПЫ ОПТИЧЕСКИ ВОЛОКОН

Принципиально существуют два основных механизма, ограничивающих скорость и дальность передачи информации по волокну: дисперсия и затухание.

На схеме на рис. 5.12 представлены различные виды дисперсии. Рассмотрим подробнее наиболее важные из них. Понятие моды в волноводе тесно связано с таким важным явлением, как модовая или межмодовая дисперсия. Это явление, присущее только многомодовым световодам, является одним из основных механизмов, ограничивающих скорость и дальность передачи информации.

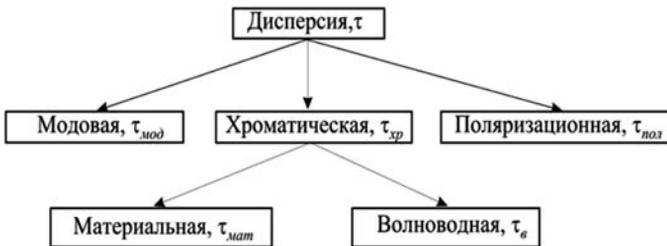


Рис. 5.12
Виды дисперсии

Лазерный импульс сигнала при введении в многомодовый волновод распределяет свою энергию между несколькими модами, которые распространяются под разными углами. Это приводит к тому, что оптические пути всех мод немного отличаются друг от друга, а следовательно, отличаются и времена распространения этих мод в волноводе. Так происходит увеличение длительности импульса и изменение его формы. При слишком большом уширении импульса может произойти перекрытие его соседними импульсами, из-за чего произойдет нарушение передачи сигнала, поскольку фотоприемник не сможет различить их между собой. С межмодовой дисперсией можно бороться, используя многомодовые волокна с градиентным показателем преломления, однако качественно это проблему не решает.

Одномодовые волокна лишены этого недостатка. Сердцевина таких волокон достаточно тонка для того, чтобы в ней могло распространяться больше, чем одна световая мода. Современные линии связи с протяженностью более нескольких сотен метров всегда строятся на одномодовых волокнах.

Различные типы многомодовых и одномодовых волокон, а также механизм возникновения модовой дисперсии показаны на рис. 5.13. На рис. 5.14 представлены конструкции некоторых стандартных кварцевых волокон.

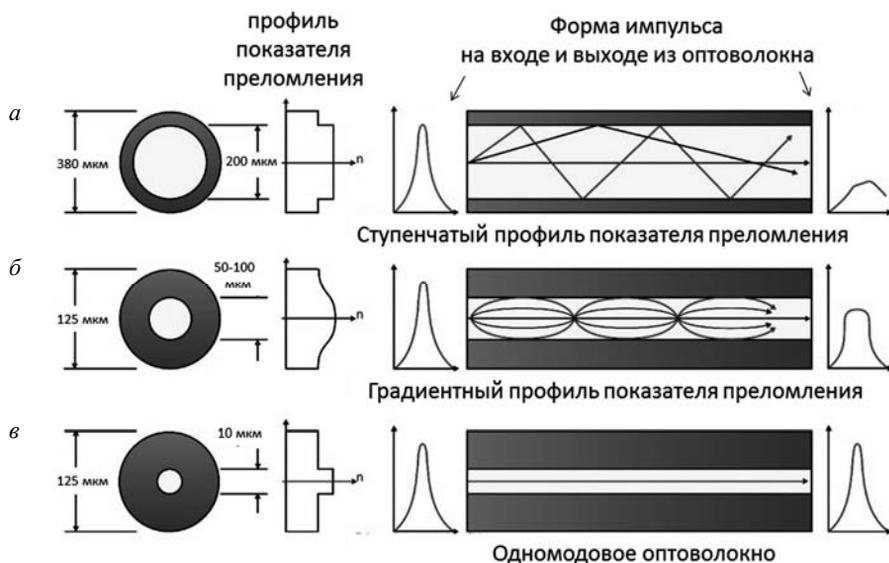


Рис. 5.13

Типы оптических волокон и механизм межмодовой дисперсии:

а – многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления;

б – многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления;

в – одномодовое волокно

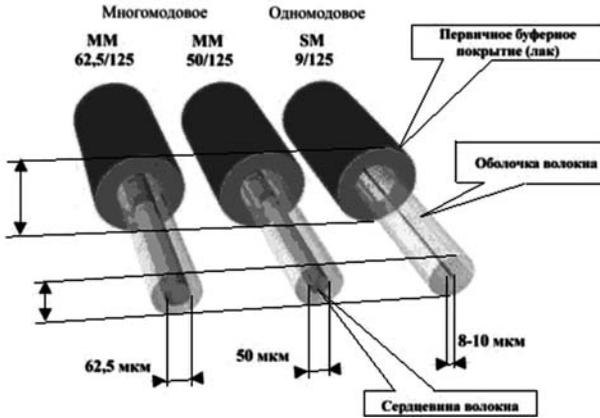


Рис. 5.14

Конструкция наиболее распространенных оптических волокон, применяемых в телекоммуникациях

Для многомодового волокна именно явление модовой дисперсии является основным ограничением в скорости и дальности передачи. Переход к одномодовым волокнам позволил увеличить скорости и дальности передачи на порядки, однако не следует думать, что такой тип волокон никак не влияет на форму сигнальных импульсов. Помимо затухания света, присущего всем волокнам, существуют явления хроматической и поляризационной дисперсии, а также различные нелинейные эффекты, возникающие обычно при достаточно больших плотностях оптической мощности в сечении светонесущей сердцевинки. Учет всех этих явлений необходим при проектировании и расчете линий связи, однако наибольший вклад вносит хроматическая дисперсия.

Кварцевое стекло, из которого изготавливаются телекоммуникационные волокна, обладает ненулевой хроматической дисперсией в диапазонах длин волн, используемых для связи (за исключением окна 1300–1310 нм, но затухание в нем выше минимально возможных).

Хроматическая дисперсия – это зависимость показателя преломления вещества от длины волны света, для которой мы хотим измерить этот показатель. Чем шире спектр источника излучения, тем сильнее будет расширяться во времени световой импульс при распространении по волокну. Процесс схож с межмодовой дисперсией, однако имеет значительно меньшее влияние на форму сигнала, пренебречь которым на достаточно больших дальностях передачи все же нельзя.

Временное хроматическое дисперсионное уширение можно рассчитать по формуле

$$\tau_{xp} = \Delta\lambda \cdot S_{xp} \cdot L, \tag{5.2}$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника, $S_{\text{хр}}$ – параметр дисперсии волокна, L – длина волокна.

Из формулы (5.2) видно, что величина уширения импульса прямо пропорциональна ширине спектра источника. В отношении хроматической дисперсии качество применяемого лазерного диода является критичным. Однако хроматическая дисперсия будет оказывать свое влияние даже в идеальном случае моночастотного лазерного генератора, поскольку передача информации осуществляется посредством модулирования несущей частоты. Даже в случае, когда несущий сигнал является моночастотным, полезная (сигнальная) модуляция неизбежно расширяет его спектр, что приводит к появлению хроматической дисперсии в системах с чрезвычайно узким спектром источника.

Хроматическая дисперсия в волокне складывается из двух составляющих: материальной и волноводной дисперсии. Если материальная дисперсия всегда положительная, то волноводная может быть как положительной, так и отрицательной.

В стандартном волокне компенсация двух дисперсий наблюдается в районе 1310 нм, т.е. длина волны нулевой дисперсии. Для всех других длин волн результирующий дисперсионный показатель отличен от нуля и достигает величины 18 пс/нм·км для наиболее распространенного диапазона длин волн 1530...1550 нм. На протяженных линиях связи накопленное дисперсионное искажение сигнала сильно ограничивает скорость передачи. Скомпенсировать хроматическую дисперсию можно, применяя волокно с отрицательной дисперсией. Оно позволяет восстановить форму сигнала, искаженного при прохождении линии связи.

Одной из разновидностей дисперсии является поляризационно-модовая дисперсия. Природа возникновения этого явления заключается в том, что свет, распространяющийся в волокне, имеет две составляющие ортогональные поляризации, скорость распространения которых может быть различной. Это явление возникает в том случае, если присутствует некоторая анизотропия в волокне, часто возникающая из-за незначительно осевой асимметрии или эксцентриситета сердцевинки волокна. В большинстве случаев влиянием дисперсии этого вида можно пренебречь, поскольку в современных волокнах величины геометрических отклонений крайне малы.

Поскольку компенсация хроматической дисперсии может быть выполнена без значительного усложнения тракта, для одномодовых волокон основным фактором, ограничивающим дальность передачи, становится затухание излучения. В кварцевых волноводах, чаще всего применяемых в телекоммуникациях, существует диапазон длин волн, для которых затухания минимальны. На рис. 5.15 представлены кривые поглощения света в кварцевом стекле. Совершенствование технологии производства позволило значительно уменьшить затухания в окнах прозрачности и минимизировать пики поглощения.

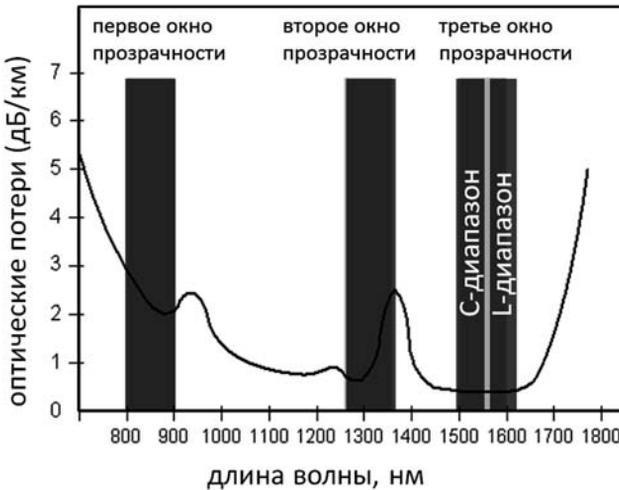


Рис. 5.15

Кривые поглощения в кварцевых волноводах и «окна прозрачности», используемые в телекоммуникациях

Увеличение потерь световой энергии в области коротких волн обусловлено рэлеевским рассеянием, в то время как резкий рост затуханий в области более длинных волн происходит из-за инфракрасного поглощения. Наиболее благоприятной для передачи областью (с наименьшими затуханиями) является диапазон длин волн от 800...850 до 1700 нм. Однако и в этом диапазоне существуют локальные пики поглощения, обусловленные, главным образом, резонансными частотами поглощения молекул воды. На рис. 5.15 указаны три исторически сложившихся оптических диапазона между пиками поглощения, в которых осуществляется оптическая связь: это 850, 1310 и 1550 нм.

С развитием технологий производства оптических кварцевых волокон кривые поглощения видоизменились в сторону уменьшения затуханий. Для современных волокон дифференцирование окон прозрачности по поглощению практически не имеет смысла, поскольку затухания второго окна лишь незначительно превышают потери в третьем окне прозрачности, в то время как первое окно используется лишь в редких случаях и исключительно с многомодовыми волокнами на малых расстояниях.

Не будет ошибкой заявить, что в современных телекоммуникациях одномодовые волокна занимают, условно, 99.9% всего объема и работают в широком диапазоне длин волн с 1260 до 1700 нм (с некоторыми исключениями), в то время как многомодовые волокна используются, главным образом, в качестве оконечных коммутаций для передачи на незначительные расстояния в пределах помещений дата-центров, серверных и т. п. с использованием длины волны 850 нм.

Затухание света в современных волокнах очень мало. Для того чтобы оценить прозрачность современного волокна в зоне наименьших затуханий, придется представить оконное стекло толщиной 12 км. Такое стекло ослабит проходящий свет всего лишь в 2 раза!

При оценке ослабления или усиления какого-либо сигнала, в том числе оптического, удобно пользоваться не прямым отношением величин этих сигналов (или их мощностей), а представлять их отношение в виде десятичного логарифма. В этом случае отношение будет выражаться в децибелах:

$$A = 10 \lg(A_1/A_2) \text{ [дБ]}. \quad (5.3)$$

Переход к логарифмической шкале позволяет значительно упростить расчет уровней сигналов. Это становится понятно, если взять во внимание тот факт, что в отношении передающих или усиливающих сред практически всегда имеет место изменение сигнала во сколько-то раз, а не на какую-то конкретную величину.

Проще всего рассмотреть на конкретном примере: так, свет, пройдя через какую-либо среду, будет ослаблен, например, в 2 раза. Это значит, что если на входе имеется оптическая мощность 1 Вт, то на выходе она составит 0.5 Вт. Но если на входе оптическая мощность была 1 мВт, то на выходе она составит 0.5 мВт. Очевидно, что в обоих случаях свет затухнет в 2 раза, но величины энергетической потери в первом и втором случае вовсе не равны. Аналогичная ситуация и с усилением.

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз увеличивается сигнал, пройдя через усилитель. На практике же измерять сигналы в отношениях абсолютных величин чаще всего неудобно, хотя бы только потому, что часто приходится иметь дело с сигналами, различающимися своей абсолютной величиной на несколько порядков. При переходе к логарифмической шкале децибелов умножение на коэффициент ослабления или усиления заменяется сложением или вычитанием, что значительно упрощает расчеты.

Наиболее востребованным диапазоном длин волн для связи считается участок спектра ~1.5–1.6 мкм, поскольку обладает наименьшими затуханиями, а также совпадает с областью работы эрбиевых и эрбий-иттербиевых волоконных усилителей, которые способны усиливать свет этих длин волн без оптоэлектронного преобразования. Именно эти длины волн используются в высокоскоростных магистральных линиях связи большой протяженности.

5.3.3. ВОЛОКОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

С появлением эрбиевых волоконных усилителей началось бурное развитие магистральных линий связи с большими безрегенерационными участками (рис. 5.16). Такие усилители, в отличие от регенераторов, не производят

оптоэлектронного преобразования, восстановления, ресинхронизации и переизлучения сигнала в волокно (3R-регенерация: Reshaping, Retiming, Reamplification), зато они гораздо дешевле и проще.

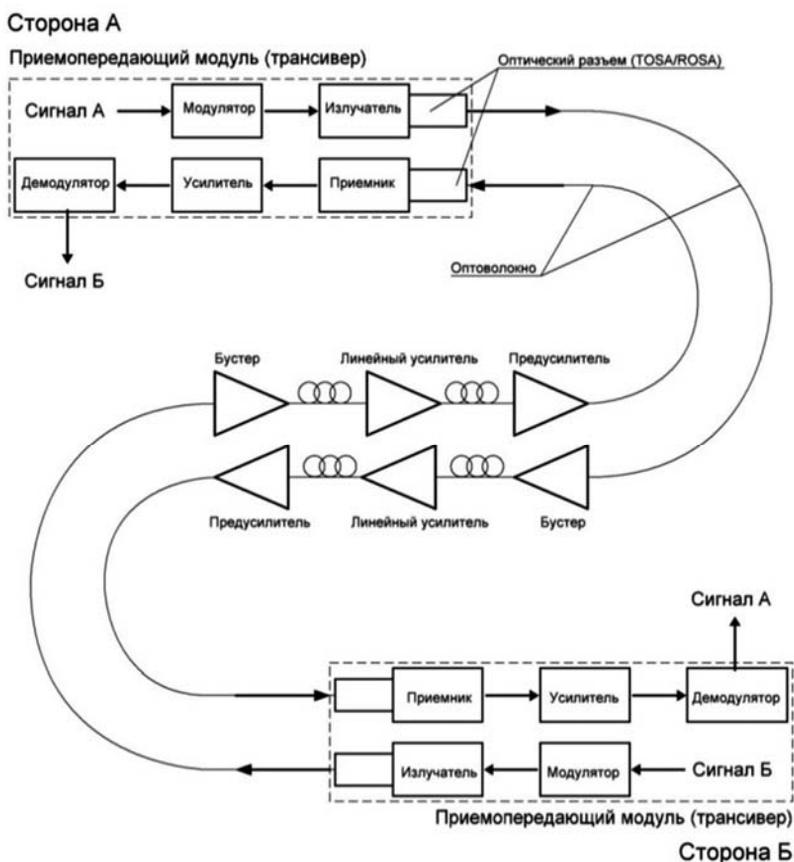


Рис. 5.16

Линия связи с каскадами оптических усилителей

Задача усилителя – увеличить уровень оптического сигнала без изменения его формы, внося как можно меньше искажения и шум. К сожалению, вместе с усилением полезного сигнала происходит возрастание уровня шума и падение SNR – signal-noise ratio, поэтому каскадировать усилители можно ограниченно, до тех пор, пока SNR не упадет ниже допустимого уровня. Зашумление сигнала при усилении не позволяет полностью отказаться от применения регенераторов на участках связи большой протяженности.

В основе работы волоконных усилителей лежит классический принцип лазерной генерации на эрбий-иттербиевых примесях в структуре светонесущей

жила волокна, с той лишь разницей, что, в отличие от обычных лазеров, усилитель лишен резонатора, а усиление осуществляется обычно в один или два прохода.

В активное волокно, сердцевина которого легирована ионами эрбия или эрбия и иттербия, помимо усиливаемого полезного сигнала вводится излучение накачки на 980 или 1490 нм (рис. 5.17). Возбужденные ионы примеси совершают вынужденные излучательные переходы под действием слабого полезного сигнала, усиливая его. Длина активного волокна редко превышает несколько десятков метров. При отсутствии накачки легированное волокно сильно поглощает сигнальное излучение. Усиление его возможно при превышении порогового уровня интенсивности накачки.

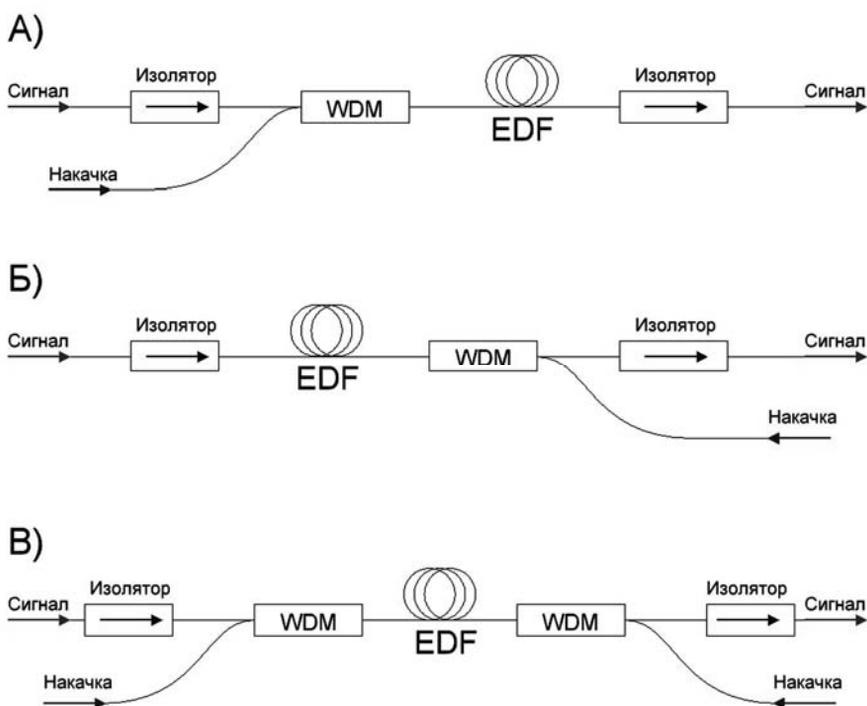


Рис. 5.17

Типичные схемы ввода накачки и сигнала в активное волокно эрбиевого усилителя:
a – сонаправленное; *б* – встречное включение; *в* – двустороннее

Отсюда понятна и природа возникновения шума и уменьшения SNR. Всегда существует некоторое количество возбужденных ионов, которые совершают не вынужденный (под действием сигнальных фотонов), а спонтанный излучательный переход, испуская фотон, не принадлежащий группе фотонов

полезного сигнала. Такой спонтанный фотон, распространяясь по активному волокну, вызывает лавинообразное нарастание количества фотонов, не принадлежащих полезному сигналу, поэтому на выходе из усилителя возникает суперпозиция двух оптических сигналов: усиленного полезного информационного сигнала и спонтанного излучения. Следовательно, соотношение сигнал-шум будет ухудшено тем сильнее, чем больше в выходящем сигнале спонтанного излучения и чем меньше полезного сигнала. Явление спонтанной эмиссии (ASE) является главной причиной ухудшения SNR сигнала.

Помимо эрбиевых и эрбий-иттербиевых усилителей существуют другие разновидности, такие как рамановские (ВКР, на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния) усилители, а также усилители на вынужденном рассеянии Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ). В отличие от традиционных усилителей, в которых происходит усиление лазерного излучения на той же длине волны, эти усилители, как правило, представляют собой распределенную систему, в которой усиление за счет нелинейных оптических эффектов в волокне происходит по всей его длине. Таким образом, сама оптическая трасса выполняет роль усилителя. Накачка вводится сонаправленно или противонаправленно информационному сигналу. В зависимости от требований системы, могут применяться как эрбий-иттербиевые, так и ВКР усилители. Применение ВРМБ крайне редко. К сожалению, уменьшение SNR в большей или меньшей степени присуще всем типам усилителей.

Рамановский (ВКР) усилитель работает на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния света, откуда и получил свое название. При достижении пороговой мощности накачки (порядка 1 Вт оптической мощности для одномодового волокна) происходит взаимодействие накачки с молекулами среды, в результате чего фотоны накачки не только претерпевают изменение траектории движения, но и передают часть своей энергии микрочастице, преобразуясь в фотон с меньшей энергией (стоксовое излучение). Возбужденные молекулы могут вынужденно релаксировать под действием усиливаемого излучения сигнала.

Принцип работы усилителей на вынужденном рассеянии Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) во многом схож с ВКР, с той разницей, что усиливаемый сигнал взаимодействует не с возбужденными молекулами, а с акустическими колебаниями, возникающими в структуре вещества световода. Известно, что при температурах, отличных от абсолютного нуля, атомы и молекулы вещества хаотично движутся. В большой совокупности таких частиц могут возникать спонтанные акустические колебания, называемые фононами (тепловой шум). Являясь, по сути, локальными неоднородностями плотности вещества, фононы способны рассеивать свет. Это явление называется спонтанным рассеянием Мандельштама–Бриллюэна.

Вынужденное рассеяние возникает в том случае, когда световая волна накачки, распространяющаяся в среде, под действием электрострикции вызывает образование акустических волн (упорядоченных фононов). Иными словами, акустическая волна возбуждается светом. Явление носит пороговый характер и проявляется при достаточно больших мощностях. Для явления характерно, что при пропускании через вещество мощного лазерного излучения с частотой ω_1 образуется звуковая волна частоты ω_2 , при этом так же возникает световая волна с частотой $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$. Если частота усиливаемого сигнального излучения будет равна ω_3 , а мощность излучения накачки будет превышать пороговое значение, возникнет усиление света на частоте ω_3 .

В отличие от ВКР-усилителей, где молекулярные колебания способны порождать достаточно широкие полосы усиления вплоть до 5 ТГц и более, ВРМБ-усилители способны усиливать лишь очень узкую полосу, не превышающую 100 МГц, поэтому могут использоваться лишь для моноканальных систем, что и определило их малую распространенность.

Каскадирование усилителей приводит к накоплению шума и уменьшению SNR. При превышении порогового значения зашумленности происходит увеличение количества ошибок в линии. Для магистральных линий связи количество ошибок BER (Bit Error Ratio) не должно превышать 10^{-12} .

Из вышесказанного следует, что построение сверхдлинных линий связи с использованием одних лишь усилительных каскадов не всегда возможно или целесообразно. По мере ухудшения качества сигнала приходится осуществлять его полное восстановление (3R-регенерацию) с последующим переизлучением в тракту. При проектировании протяженных линий обычно стараются максимально увеличить длину безрегенерационных участков, организовывая восстановление сигнала в узловых пунктах.

Далеко не все оптоволоконные системы связи требуют усиления сигнала на пути от передатчика до приемника. Как правило, недостаток оптической мощности остро ощущается лишь в линиях с большой протяженностью, а также в системах сложной структуры с большим количеством ответвлений и элементами спектрального уплотнения (мультиплексорами). Небольшие линии Metro-уровня (городские, районные сети) в большинстве случаев обходятся собственным оптическим бюджетом приемопередающих модулей (трансиверов) и не требуют дополнительного усиления.

В настоящее время можно наблюдать бурное развитие волоконно-оптических телекоммуникаций на всех уровнях: от совершенствования физического механизма передачи и создания более эффективных способов формирования оптического сигнала до разработки новых протоколов передачи и оптимизации структуры сетей и трафика. Каждый год на рынок выходят новые устройства и технические решения, предлагающие все более гибкие возможности масштабирования сетей

и обеспечивающие большую пропускную способность. Линейки сетевого оборудования пополняются ежегодно новыми моделями, а появление и развитие новых программно-аппаратных средств позволяет предоставлять конечным потребителям огромный набор услуг связи.

5.3.4. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Говоря о перспективах развития технологий оптической передачи данных, следует обратить внимание главным образом на реалии современных телекоммуникаций. Объем мирового трафика ежегодно возрастает. По данным исследователей, в 2016 году объем глобального IP-трафика составит около 1.3 зеттабайт ($1.3 \cdot 10^{21}$ байт), при этом тенденции к снижению роста не наблюдается.

Каждый год на рынок телекоммуникаций выходят новые коммерческие услуги, продукты и сервисы, появляются и развиваются социальные сети и приложения. Наблюдается ярко выраженная тенденция к «утяжелению» состава трафика. Если раньше основная доля пользовательского трафика приходилась на относительно «легкий» контент, такой как текст, аудио и изображения, то сегодня все большая часть приходится на «тяжелые» FHD и UHD видео. Появление и бурное развитие формата 4K предвещает в скором времени очередной этап роста нагрузки на сети.

Развитие концепций повсеместного доступа в Интернет и «Гигабит в каждый дом» также не внушает оптимизма магистральным и региональным операторам, ведь в конечном счете весь дополнительный трафик «осядет» на оптоволоконных магистралях, увеличив и без того немалую нагрузку. Рынок сотовой связи и мобильного доступа в сеть также год от года расширяется. При этом голосовые сообщения уже не являются основным объемом мобильного трафика, а 3G- и 4G-сети адаптированы преимущественно для беспроводного доступа в сеть. Здесь рассмотрены лишь некоторые из причин роста глобального информационного трафика.

Подытожив вышесказанное, можно сделать вывод о том, что в ближайшие годы рост объемов передаваемой информации сохранится, а нагрузка на сети не ослабнет. Логичной видится перспектива как экстенсивного, так и интенсивного развития магистральных и малых линий связи. Постепенно будет расти и развиваться инфраструктура, увеличиваться как канальная скорость передачи, так и плотность каналов. В некоторых странах уже широко применяются каналы на 40 и 100 Гбит/с в пределах районных сетей, в России внедрение такого оборудования только началось.

Без сомнения, еще большее развитие получают технологии спектрального уплотнения, без которых трудно представить современные телекоммуникации

уже сегодня. Мультиплексные магистральные потоки в 40 Тбит/с и более станут повсеместной реальностью.

Благоприятные перспективы ждут лазерную связь и в космическом секторе – об этом свидетельствует год от года увеличивающееся число разработок и стартапов, так или иначе связанных с передачей информации с помощью лазера в космической среде. Развитая структура низкоорбитальных и геостационарных спутников позволит обеспечить доступ в сеть практически на всей территории земного шара.

Говоря о применении лазеров в связи вообще, можно заключить, что в настоящее время лазеры являются едва ли не основными элементами высокоскоростной передачи данных, играя роль генераторов несущей частоты. Поскольку пока нельзя говорить о сколь-нибудь существенном изменении концепции развития телекоммуникаций в ближайшем будущем, следует думать, что значимость лазерных источников в связи не только не уменьшится, но и продолжит возрастать год от года.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

5.1. Использование лазеров в качестве источников высокочастотной электромагнитной несущей в линиях связи позволило расширить полосу частот и увеличить скорости передачи данных на несколько порядков по сравнению с традиционным радиодиапазоном.

5.2. Свет обладает высокой помехозащищенностью от электромагнитных помех.

5.3. Лазерные системы передачи данных обладают высокой скрытностью и устойчивы к внешним вмешательствам. В отличие от радиоэфира, который легко прослушивается, световые системы связи практически исключают возможность несанкционированного доступа к передаваемой информации на физическом уровне.

5.4. Лазерные системы связи могут реализовываться практически в любых оптически прозрачных средах: космическое пространство, атмосфера, вода, кварцевое стекло оптических волокон и т.д.

5.5. В настоящее время основой глобальных телекоммуникационных систем являются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), в то время как атмосферные оптические линии связи (АОЛС) чаще всего выполняют функции предпоследнего связующего звена, занимая узкую нишу специализированных систем связи в условиях ограниченной применимости ВОЛС и радиоканалов.

5.6. В оптоволоконной связи используются длины волн в диапазоне 0.85–1.6 мкм, что соответствует области наименьших затуханий для кварцевого стекла.

Основные механизмы, ограничивающие скорость и дальность передачи сигнала по оптоволокну – это затухание света и дисперсия (модовая и хроматическая).

5.7. Для компенсации хроматической дисперсии волокна применяют DCM-модули, состоящие, в большинстве случаев, из волокон с отрицательной результирующей хроматической дисперсией.

5.8. Для промежуточного усиления оптического сигнала в длинных линиях связи применяются волоконные усилители, позволяющие усиливать как одночастотный, так и групповой сигнал на длинах волн 1.5–1.6 мкм без оптоэлектронного преобразования. На протяженных линиях связи необходимо организовывать оптоэлектронное преобразование и восстановление сигнала с последующим переизлучением (3-R регенерация), так как эта процедура позволяет увеличить отношение сигнал-шум (SNR, signal-to-noise ratio) и снизить число ошибок передачи сигнала (BER, bit error rate).

5.9. Лазерные источники являются одним из основных и важнейших элементов современных телекоммуникаций. Их значимость в перспективе будет увеличиваться.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 5

5.1. Объясните необходимость использования высокочастотной несущей для передачи информации на большой скорости.

5.2. Каковы основные преимущества и недостатки лазерной связи по сравнению с традиционными радиоволнами?

5.3. Чем обусловлена популярность оптического диапазона 1.5 мкм для передачи информации по оптоволокну?

5.4. Какие факторы оказывают определяющее влияние на дальность передачи в атмосферных линиях связи?

5.5. Чем обусловлены трудности передачи информации с помощью света в водной среде?

5.6. Какие длины волн оптического диапазона лучше всего подходят для передачи информации в водной среде?

5.7. Объясните понятие модовой дисперсии.

5.8. Чем отличается хроматическая дисперсия от модовой?

5.9. Из каких составляющих складывается результирующая хроматическая дисперсия?

5.10. Объясните существование трех окон прозрачности в кварцевых оптических световодах.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 5

5.1. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. Учеб. пособие для вузов / И.И. Гроднев. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.

5.2. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. Р.Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 267 с.

5.3. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика. Теория и практика. – М.: Кудиц-Образ, 2006. – 320 с.

5.4. Алексеев Е.Б., Заркевич Е.А., Скляров О.К., Павлов Н.М. Атмосферные оптические линии передачи на местной сети связи России и проблемы их внедрения. «Электросвязь», 2003, №9.

5.5. Алексеев Е.Б. «Принципы построения и технической эксплуатации фотонных сетей связи». Учебное пособие, ИПК МТУ СИ, ЗАО «Информсвязьиздат», М. 2000.

5.6. Долотов Д.В. Оптические технологии в сетях доступа, «Технологии и средства связи», спецвыпуск «Системы абонентского доступа», 2004.

5.7. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи, М.: СОЛОН-Пресс, 2004.

ГЛАВА 6

ХРАНЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

6.1.

ЗАПИСЬ И ХРАНЕНИЕ ДАННЫХ

При обработке информации практически всегда возникает необходимость в оперативном и долговременном запоминании и хранении данных. На рис. 6.1 в координатах «плотность записи – время доступа» показаны типовые параметры различных способов хранения информации. В области I расположены системы записи с механическим доступом: 1 – магнитная лента на бобине, 2 – кассетный магнитофон, 3 – оптический диск, 4 – магнитный диск. В области II – системы с электрическим доступом: 5 – запоминающие устройства на магнитных доменах, 6 – голографическая память, 7 – полупроводниковая память на МДП-структурах, 8 – полупроводниковые запоминающие устройства на биполярных структурах.

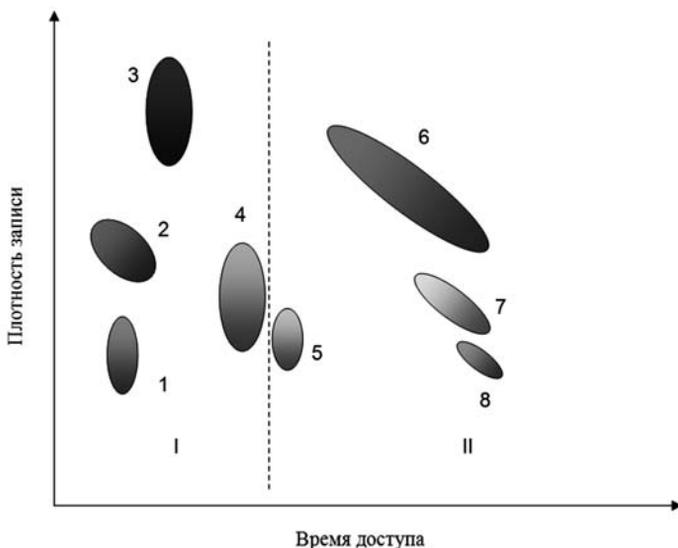


Рис. 6.1

Сравнение различных способов записи и хранения информации

Как видим, по сравнению с другими способами записи и хранения информации оптические устройства способны обеспечить наибольшую плотность записи при приемлемом времени доступа.

Для записи и хранения данных с использованием оптических носителей информации существует несколько методов:

- традиционная цифровая запись информации на оптические компакт-диски;
- динамическая голографическая память на реверсивных средах;
- оптическая память, основанная на специфических квантовых состояниях.

6.1.1. ЛАЗЕРНЫЕ ДИСКИ

Компакт-диски – наиболее известные и распространенные оптические носители информации. Интерес к голографической памяти обусловлен очень большой потенциальной емкостью таких носителей информации из-за их трехмерности и возможности фиксировать не только амплитуду, но и фазу записываемого сигнала. Особенно перспективными в настоящее время считаются оптические устройства хранения информации, использующие квантовые механизмы распространения света. Рассмотрим принципы функционирования оптической памяти каждого из перечисленных видов.

В настоящее время выпускаются оптические компакт-диски нескольких модификаций: CD-R (однократно записываемые), CD-RW (с возможностью перезаписи), DVD (с повышенной плотностью записи) и Blu-Ray диски (наиболее емкие среди всех оптических носителей).

Принцип записи на оптический диск (рис. 6.2) любого типа одинаков. Данные, подлежащие записи, представляются в цифровом виде как последовательность нулей и единиц.

Информация записывается в виде питов (от англ. pit – углубление, яма) и лендов (от англ. land – пространство, основа), нанесенных на спиральной дорожке. Лазер считывает наличие питов. Наличие перехода пита в ленд соответствует единице, а его отсутствие – нулю. Основные различия заключаются в технологии изготовления диска и используемой длине волны лазера (рис. 6.3).

Обычный оптический диск (односторонний однократно записываемый CD-R) представляет собой прозрачную поликарбонатную основу с показателем преломления $n = 1.55$ и нанесенным тонким (10 мкм) отражающим металлическим слоем, на котором находится активное вещество (обычно это органический краситель). Сверху диск покрыт защитной непрозрачной пленкой лака.

При записи данных лазерный пучок нагревает активный слой до определенной температуры, при которой он становится оптически непрозрачным, и в результате формируется микронеровность (пит). Мощность лазера при записи CD составляет 4–8 мВт, длина волны $\lambda = 780$ нм.

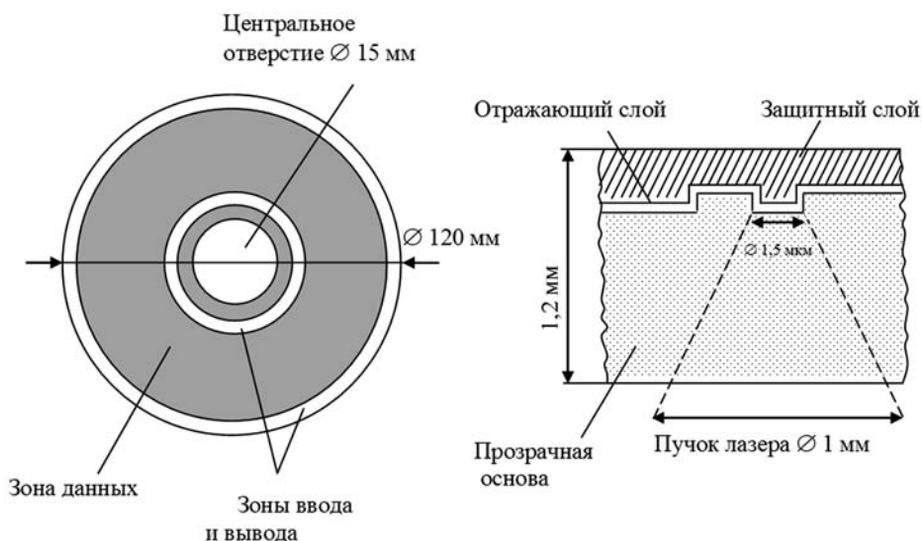


Рис. 6.2

Размеры оптического компакт-диска и его поперечное сечение

При чтении данных луч «красного» лазера ($\lambda = 770\text{--}830\text{ нм}$) проходит сквозь прозрачный материал, фокусируется на микронеровностях активного слоя (питах) и затем отражается от зеркально-отражающего слоя или рассеивается микронеровностью. Диаметр сфокусированного лазерного пятна примерно 1.5 мкм. Конфигурация микронеровности («точка» 0.8 мкм или «тире» 3.1 мкм) соответствует записанной информации (логический ноль или логическая единица). Шаг дорожки составляет 1.6 мкм. Необходимо отметить, что размеры микронеровности не должны быть меньше, чем длина волны излучения лазера.

Поскольку лазерный луч фокусируется внутри диска, а диаметр пятна лазерного пучка на поверхности составляет около 1 мм, что на несколько порядков больше сфокусированного пятна, загрязнения и царапины поверхности диска мало влияют на полезный сигнал.

Дополнительно помехоустойчивость системы увеличивает применение корректирующего кода Рида-Соломона и наличие специальных систем слежения и удержания луча на дорожке. Описанная технология обеспечивает хранение на одном диске не более 750 Мбайт данных. Выпускаются также мини-диски (диаметром 80 мм) с максимальным объемом порядка 200 Мбайт данных.

В оптических дисках с возможностью стирания и повторной записи информации (CD-RW) отражающий слой выполняется из специального состава, который меняет коэффициент отражения при нагреве. Благодаря этому предыдущую за-

пись можно стереть и многократно (до 20 циклов «запись – стирание») повторно использовать носитель. Максимальный объем данных, записываемых на один CD-RW диск, такой же, как и на обычный CD.

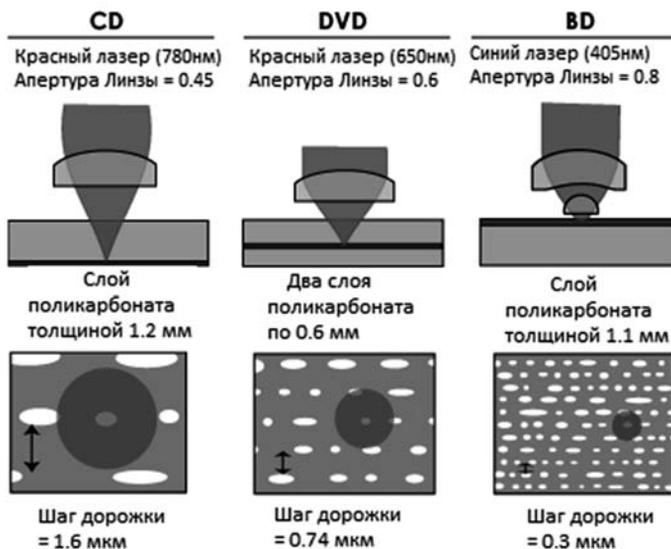


Рис. 6.3

Различия в технологиях записи данных на CD, DVD и BD

В DVD дисках удалось повысить плотность записи за счет уменьшения сфокусированного лазерного пятна (длина волны 650 нм). Кроме того, эти диски изготавливаются двусторонними из поликарбонатной основы с вдвое меньшей (по сравнению с CD) толщиной. Максимальная длина пита 0.4 мкм, а шаг дорожки – 0.74 мкм. В результате резко возросла емкость DVD диска – до 4.7 Гбайт. Выпускаются однократно записываемые диски (DVD-R) и диски с возможностью дополнительной записи (DVD+R). Форматы DVD-R и DVD+R несовместимы, хотя чтение этих дисков возможно на большинстве приводов DVD. Следует отметить также, что гарантированное производителями время хранения данных на DVD-дисках в 2–3 раза меньше, чем на CD.

Еще больше повысить плотность записи удалось с помощью коротковолнового «синего» лазера (длина волны 405 нм), который применяется в устройствах Blu-Ray (от англ. blue – синий) (рис. 6.4). Максимальная длина пита здесь всего 0.15 мкм, а шаг дорожки составляет 0.32 мкм. Blu-Ray диски способны хранить до 25 Гбайт данных.

Для обеспечения высокой надежности записи, хранения и считывания данных на оптических дисках большой емкости постоянно ведется поиск новых более совершенных материалов. Так, например, активный слой из фталоцианинового красителя сохраняет химическую стабильность в течение 70 лет, отличается повышенной стойкостью к воздействию солнечного излучения.

В высококачественных оптических дисках, предназначенных для длительного архивного хранения данных, отражающий слой выполняют из золота или из сплава золота с серебром. Важную роль играет также защитный слой, так как нарушение его целостности влечет за собой деградацию активного слоя и окисление отражающего. В особо ответственных случаях производители предусматривают нанесение нескольких защитных слоев.

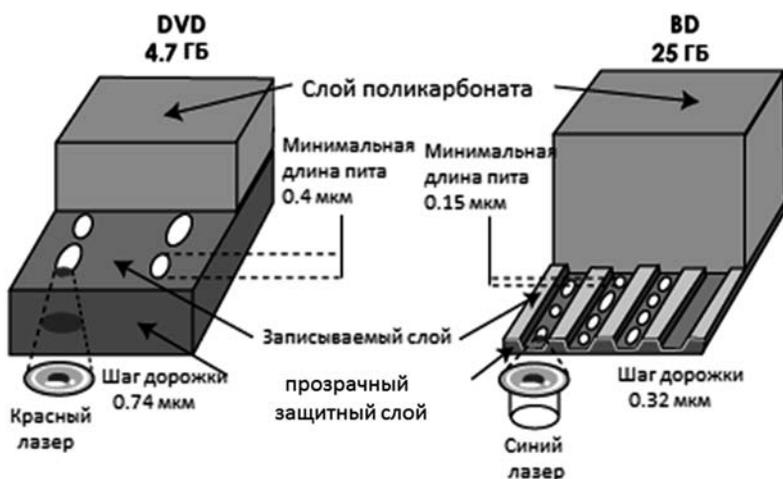


Рис. 6.4

Сравнение технологий DVD и BD

Преимущества цифровых систем записи и хранения информации на оптических компакт-дисках:

- высокая потенциально достижимая плотность записи (увеличивается с уменьшением длины волны света);
- длительный (15 лет и более) срок хранения записанной информации;
- энергонезависимость носителей в процессе хранения данных;
- возможность использования реверсивных оптических сред для стирания и перезаписи;
- большая устойчивость носителя к механическим повреждениям и нечувствительность к электромагнитным полям;
- возможность защиты от несанкционированного копирования информации;

– дешевизна и технологичность изготовления оптических компакт-дисков.

Недостатком можно считать сравнительно большое (порядка 5 с) время доступа к данным, записанным на оптический диск.

В настоящее время плотность записи информации на оптические диски приблизилась к физическому пределу, обусловленному дифракцией света. Дальнейший прогресс в этой области связан с поиском новых записываемых сред и диапазонов длин волн, а также с совершенствованием механических по сути систем слежения за дорожкой и фокусировки лазерного луча и переходом к полностью электронному управлению записью и считыванием данных.

6.1.2. ГОЛОГРАММЫ

Еще один вариант хранения данных на оптических носителях – использование динамической голографической записи и восстановления в реверсивных средах. Физические процессы при записи голограммы иллюстрирует рис. 6.5.

В простейшем случае сквозь регистрирующую фоточувствительную среду толщиной d одновременно проходят два когерентных световых пучка: опорный и объектный. Угол между пучками равен Θ , соотношение интенсивностей – $I_{об}/I_{оп}$. Эти параметры в основном и определяют пространственную частоту $\nu = 1/\Lambda$ и контраст интерференционной картины в слое фоточувствительной среды. Чем меньше угол Θ , тем меньше пространственная частота интерференционных полос и наоборот. При освещении зарегистрированной интерференционной картины опорным пучком формируется восстановленное изображение объекта.

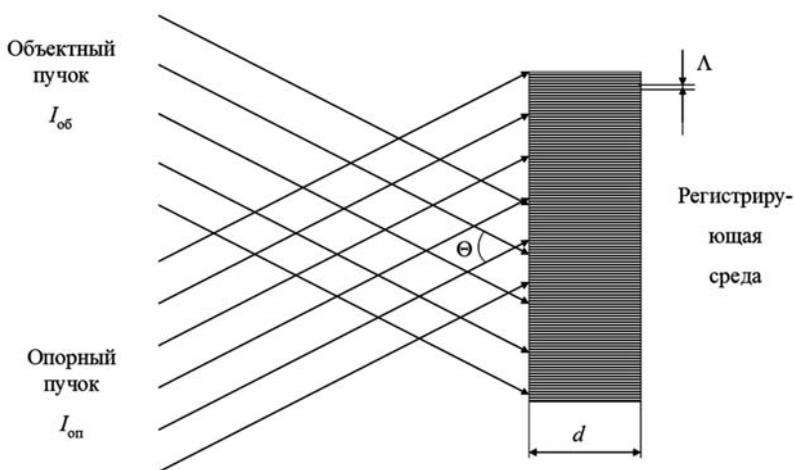


Рис. 6.5

Запись голограммы

как результат интерференции опорного и объектного пучков света

На рис. 6.6 показан принцип действия устройства голографической памяти. Опорный пучок формирует матрица точечных источников света. Благодаря наличию Фурье-линз, в выходной плоскости формируется матрица голограмм Фурье. Для восстановления информации предусмотрен дополнительный лазер с дефлектором.

Несмотря на то, что были проведены масштабные лабораторные исследования процессов голографической записи и восстановления, а также предложены многочисленные варианты голографических систем записи и хранения информации, ни одна из них не дошла до стадии коммерческого использования. Основная причина – сложность технической реализации и отсутствие подходящих реверсивных голографических сред.

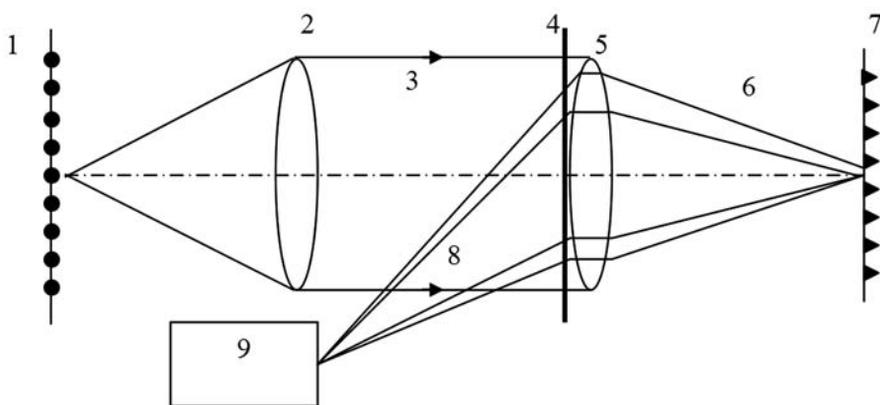


Рис. 6.6

Схема устройства голографической памяти:

- 1 – матрица когерентных точечных монохроматических источников света;
- 2, 5 – Фурье-линзы; 3 – записывающий пучок; 4 – плоскость регистрации;
- 6 – восстановленный пучок; 7 – матричный фотоприемник;
- 8 – восстанавливающий пучок; 9 – лазер с дефлектором

В последнее время все большее внимание исследователей и разработчиков привлекают устройства хранения информации, использующие квантовые оптические эффекты (так называемая квантовая голографическая память). Появился и новый термин – кубит (квантовый бит).

Особые квантовые состояния физических объектов (сжатое, перепутанное, с заданным числом возбуждений и др.) не имеют аналогов в классической физике. Устройство, способное переносить квантовое состояние одного объекта на другой и обратно, называется квантовой памятью.

Чтобы обеспечить подобный механизм между светом и веществом, взаимодействие организуется так, чтобы квантовое состояние светового поля было в итоге

перенесено на состояние вещества. Причем желательнее, чтобы квантовое состояние вещества сохранялось достаточно долго.

Для увеличения эффективности взаимодействия света и вещества можно использовать оптический резонатор. С точки зрения увеличения емкости квантовой памяти наиболее интересны устройства, реализующие многомодовое взаимодействие. Запись и считывание информации целесообразно организовать так же, как и в традиционной голографии, т.е. с опорным световым пучком. Различие заключается в том, что здесь запоминается не только трехмерное распределение амплитуд и фаз, но и конфигурация квантовых состояний оптического излучения.

Коммерческому использованию квантовой памяти пока препятствуют несколько факторов: малое время фиксации квантового состояния у изученных веществ, сложность технической реализации адресуемой памяти с произвольным доступом к выбранной ячейке, а также трудности создания многомодовых оптических полей.

И все же квантовые технологии постепенно внедряются в традиционные области оптической передачи и обработки информации. Созданы и действуют квантовые криптографические системы, разработаны схемы квантовых повторителей сигналов, исследуются возможности в направлении создания квантовых вычислителей и т.д.

6.2.

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Не будет преувеличением высказывание, что оптические устройства обработки информации появились гораздо раньше электрических. Ведь и телескоп Галилея и микроскоп Левенгука, по сути, были простейшими аналоговыми оптическими процессорами. Первые спектроанализаторы – призмы и дифракционные решетки – тоже работали в оптическом диапазоне.

Возможности оптических устройств обработки информации существенно расширились с появлением мощных монохроматических источников света: сначала это были газоразрядные лампы, а затем – лазеры. Возникло и стало интенсивно развиваться новое направление – когерентная оптика.

Во второй половине XX века с применением лазеров были созданы быстродействующие двумерные фурье-процессоры, оптико-электронные устройства анализа и распознавания изображений, системы голографической записи в реальном времени, акустооптические спектроанализаторы и многие другие устройства обработки информации.

Гибридные системы, состоящие из оптических и электронных компонентов, сочетают достоинства тех и других: сверхбыстродействие оптики и отличные

адаптивные возможности электроники. Подобные оптико-электронные системы обработки информации широко применяются в настоящее время во многих областях науки и техники.

Элементная база оптических процессоров продолжала совершенствоваться. Создание эффективных полупроводниковых лазеров и высокочувствительных матричных фотоприемников, появление и развитие градиентных оптических элементов, совершенствование волоконно-оптических компонентов и гибридных оптико-электронных интегральных микросхем (рис. 6.7).

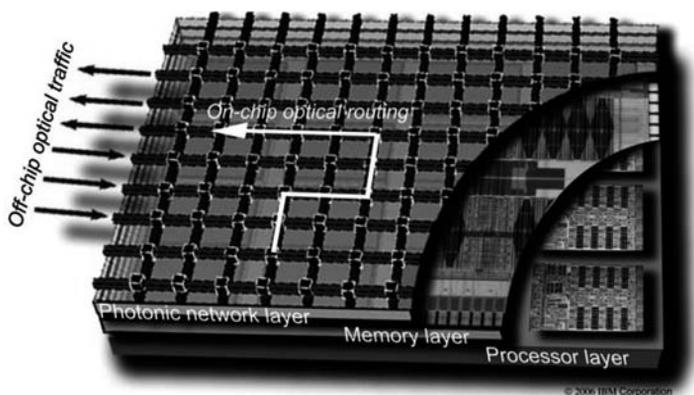


Рис. 6.7

Пример структуры оптико-электронной интегральной микросхемы

Прогресс в области оптоинформатики к началу XXI века позволил вплотную приблизиться к исследованиям в направлении создания полностью оптических вычислительных машин, базирующихся на принципиально новой концепции оптических нейронных сетей.

Устройства, реализующие оптическую обработку информации, могут базироваться на различных физических процессах:

- электрооптические эффекты в разных средах;
- акустооптическое взаимодействие;
- способность положительной линзы выполнять двумерное преобразование Фурье;
- эффект Фарадея;
- квантовые эффекты.

Такие хорошо изученные электрооптические эффекты, как эффект Поггеля и Керра, позволяют создавать оптические модуляторы, затворы, мультиплексоры и другие компоненты оптических вычислителей.

Конфигурация ячеек Керра и Поккельса показана на рис. 6.8. В ячейке Керра электрическое и оптическое поля ортогональны, в ячейке Поккельса – коллинеарны. В последнем случае управляющие электроды следует делать прозрачными для проходящего света. Для реализации модуляции интенсивности на входе и выходе ячеек предусмотрены поляризатор и анализатор. Анизотропные кристаллы для данных модуляторов получают из таких веществ, как дигидрофосфат калия (KH_2PO_4), дигидрофосфат аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), силикат висмута ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$), титанат бария (BaTiO_3) и др. Чтобы повысить эффективность электрооптического взаимодействия и уменьшить габариты устройства, используют планарную технологию. Функцию светопроводящей среды в таких модуляторах способны выполнять волоконно-оптические элементы.

В современных электрооптических модуляторах на основе интерферометра Маха-Цендера в качестве рабочей среды часто используются кристаллы ниобата лития (LiNbO_3). Структуру устройства иллюстрирует рис. 6.9.

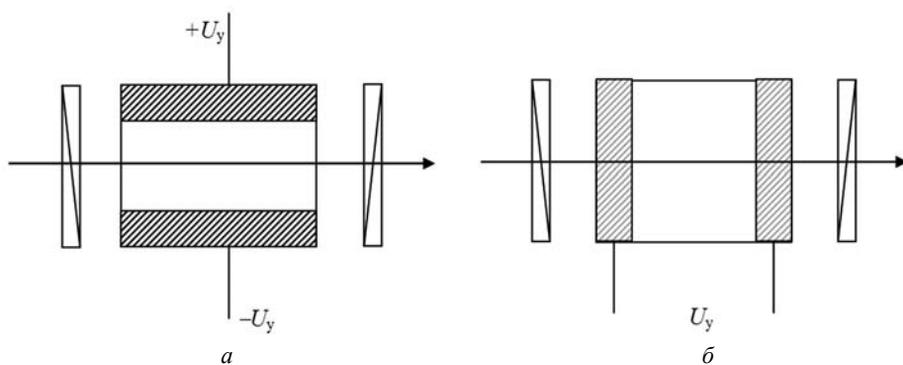


Рис. 6.8
Ячейки Керра (а) и Поккельса (б)

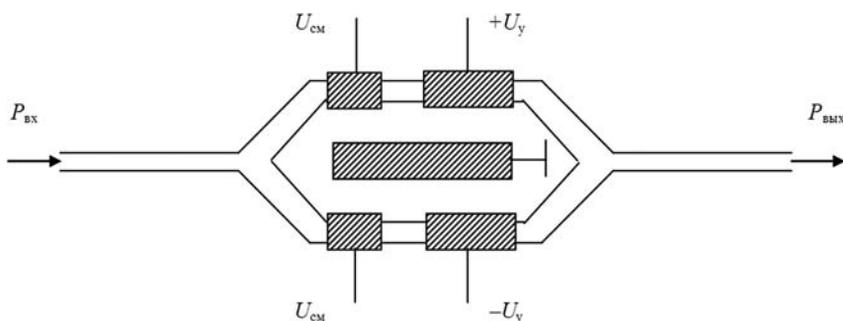


Рис. 6.9

Структура электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цендера

Два оптических пучка распространяются в кристалле по идентичным волноводным плечам. Под действием приложенного электрического поля (управляющее напряжение U_y между электродами) показатель преломления кристалла LiNbO_3 изменяется:

$$\Delta n_m = k_m 3rE/2, \quad (6.1)$$

где r – электрооптический коэффициент кристалла, E – напряженность приложенного электрического поля.

В результате на выходе кристалла возникает сдвиг фаз, пропорциональный Δn_m :

$$\Delta\phi = k_m \Delta n_m L, \quad (6.2)$$

где k_m – волновой вектор, L – длина электрооптического взаимодействия (длина управляющих электродов).

Дальнейшая интерференция пучков на выходе устройства обеспечивает модуляцию светового потока по интенсивности (т.е. происходит преобразование фазовой модуляции в амплитудную). Следовательно, отпадает необходимость в дополнительных оптических элементах (например, поляризаторах). Выбор рабочей точки обеспечивается подачей постоянного напряжения смещения $U_{см}$ к вспомогательным электродам.

Подобные модуляторы легко состыковать с оптическим волокном и встроить в более сложные оптические интегральные схемы. Кроме того, интерференционные электрооптические модуляторы отличаются малыми вносимыми потерями, низким энергопотреблением и при этом обеспечивают высокое быстродействие. Внешний вид образца электрооптического модулятора в интегральном исполнении приведен на рис. 6.10.



Рис. 6.10

Электрооптический модулятор Маха-Цендера с выводами, выполненными в виде волоконно-оптических коннекторов (производство фирмы Photline)

Отдельный класс устройств представляют интегральные электрооптические модуляторы переключающего типа. Такие переключатели чаще всего выполняют

на основе управляемых волноводных ответвителей: связанных, пересекающихся или разветвляющихся оптических волокон. Известны схемы оптических переключателей с зеркалами полного внутреннего отражения, брэгговского типа и др.

Пример конструкции X-образного оптического переключателя иллюстрирует рис. 6.11.

Два одномодовых оптических волновода пересекаются под углом θ , меньшим 1° . Изменение показателя преломления Δn в области пересечения в два раза больше приращения показателя преломления каждого из волноводов. В результате формируются две моды: симметричная и асимметричная, с разными постоянными распространения.

Мощность мод на обоих выходах равна:

$$P_{\text{вых2}} = P_{\text{вх}} \cos^2(\Delta\beta L/2); \quad P_{\text{вых1}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых2}}. \quad (6.3)$$

Здесь $\Delta\beta$ – разность постоянных распространения; $L = W/\sin(\theta/2)$ – длина электродов переключателя.

Менять величину $\Delta\beta$ и тем самым переключать мощность в выходах волноводов можно, прикладывая управляющее напряжение к электродам.

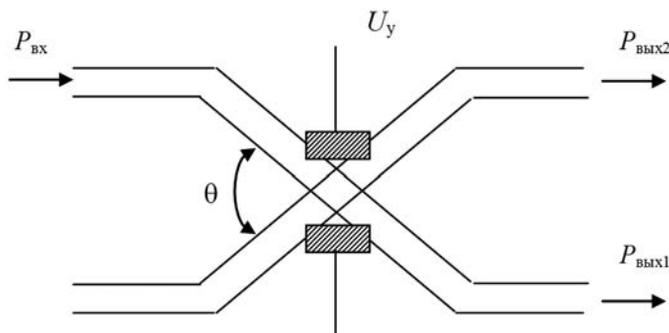


Рис. 6.11

Оптический переключатель, выполненный по X-образной схеме

Переключатели можно выполнить также на разветвляющихся трехмерных оптических волокнах. Такие устройства могут функционировать в различных режимах: переключения мощности, селекции и расщепления мод по поляризации.

Еще один тип переключателей – устройства на брэгговских дифракционных решетках, индуцированных в планарном оптическом волокне за счет электрооптического эффекта. Для этого служит система встречно-штыревых электродов различной конфигурации 2, нанесенная на поверхности планарного волновода 1 (рис. 6.12). Дифракция волноводных пучков света на индуцированной фазовой

дифракционной решетке 3, возникающей при приложении к электродам управляющего напряжения U_y , приводит к модуляции интенсивности оптического излучения. На определенной длине волны достигается почти полное отражение света от брэгговской решетки и, следовательно, можно реализовать режим переключения оптической мощности.

Параметры переключателя подбирают так, чтобы обеспечить режим брэгговской дифракции, при котором глубина модуляции (эффективность переключения) близка к 100%. В модуляторах такого типа с волноводами на основе ниобата лития достигнута глубина модуляции 98%.

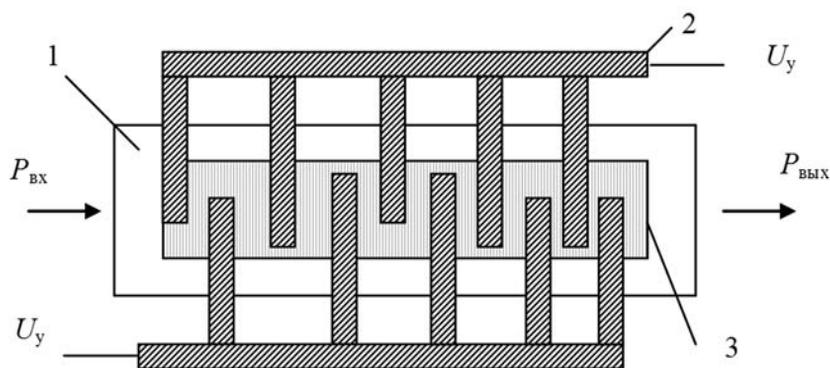


Рис. 6.12

Оптический вентиль на основе индуцированной брэгговской решетки:

- 1 – планарный оптический волновод; 2 – система встречно-штыревых электродов;
3 – индуцированная брэгговская решетка

Весьма перспективными оказались разнообразные оптические устройства на базе жидкокристаллических ячеек. Важная особенность жидкого кристалла (ЖК) – наличие в их составе молекул двух полярных (противоположных по знаку) групп и, следовательно, суммарного дипольного момента, что объясняет их высокую чувствительность к воздействию магнитного и электрического полей. Действие внешнего электрического поля приводит к выстраиванию диполей молекул вдоль линий напряженности поля, т.е. возникает деформация (рис. 6.13). Преобразование молекулярной структуры внутри ЖК сопровождается появлением различных оптических эффектов: рассеяния, поглощения света, а также его двулучепреломления.

Конструкция простейшей ЖК-ячейки подобна ячейке Керра (см. рис. 6.8, а). Если световая волна, распространяющаяся перпендикулярно плоскости электродов-подложек, плоскополяризована, то слой жидкого кристалла обладает максимальным двулучепреломлением, характеризующимся приращением показателя

преломления $\Delta n_{\max} = n_e - n_o$, где n_e , n_o – показатели преломления для необыкновенного и обыкновенного лучей света в слое ЖК соответственно.

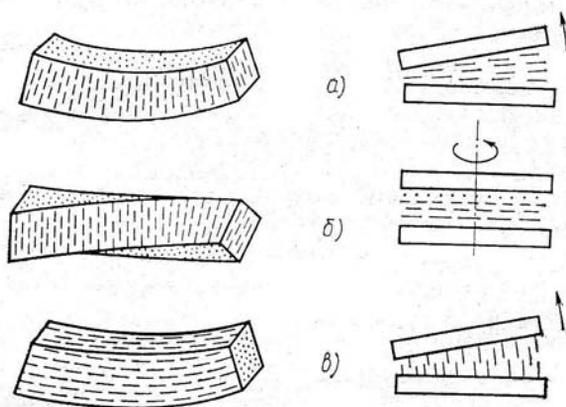


Рис. 6.13

Виды деформаций в жидком кристалле: *a* – поперечный изгиб (bend);
б – кручение (torsion); *в* – продольный изгиб (splay)

При напряжении, приложенном к слою ЖК, превышающем пороговое, направления осей молекул в слое характеризуются некоторыми углами к направлению первоначальной ориентации и являются функциями координаты слоя по толщине. В результате двулучепреломление ЖК определяется некоторым эффективным значением $\Delta n_{\text{эф}}$, которое максимально для недеформированного слоя ЖК и приближается к нулю (ячейка почти изотропна для проходящего сквозь нее света) при $U > U_{\text{п}}$.

Используя скрещенные поляризаторы, между которыми помещена ячейка ЖК под углом 45° к исходной ориентации молекул по отношению к плоскости поляризации считывающего света, изменение двулучепреломления преобразуется в модуляцию по состоянию поляризации, которая вторым из скрещенных поляризаторов преобразуется в амплитудную модуляцию со следующей интенсивностью света:

$$I = I_0 \sin^2[\pi/\lambda L \Delta n_{\text{эф}}], \quad (6.4)$$

где λ – длина волны считывающего света, L – толщина ячейки ЖК.

Учитывая, что для многих ЖК $\Delta n_{\max} = 0.2$ – 0.4 , изменение двулучепреломления в электрическом поле обеспечивает максимальную глубину модуляции интенсивности света уже на толщине слоя $L = 1$ мкм.

Упрощенная структура оптического ЖК-модулятора с тонкопленочным управляющим транзистором изображена на рис. 6.14.

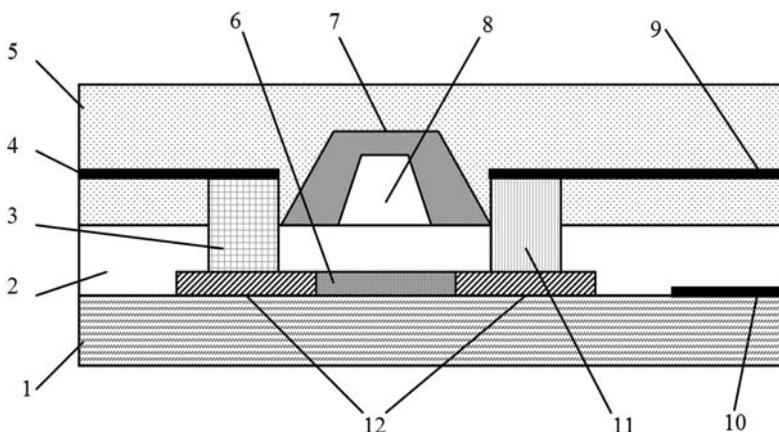


Рис. 6.14

Структура ЖК-модулятора с TFT-транзистором

На подложке *1* из SiO_2 созданы области *12* из высоколегированного p^+Si , образующие канал. Между ними находится буферный слой *6*. TFT-транзистор образован областями истока *3*, стока *11* и затвора *8*, к которым подключены электроды *4* и *9*. Емкость собственно ЖК-ячейки образуется между электродами *9* и *10*. Для изоляции предусмотрены соответствующие слои *2* и *7*. Вся структура сверху покрыта защитным слоем *5*.

Прогресс интегральной технологии изготовления ЖК-устройств позволяет в настоящее время снабдить каждую ячейку не просто управляющим вентилем, а даже встроенным микроконтроллером с АЦП. В результате можно реализовать различные адаптивные алгоритмы управления ячейкой, обеспечив расширение выполняемых функций при высоком быстродействии и сравнительно небольшой потребляемой мощности.

Основные преимущества ЖК-устройств:

- высокая чувствительность к управляющим воздействиям;
- низкие управляющие напряжения;
- выраженные пороговые свойства и высокая крутизна модуляционной характеристики;
- высокое оптическое качество тонких слоев ЖК;
- технологичность – отсутствие вакуума, охлаждения, необходимости прецизионной обработки поверхностей и т.д.;
- возможность изготовления многоэлементных приборов большого формата.

Обширный класс устройств оптической обработки информации представляют акустооптические процессоры, работа которых основана на локальном взаимодействии световой и звуковой волны. Конструкция акустооптической ячейки схематично изображена на рис. 6.15.

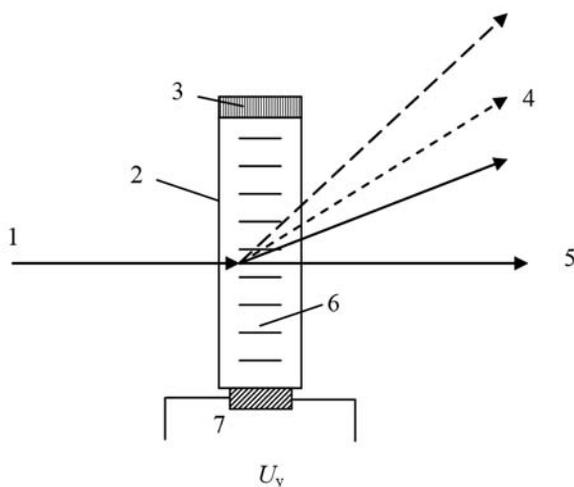


Рис. 6.15

Конструкция акустооптической ячейки

Входящий пучок света 1 проходит через прозрачную акустооптическую среду 2 (акустический волновод). На одном торце волновода закреплен пьезопреобразователь с электродами, к которым подводится управляющее напряжение U_y . На другом торце находится звукопоглощающий слой 3 , что обеспечивает формирование в толще среды фазовой дифракционной решетки 6 . В результате на выходе устройства помимо основного (неотклоненного) пучка 5 формируется один или несколько дифракционных максимумов 4 , положение и интенсивность которых зависят от характера управляющего напряжения.

Существует множество различных акустооптических материалов: кварц ($\alpha\text{-SiO}_2$), парателлури́т (TeO_2), молибдат кальция (CaMoO_4) и др. Акустооптическое взаимодействие наблюдается не только в кристаллических, но и в аморфных веществах (например, в стекле некоторых марок) и даже в жидкостях (вода – плохой акустооптический материал). Выбор той или иной акустооптической среды зависит от условий конкретной области применения.

Многие современные акустооптические модуляторы имеют планарное исполнение – это приборы на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Их габариты существенно меньше, а эффективность выше. Примеры конфигурации ПАВ-приборов приведены на рис. 6.16.

Основные достоинства ПАВ-приборов:

- стабильность характеристик;
- малые габариты;
- простота изготовления;
- возможность подстройки параметров путем изменения геометрии встречно-штыревого преобразователя.

Внешний вид современного акустооптического модулятора приведен на рис. 6.17.

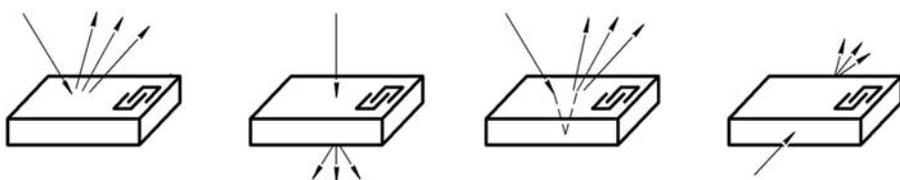


Рис. 6.16

Варианты конфигурации акустооптического взаимодействия в приборах на ПАВ



Рис. 6.17

Акустооптический модулятор для волоконно-оптических систем обработки информации (производство фирмы Gooch&Housego)

Еще одна интересная возможность – способность положительной линзы в когерентном свете выполнять двумерное преобразование Фурье. Это позволяет создавать анализаторы пространственных спектров, пространственно-частотные фильтры и корреляторы изображений.

На рис. 6.18 приведен пример гибридной системы пространственно-частотной фильтрации. Плоская когерентная монохроматическая волна 1, от лазера поступает на динамический транспарант 2. Сформированное изображение объекта преобразуется Фурье-линзой 3 в двумерный спектр и проходит через адаптивный про-

пространственно-частотный фильтр 4. Результат фильтрации подается на вторую Фурье-линзу 5, которая осуществляет повторное преобразование Фурье. Далее оптический пространственный сигнал преобразуется в электрический с помощью матричного фотоприемника 6. Через интерфейс 7 сигнал поступает в компьютер 8 для дальнейшего анализа и обработки. Блоки управления фильтром 9 и адаптивным транспарантом 10 позволяют осуществлять фильтрацию в реальном масштабе времени.

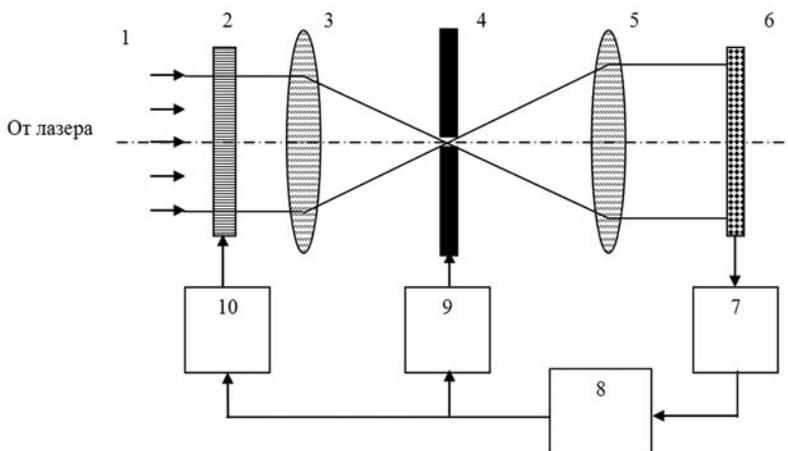


Рис. 6.18

Оптико-электронная система пространственно-частотной фильтрации

На эффекте Фарадея в настоящее время созданы невзаимные элементы – оптические изоляторы (рис. 6.19), широко применяющиеся в системах обработки и передачи информации.

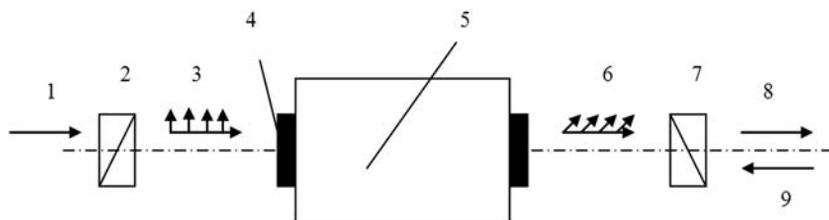


Рис. 6.19

Оптический изолятор на эффекте Фарадея

Входной пучок 1 проходит через поляризатор 2, формирующий линейно-поляризованную волну 3, далее через ячейку Фарадея, состоящую из магнитооптического вещества 4 и магнита 5. Поляризация света 6 на выходе ячейки изменя-

ется (плоскость поляризации поворачивается на угол 45°). Угол поворота анализатора 7 соответствует повороту плоскости поляризации, вносимому ячейкой Фарадея. В результате свет 8 беспрепятственно проходит на выход устройства. Иная картина наблюдается для отраженного (паразитного) пучка 9. Для него суммарный поворот плоскости поляризации оказывается равным 90° , и паразитное излучение не проходит через поляризатор 2 обратно на вход.

Квантовые взаимодействия лежат в основе перспективных оптических криптографических систем. Первые исследования в направлении создания твердотельного квантового процессора были проведены в США. Устройство представляло собой сверхпроводящую пластину из тонкой пленки ниобия, нанесенной на подложку из оксида алюминия с зазором (рис. 6.20). В качестве кубитов использовались так называемые куперовские пары. В проведенном эксперименте удалось осуществить контролируемое взаимодействие между двумя кубитами.

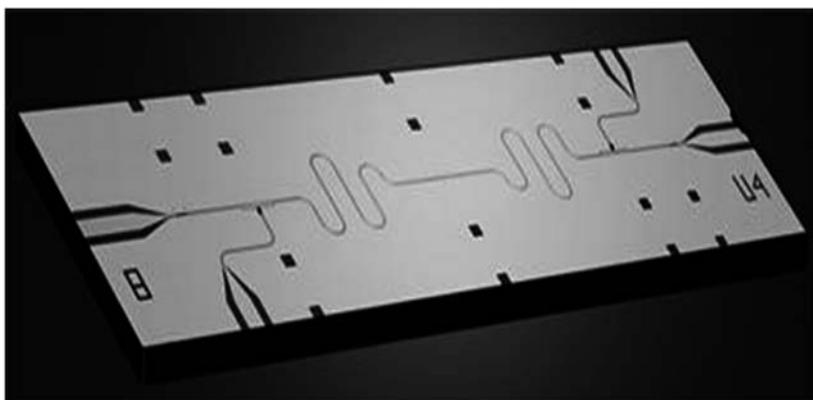


Рис. 6.20

Твердотельный квантовый процессор
(фото сотрудников Йельского университета, Нью-Хейвен, США)

Метод квантовой криптографии базируется на фундаментальном принципе неопределенности Гейзенберга, согласно которому вмешательство в квантовую систему искажает ее состояние и полученная в результате информация не полностью соответствует исходной.

Один из практически реализованных способов квантовой защиты информации – измерение состояния поляризации отдельных фотонов, переданных по волоконно-оптической линии связи между двумя пользователями. При постороннем вмешательстве в процесс передачи по квантовому каналу состояние поляризации изменится и это зафиксируют законные пользователи. Для синхронизации инфор-

мационного обмена часть данных между законными пользователями передается по незащищенному каналу связи.

Можно использовать квантовые свойства светоделителя для формирования случайного распределения отдельных фотонов в волоконно-оптической сети. Поскольку одиночный фотон в светоделителе не может разделяться, а направляется только по одному из путей, то выбор пути для каждого отдельного фотона будет непредсказуем. В итоге каждый пользователь сети получает уникальную случайную последовательность фотонов, неизвестную другому пользователю или злоумышленнику, которые совершают попытку подключиться к каналу связи.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

6.1. Наибольшие успехи в реализации оптических запоминающих устройств достигнуты при создании оптических компакт-дисков, которые сочетают функциональные, технологические и экономические преимущества.

6.2. Коммерчески доступные образцы компакт-дисков обладают возможностью записи, хранения и перезаписи информации, объемом до 25 Гбайт, что близко к физическому пределу.

6.3. Усилия исследователей и разработчиков направлены на поиск других способов оптической записи информации и совершенствование альтернативных систем: голографической и квантовой оптической памяти.

6.4. Многие элементы, необходимые для построения оптических вычислительных устройств, уже созданы и выпускаются, некоторые находятся в стадии освоения и разработки технологии, отдельные компоненты не вышли за рамки лабораторных исследований.

6.5. Физические эффекты, лежащие в основе функционирования элементной базы оптических устройств обработки информации, – эффекты Керра и Поккельса, акустооптический эффект, ориентационные эффекты в жидких кристаллах, эффект Фарадея, фурье-преобразующее свойство положительной линзы и др.

6.6. Современные оптические элементы, как правило, изготавливаются по планарной технологии и снабжаются волоконно-оптическими коннекторами.

6.7. Постоянно расширяется номенклатура выпускаемых гибридных оптико-электронных интегральных микросхем.

6.8. В перспективе возможен переход к полностью оптическим вычислителям, реализующим концепцию оптических нейронных сетей.

6.9. Особое место занимают оптические системы обработки и передачи информации, использующие квантовые эффекты. Уже существуют коммерчески доступные образцы линий передачи данных повышенной скрытности, реализованные в соответствии с технологией квантовой криптографии. В будущем это направление получит еще большее распространение за счет неоспоримых преимуществ перед традиционными методами защиты данных.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 6

- 6.1. Какие физические эффекты лежат в основе функционирования оптических запоминающих устройств?
- 6.2. Как устроены и действуют системы памяти на оптических компакт-дисках?
- 6.3. Какие разновидности оптических компакт-дисков существуют и каковы их особенности?
- 6.4. Какие факторы влияют на предельный объем данных, хранящихся на оптическом компакт-диске?
- 6.5. Каков принцип действия систем голографической памяти?
- 6.6. Почему голографические запоминающие устройства обладают большой информационной емкостью?
- 6.7. Каков принцип действия квантовых запоминающих устройств?
- 6.8. Каковы преимущества и недостатки существующих оптических вычислительных устройств?
- 6.9. Какова элементная база оптических устройств обработки информации?
- 6.10. Как устроены и действуют электрооптические модуляторы?
- 6.11. Как устроены и действуют акустооптические процессоры?
- 6.12. В чем сущность фурье-преобразующего свойства линзы? Какое практическое применение оно имеет?
- 6.13. Что такое оптический невзаимный элемент, как его можно реализовать на практике?
- 6.14. На каких физических принципах основано действие квантовых оптических вычислителей?
- 6.15. Что понимают под квантовой криптографией? Каковы ее отличия от традиционных методов защиты информации?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 6

- 6.1. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации / А.А.Акаев, С.А.Майоров. М.: Высшая школа, 1988.
- 6.2. Башкиров А.И. Оптические системы обработки информации: Учебное пособие / А.И.Башкиров. Томск: ГУСУР, 2007.
- 6.3. Васильев А.А., Компанец И.Н., Касасент Д., Парфенов А.В. Пространственные модуляторы света / А.А.Васильев [и др.]. М.: Радио и связь, 1987.
- 6.4. Дмитриев А.Л. Оптические методы обработки информации: Учебное пособие / А.Л.Дмитриев. СПб.: СПбГУИТМО. 2005.
- 6.5. Корольков А.В. О некоторых прикладных аспектах квантовой криптографии в контексте развития квантовых вычислений и появления квантовых компьютеров // Вопросы кибербезопасности № 1 (9). 2015.
- 6.6. Применение методов Фурье-оптики: Пер. с англ. под ред. Г. Старка. М.: Радио и связь, 1988.
- 6.7. Рекомендации по выбору оптических дисков для хранения архивных документов / М.И. Пилипчук, А.Н. Балакирев, Л.В. Дмитриева, Г.З. Залаев. – М.: РГАНТД, 2011.

ЧАСТЬ III

**ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

И. М. Евдокимов, А. В. Федин

ВВЕДЕНИЕ К ЧАСТИ III

Главной чертой научно-технического прогресса является разработка новых технологий, основанных на последних достижениях науки и техники. К числу таких достижений принадлежат лазерные технологии и лазерная техника. Они стремительно распространяются в машиностроении и приборостроении.

В настоящем методическом пособии будут рассмотрены лазерные технологии, в которых лазерное излучение используется в качестве инструмента для обработки материалов: резка, сварка, обработка отверстий, термоупрочнение и др. В то же время химические (разделение изотопов, спектрально-химический анализ) и медико-биологические (терапия, хирургия) лазерные технологии выходят за рамки курса. Также будет рассмотрено использование лазерного излучения при контроле технологических процессов.

Первое применение лазеров в технологии обработки материалов приходится на конец 60-х годов XX века – вскоре после их изобретения. Однако малые мощности излучения позволяли использовать лазеры лишь для сварки, резки и других видов обработки материалов малых толщин, характерных в основном для приборостроения. Применение лазеров для обработки конструкционных материалов в машиностроении оказалось возможным при последующем развитии техники и создании лазеров с большими значениями средней мощности в непрерывном или импульсно-периодическом режиме генерации.

ГЛАВА 7

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

7.1.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Лазерное воздействие, не вызывающее разрушения материала, позволяет реализовать различные процессы лазерной поверхностной обработки. В основе этих процессов лежит преобразование световой энергии в тепловую, которое направлено на структурные и фазовые изменения в материале, возникающие вследствие высоких скоростей его нагрева под действием лазерного излучения и последующего охлаждения материала после окончания лазерного воздействия. Важную роль при этом играют возможность насыщения поверхностного слоя различными элементами, рост плотности дислокаций в зоне облучения и другие эффекты.

Прежде всего, следует отметить, что различают несколько видов поверхностной лазерной обработки, возможность реализации которых определяется в основном уровнем плотности мощности излучения. Эти виды приведены в табл. 7.1.

Лазерная закалка занимает одно из ведущих мест среди видов поверхностной лазерной обработки. Быстрый локальный нагрев поверхности и последующее охлаждение за счет теплоотвода в массив материала приводят к образованию в поверхностном слое стали специфической структуры, имеющей микротвердость, в 2–4 раза превышающую микротвердость основного материала.

Применение лазеров для термической обработки основано на преобразовании световой энергии в тепловую. Высокая концентрация энергии в световом потоке лазера позволяет нагревать поверхность до температур закалки за очень короткое время, порядка 10^{-3} с. Механизм лазерной закалки заключается в фазовом превращении материала после скоростного нагрева с последующим охлаждением нагретого слоя путем отвода тепла за счет теплопроводности металла. Скорость охлаждения при этом превышает 10^3 °C/с.

Процессы лазерной термической обработки основаны на взаимодействии лазерного излучения с материалом, которое зависит от оптических и теплофизических свойств обрабатываемого материала: коэффициента отражения поверхности, теплопроводности, температуры плавления.

Таблица 7.1

Виды поверхностной лазерной обработки

Вид обработки	Плотность мощности, Вт/см ²	Скорость охлаждения, °С/с	Глубина зоны термического влияния, мм
Отжиг (или отпуск)	10^2 – 10^3	–	0.05–0.1
Закалка без фазового перехода	10^3 – 10^4	10^4 – 10^5	0.2–0.5
Закалка с фазовым переходом	10^4 – 10^5	10^5 – 10^6	1.2–3.0
Легирование	10^4 – 10^6	10^4 – 10^6	0.2–2.0
Наплавка	10^4 – 10^6	10^4 – 10^6	0.02–3.0
Амортизация поверхности	10^6 – 10^8	10^4 – 10^6	0.01–0.05

Для снижения отражения и, соответственно, увеличения поглощения повышают шероховатость поверхности металла или наносят светопоглощающие покрытия: химические, углеродные, лакокрасочные, напыленные в вакууме и другие. Чаще всего применяют фосфатирование солями ортофосфорной кислоты. Специально для лазерной термической обработки созданы водорастворимые краски, в состав которых входят вещества с высокими коэффициентами поглощения (0.8...0.9). Эти краски после лазерной обработки легко смываются водой.

Поверхностная лазерная закалка перспективна для таких деталей и узлов, долговечность которых определяется их износостойкостью и усталостной прочностью. Приведем несколько примеров.

При лазерном упрочнении среднеуглеродистых сталей достигается высокая прочность и при этом заглаживаются поверхностные трещины и уменьшается шероховатость поверхности, в результате чего повышается усталостная прочность.

При лазерном упрочнении углеродистых инструментальных сталей, таких как У8...У12, твердость может возрасти до 13 000 МПа. Низколегированные инструментальные стали типа Х, ХВГ, 9ХС после лазерной закалки для повышения твердости подлежат обработке холодом. Например, охлаждение стали ХВГ в жидком азоте приводит к повышению твердости с 9700 до 11 200 МПа.

Лазерная закалка повышает теплостойкость быстрорежущих сталей на 70–80°С, поскольку происходит их насыщение легирующими элементами при растворении карбидов и равномерного распределения этих элементов.

7.1.1. ОПЕРАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

В лазерной закалке различают два основных метода: без фазового перехода и с фазовым переходом.

Закалка без фазового перехода предполагает структурные изменения в материале при уровне плотности мощности излучения (10^3 – 10^4 Вт/см²), не приводящем к расплавлению облученной зоны. При этом виде обработки сохраняется исходная шероховатость обрабатываемой поверхности.

Сущность закалки, например, стали, в этом случае, состоит в бездиффузионном превращении кубической решетки аустенита в искаженную объемно-центрированную кубическую решетку мартенсита при быстром охлаждении. Это обусловлено тем, что мартенсит обладает высокой твердостью и прочностью, с одной стороны, и низкой пластичностью и склонностью к хрупкому разрушению, с другой стороны. Однако превращение аустенита в мартенсит не идет до конца, поэтому в закаленной стали наряду с мартенситом всегда присутствует в некотором количестве остаточный аустенит.

Одним из основных требований при лазерной закалке является равномерность глубины закаленной зоны и отсутствие дефектов на поверхности. Чтобы достичь таких результатов, необходимо использовать однородный поверхностный источник тепла. Однако реальный лазерный пучок, как одномодовый, так и многомодовый, такого равномерного нагрева обеспечить не может. Необходимы устройства, преобразующие структуру лазерного пучка в однородное распределение. Ими могут быть оптико-механические сканирующие системы, не изменяющие модовый состав пучка, но многократно перемещающие его по зоне нагрева и создающие за время термического цикла закалки в среднем равномерный тепловой источник или, например, как в разд. 7.3.

На рис. 7.1 показана схема лазерной закалки.

Закалка с фазовым переходом предполагает плавление материала в облучаемой лазером зоне. Этот вид упрочнения требует более высокой плотности мощности излучения (10^4 – 10^5 Вт/см²), что позволяет добиться значительных глубин закаленного слоя. Поверхность этого слоя имеет дендритное строение, характерное для закалки из жидкого состояния. Затем идет зона термического влияния, а между ней и материалом основы расположена переходная зона. При данном виде поверхностной обработки, естественно, нарушается исходная шероховатость, что требует введения в технологический процесс изготовления изделия дополнительной финишной операции – обычно шлифования.

При малых плотностях мощности (10^2 – 10^3 Вт/см²), скоростях нагрева и охлаждения, не превышающих критических значений, может быть реализован *режим отжига* (отпуска) ранее закаленных материалов. Необходимость такой операции

возникает, например, при изготовлении листовых пружин, отбортовке краев обоймы подшипника и т. п.

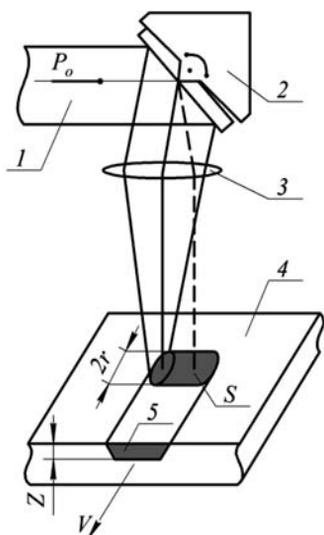


Рис. 7.1

Схема лазерной закалки:

- 1 – лазерный пучок;
- 2 – сканатор с колеблющимся зеркалом;
- 3 – фокусирующая линза;
- 4 – обрабатываемый материал;
- 5 – зона закалки.
- P_0 – мощность лазерного излучения;
- r – радиус лазерного пучка на поверхности материала;
- S – площадь зоны нагрева;
- $Z_{\text{зак}}$ – глубина зоны закалки;
- V – скорость перемещения обрабатываемого материала относительно зоны нагрева

Другая разновидность лазерной закалки – *аморфизация* поверхности материала в условиях скоростного воздействия (очень короткими импульсами или быстро сканируемым лучом) высокоинтенсивным излучением (10^6 – 10^8 Вт/см²). Сверхвысокие скорости теплоотвода, достигаемые при этом, обеспечивают своеобразное «замораживание» расплава, образование, так называемых, металлических стекол или аморфного состояния поверхностного слоя. В результате достигаются высокая твердость, коррозионная стойкость, улучшенные магнитные характеристики и другие специфические свойства материала. Процесс лазерной аморфизации можно осуществить для обработки материалов, которые предварительно покрывают специальными составами. При этом следует учитывать, что материал основы и покрытия должны быть склонны к аморфизации. Таким образом, для практической реализации аморфизации и требуются предварительные исследования.

Преимуществом рассмотренных видов обработки является то, что не требуется специальной среды, процесс проводится на воздухе. При этом возможна частичная диффузия составляющих воздуха в облученную зону.

Два следующих вида поверхностной обработки предусматривают применение специальных сред или материалов.

Лазерное легирование применяют для насыщения поверхностного слоя основного материала легирующими элементами. Поэтому для осуществления процесса требуется специальная среда (газообразная, жидкостная или твердая).

В результате на обрабатываемой поверхности образуется новый сплав, отличный по составу и структуре от материала матрицы.

Лазерная наплавка (покрытие) позволяет нанести на поверхность обрабатываемого материала слой другого материала, который улучшает эксплуатационные характеристики основного материала.

7.1.2.

УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Для поверхностной обработки обычно не изготавливают специализированное оборудование, а используют то же оборудование, что и для других процессов лазерной обработки. Например, могут быть использованы установки, применяемые для лазерной сварки или резки, но со своими режимами обработки. Чаще применяют газовые CO_2 -лазеры и твердотельные Nd:YAG-лазеры, а также лазеры на основе неодимового стекла (рис. 7.2).



a



б



в

Рис. 7.2

Технологические установки для поверхностной лазерной обработки:

a, б – на основе 2 кВт волоконного лазера инженерингового центра «КАИ-Лазер» (Россия);

в – серии HTS-Mobile предприятия ОКБ «Булат» (Россия)

7.2.

ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА И ГРАВИРОВКА

Лазерная маркировка и гравировка представляют собой процесс поверхностной обработки для нанесения изображения. Лазерный луч фокусируется на поверхности обрабатываемой детали, и энергия лазерного излучения преобразуется в тепловую энергию. Это вызывает мгновенное повышение температуры в зоне обработки, как правило, до температуры испарения. В результате происходит локальное удаление верхнего слоя или нескольких слоев, что приводит к образованию на поверхности материала углублений, сочетание которых образуют необходимое изображение или надпись.

Лазерная маркировка и гравировка широко используются для решения различных задач. Среди них – нанесение серийного номера на детали, дат изготовления и истечения срока годности на упаковку продуктов и лекарственных средств; нанесение информации для контроля качества; печать штрих-кодов, логотипов и другой информации о продукции; маркировка печатных плат, электронных компонентов и модулей. Лазерная технология используется для обработки разнообразных материалов, включая металлы, акрил, бумагу, дерево, картон, пластмассы и кожи. На рис. 7.3 показаны образцы лазерной гравировки и маркировки.



Рис. 7.3

Образцы лазерной гравировки и маркировки компании «Лазерный центр» (Россия)

Принято считать, что лазерная маркировка – это нанесение на изделие различной информации и идентификационных данных, а лазерная гравировка – нанесение изображений.

7.2.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Лазерная обработка основана на следующих процессах:

- абляция материала, при которой удаляется поверхностный слой;
- плавление, при котором модифицируется структура поверхности;
- неглубокое выжигание (также называемое обугливание), как правило, используется на бумаге, дереве, картоне или полимерах;
- изменение цвета или осветление пигментов в пластмассах.

Затем лазерный луч сканируют по поверхности. Лазерную обработку подразделяют на векторную и растровую. При векторной лазерной обработке все элементы изображения и надписи создаются лазером линиями или штрихами, а при растровой – изображение или надпись складываются из отдельных точек разной степени плотности. При такой обработке достигается достаточно четкое, почти фотографическое изображение.

Альтернативный подход заключается в использовании шаблона, который отображают на обрабатываемой детали. Этот процесс известен как маркировка шаблона или маркировка проекции.

7.2.2. СПОСОБЫ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ И ГРАВИРОВКИ

Наиболее употребительными способами лазерной маркировки являются: лазерная гравировка испарением; лазерная гравировка плавлением; лазерная абляция; лазерное нанесение покрытия и маркировка; лазерная окраска отжигом; лазерная гравировка и плавление; 3D-гравировка.

Метод лазерной обработки испарением заключается в том, что тепловая энергия, образующаяся в результате поглощения лазерной энергии, обуславливает выборочное плавление и испарение материала. В результате воздействия формируется углубление в виде лунки. Затем процесс повторяется.

В лазерной обработке плавлением тепловая энергия, образующаяся в результате поглощения лазерной энергии, приводит к локальному расплавлению, а не испарению материала. Расплавленный материал при этом образует небольшие кратеры, которые впоследствии диффузно отражают свет. Этот способ лазерной гравировки ухудшает поверхность материала. Кроме того, глубина обработки ограничена и составляет 2–3 мкм. Ключевым преимуществом этого метода является его высокая скорость.

Способом *лазерной абляции* гравировать материалы с поверхностным покрытием. Методика хорошо работает с различными покрытиями, окрашенными и обработанными другими способами поверхностями. С помощью лазерной абляции удаляют поверхностный слой (покрытие), не затрагивая основной материал,

что создает отличный контраст. Эта техника пользуется популярностью для маркировки анодированного алюминия и окрашенных сталей.

Способ *лазерной обработки плавлением и испарением* относят к способам глубокой маркировки и гравировки. Они являются технологиями, основанными на тех же принципах испарения расплавленного материала. Тепловая энергия лазерного луча выборочно используется для расплавления и испарения материала. Требуемая глубина обработки достигается путем точного подбора параметров лазера. При помощи такой обработки можно послойно удалять материал и создавать трехмерную гравировку очень высокого качества и на значительную глубину.

Эффективность указанных выше методов лазерной обработки зависит от физических свойств материала. Цвет материала незначительно влияет на поглощение энергии лазера, хотя темные цвета поглощают чуть больше, чем светлые. Окраска поверхности также не имеет значения, поскольку обычно слой краски испаряется при воздействии лазерного излучения. Существенное влияние оказывает обработка поверхности – на гладкой поверхности легко читаема даже мелкая гравировка, тогда как поверхности с большой шероховатостью требуют глубокой, контрастной гравировки. Материалы с более высоким коэффициентом отражения требуют большей мощности излучения лазера. Изменение коэффициента поглощения в зависимости от температуры поверхности является еще одним параметром, который влияет на производительность. Высокая теплопроводность материала также нежелательна, поскольку это, как правило, приводит к отводу тепловой энергии от точки воздействия. Твердость материала не влияет на эффективность маркировки.

7.2.3.

ЛАЗЕРЫ ДЛЯ МАРКИРОВКИ И ГРАВИРОВКИ

Наиболее широко применяемыми лазерами для маркировки являются:

- импульсные Nd:YAG-лазеры с ламповой или диодной накачкой, работающие на длине волны 1.064 мкм или кратных гармониках 532, 355 и 266 нм;
- импульсные волоконные иттербиевые лазеры, работающие на длине волны 1.07 мкм;
- импульсные CO₂-лазеры, работающие на 10.6 мкм;
- эксимерные лазеры, работающие в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

CO₂-лазеры менее всего подходят для маркировки металлов вследствие малого поглощения излучения с длиной волны 10.6 мкм. Зато CO₂-лазеры успешно используются для маркировки неметаллических изделий, например, электронных компонентов, изделий из анодированного алюминия и других материалов, которые хорошо поглощают излучение на больших длинах волн, и в случаях, требующих большой мощности лазера.

Nd:YAG и волоконные иттербиевые лазеры более популярны для маркировки, поскольку их рабочая длина волны, находящаяся в диапазоне 1 мкм, хорошо совпадает с характеристиками поглощения большинства материалов.

Для благородных металлов, таких как золото, которые имеют низкую поглощательную способность на длине волны 1.0 мкм, можно использовать Nd:YAG-лазер с удвоением частоты, излучающий на длине волны 532 нм. Nd:YVO₄-лазеры с модуляцией добротности могут быть использованы там, где требуется высокая частота повторения (более чем 100 кГц). На рис. 7.4 показана лазерная маркировочная станция.



Рис. 7.4
Лазерная машина
для маркировки и гравировки
МЛП2 компании НПЦ «Лазеры
и Аппаратура ТМ» (Россия)

7.3.

ЛАЗЕРНАЯ МИКРООБРАБОТКА

Лазерная микрообработка является признанным лидером среди высокоточных микротехнологий. Большинство промышленных применений лазерной микрообработки основано на таких процессах обработки материала, как абляция и плавление, и включают в себя резку, сверление, сварку и маркировку. На рис. 7.5 продемонстрированы образцы лазерной микрообработки.

Лазерная микрообработка применяется к широкому спектру материалов:

- металлы (алюминий, сталь и нержавеющая сталь, молибден, медь, титан, платина, золото, серебро, никель, тантала, хрома и вольфрама);
- полупроводники (кремний, германий, арсенид галлия и нитрид галлия);
- керамические материалы (оксид алюминия, сыпучие и тонкопленочные кремниевые нитриды, карбид кремния, ниобат лития, цирконий и металлизированные керамики);
- диэлектрики (стекло, боросиликаты, натриевая известь, сапфиры, диоксид кремния, синтетические алмазы и волокно);
- полимеры (сложные полиэфиры, полиэтилен, полиамиды, полиимиды, полипропилен, полистирол, полиуретаны, силиконовые смолы);
- другие материалы (золь-гель, углеродные композиты и биоматериалы, такие как роговица глаза и белки).

Лазерная микрообработка находит широкое применение в автомобильной, космической, биомедицинской, электронной и других областях промышленности.

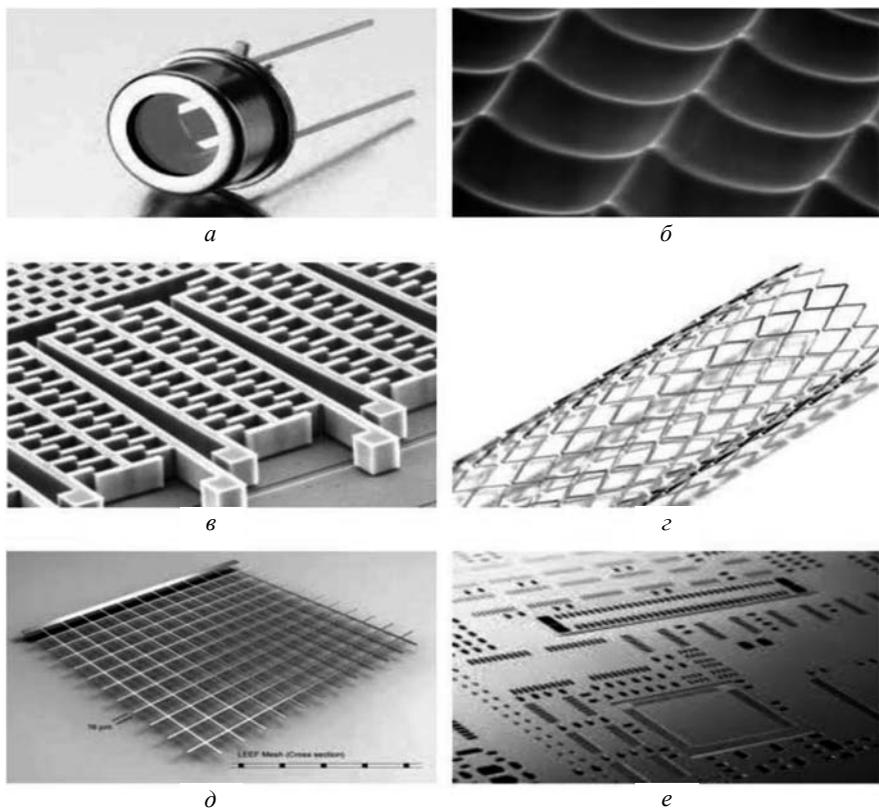


Рис. 7.5

Излучатель Планка (а), матрица микролинз (б), микроэлектромеханическая система для измерения скорости (в), стент (г), проволочная сетка для экранирования помех (д), шаблон для лазерной резки (е)

7.3.1.

ОПЕРАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКЕ

Операции микрообработки включают в себя, в первую очередь, микро сверление, микрорезку, микротокарную обработку, микросварку, маркировку и гравировку, скрайбирование и резку полупроводниковых пластин.

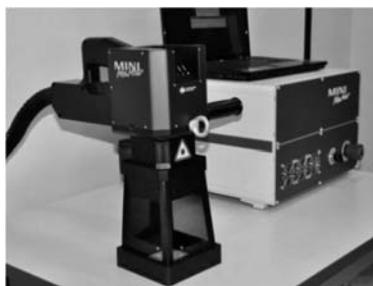
Лазерное микро сверление используется для создания системы микроотверстий, сопел, волноводов, межслойных переходных отверстий и фотогальванических ячеек в самых разнообразных материалах. При помощи лазерных технологий стали достижимы допуски на расположение отверстий и допуски на диаметр отверстий на уровне микрометра и менее. Микро сверление может быть использовано для получения микроотверстий в различных устройствах, включая устройства для впрыска топлива, форсунки струйных принтеров, оптоволоконные соединения, вертикальные зондовые платы, дозаторы, микроотверстия и щели

для научных приборов, датчики, топливные ячейки и медицинские приборы с очень высокими требованиями к точности диаметра отверстия и конусности.

Лазерная микрорезка хорошо подходит для микрообработки большинства материалов. Среди них металлы (например, нержавеющая сталь, закаленная сталь, медь, алюминий, вольфрам, латунь и титан), керамика (например, оксид алюминия, нитрид кремния, карбид вольфрама, ЦТС-керамика и цирконий), стекло и кристаллические материалы (BK7, плавленый кварц и сапфир), твердые материалы (такие, как алмазы), пластмассы (полиимиды, PTFE, PMMA и ABS). Лазерная микрорезка позволяет достигать малых размеров реза – шириной менее 1 мкм и глубиной менее 2 мкм.

Лазерная микрофрезеровка идеально подходит для широкого спектра приложений, включая производство микро пресс-форм и микроштамповки для инструментов, а также других микроэлементов. Суть лазерной микрофрезеровки проста. За каждый лазерный импульс удаляется очень небольшой объем материала. Лазерный луч сканируется по поверхности объекта, совершая много проходов и послойно удаляя материал до получения требуемого результата. При этом число импульсов определяет глубину обработки.

Лазерная микрогравировка и микромаркировка являются вариантом микрофрезеровки. Она используется для гравировки узоров и других форм на различных материалах. В микрогравировке и маркировке лазерный луч сканируется по поверхности материала, удаляя материал небольшими порциями за каждый лазерный импульс. Глубина обработки, как правило, контролируется количеством лазерных импульсов на каждую точку. Основными областями применения микрогравировки и микромаркировки является поверхностное микротекстурирование поверхности, декоративная гравировка и 2D штрих-коды. Новейшие установки для микрогравировки и микромаркировки могут гравировать на субмикронном уровне. Установки, представленные на рис. 7.6, являются такими системами.



а



б

Рис. 7.6

Лазерные установки для микрообработки: (а) МиниМаркер 2-P20/50 («Лазерный центр», Россия) и (б) MicroStar (Ohio Gravure Technologies, Inc., США)

Лазерное микроскрайбирование является особо точным видом обработки материалов, включая металлы, керамику и стекло. Также микроскрайбирование широко используется в качестве предварительной обработки перед микрорезкой полупроводниковых пластин. Процесс скрайбирования широко используется в электронной промышленности для микрорезки кремниевых пластин и керамических листов, а также в солнечной энергетике при резке фотоэлементов для солнечных батарей.

7.3.2. ЛАЗЕРЫ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ

Для микрообработки наиболее часто используют твердотельные лазеры с диодной накачкой, волоконные лазеры и эксимерные импульсные лазеры. Для микрообработки почти всегда применяются импульсные лазеры, поскольку они обеспечивают лучший контроль передачи энергии, чем непрерывные лазеры, которые могут легко расплавить, и тем самым повредить, микроэлементы. Кроме того, возможность управлять частотой повторения импульсов и их энергией в импульсных лазерах обеспечивает процессу микрообработки дополнительную гибкость. Также можно отметить, что более короткие длины волн являются предпочтительными для обработки изделий малых размеров.

Твердотельные лазеры для микрообработки следующие. Nd:YAG-лазеры с диодной накачкой и модуляцией добротности, работающие на длине волны 1064 нм (ближний ИК) и их гармоники 532 нм (видимый), 355 нм (ближний УФ) и 266 нм (УФ). Импульсные волоконные лазеры на стекле, легированном иттербием, работающие на длине волны 1070 нм. Эксимерные лазеры, работающие в УФ-диапазоне. Обычно используют эксимерные ArF-лазеры, работающие на длине волны 193 нм; KrF-лазеры, работающие на длине волны 248 нм; XeCl-лазеры, работающие на длине волны 308 нм и XeF-лазеры, работающие на длине волны 351 нм.

Большинство лазеров, предназначенных для микрообработки, имеют энергию импульса в диапазоне 1–500 мДж, длительность импульса от 10 нс до 10 мс, частоту повторения импульсов в диапазоне от 10 Гц до 500 кГц и среднюю мощность излучения 1–100 Вт.

7.3.3. МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

Существуют две основные категории методов лазерной микрообработки: фокусировки луча (метод непосредственного экспонирования) и проекция шаблона. В первом случае сканирование заготовки происходит либо путем перемещения заготовки, либо лазерного луча, либо путем комбинации двух взаимных перемещений.

В случае проекции шаблона лазерный луч освещает шаблон, который затем проецируется на заготовку для выполнения нужной операции микрообработки. Эти два метода кратко описаны ниже.

В случае *фокусировки луча* лазерный луч фокусируется на поверхность заготовки, а затем сканируется по поверхности. Диаметр фокального пятна в данном случае определяет наименьший размер заданной операции. На рис. 7.7 изображена схема работы лазера методом фокусировки луча.

В связи с требованием минимального фокального пятна для метода фокусировки луча, используются лазеры, имеющие высокую производительность при параметре качества луча $M^2 < 1.3$. Диаметр фокального пятна в этом случае составляет 5–10 мкм.

Основные преимущества метода фокусировки луча заключаются в большом выборе длин волн – от видимого до дальнего инфракрасного спектра; в высокой частоте повторения импульсов – от десятков до сотен килогерц; в большом выборе длительности импульса – от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд; в высоком разрешении метода. Таким образом, возможность регулировки параметров лазера в широком диапазоне делает процесс микрообработки достаточно гибким.

Метод проекции шаблона постоянно применяется во всех операциях микрообработки, требующих использования многомодовых эксимерных лазеров для достижения сверхвысокого разрешения микрообработки. Многомодовый характер излучения эксимерного лазера хорошо согласуется с методом проекции шаблона. Это обусловлено тем, что многомодовое излучение не может быть остро сфокусировано на заготовке, поэтому эксимерный лазер не может быть использован в качестве излучателя в методе фокусировки луча.

Отличительными особенностями метода проекции шаблона эксимерным лазером являются высокое разрешение, точное управление глубиной, отличная повторяемость результатов и большая площадь обработки образца. Основная концепция метода проекции шаблона проиллюстрирована на рис. 7.8.

Пучок излучения эксимерного лазера увеличивают в диаметре с помощью телескопической системы формирования, и затем пучок гомогенизируют, используя элементы мультиапертуры (массивы фасеточных линз), которые разделяют поступающий пучок на ряд элементарных лучей.

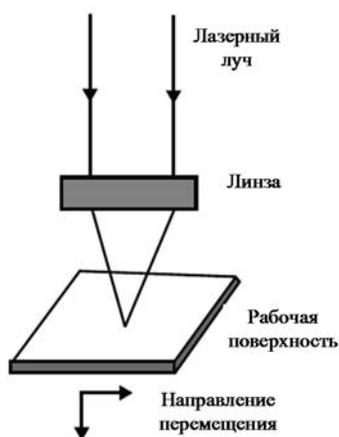
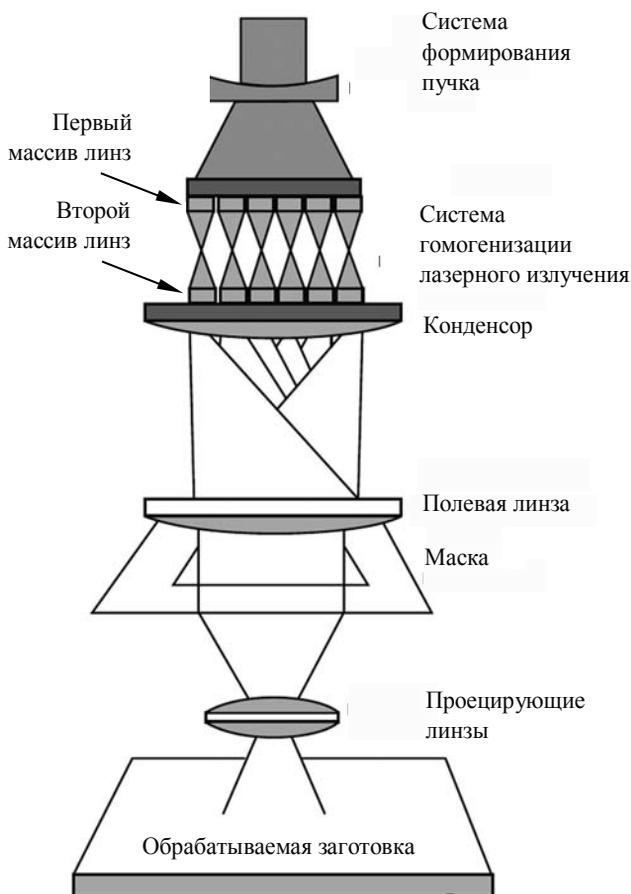


Рис. 7.7

Схема работы лазера по методу фокусировки излучения

**Рис. 7.8**

Концепция метода проекции шаблона

Элементарные лучи накладываются друг на друга с помощью дополнительно объектива. Преимуществами этих элементов являются независимость от входного профиля интенсивности и широкий спектр длин волн. Целью разделения луча является создание лазерного пучка с однородным распределением плотности энергии для освещения шаблона. Шаблон устанавливают в плоскости наилучшего по однородности распределения интенсивности лазерного излучения, и изображение шаблона проецируют на заготовку.

7.4.

ЛАЗЕРНАЯ ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Фотолитография – вид микропроизводственного процесса, в котором свет используется для передачи геометрического рисунка нанесенному на фотошаблоне светочувствительному материалу, называемому фоторезистом, либо на тонкую пленку или однородную подложку.

Фоторезист – это материал, затвердевающий под воздействием света. Принцип действия немного похож на фотографию. Фотолитография широко используется в полупроводниковой промышленности для изготовления сложных интегральных схем, в частности сверхбольших интегральных схем (СБИС). В современных системах используют ультрафиолетовое излучение эксимерных лазеров, таких как KrF- и ArF-лазеры.

7.4.1.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ

Процесс фотолитографии можно разделить на следующие этапы, выполняемые за одну итерацию:

1. Очистка кремниевой подложки (пластины).
2. Формирование маски из фоторезиста: нанесение на подложку, сушка.
3. Совмещение, экспонирование.
4. Проявление.
5. Травление.
6. Снятие фоторезиста.

На рис. 7.9 показаны этапы процесса фотолитографии.

На первом этапе кремниевая пластина предварительно очищается путем влажной химической обработки с использованием, например, растворов, содержащих перекись водорода, чтобы удалить любые органические или неорганические примеси, загрязняющие поверхность пластины. Затем на поверхности пластины осаждением формируется слой диоксида кремния (SiO_2).

После предварительной подготовки пластина покрывается тонким равномерным слоем фоторезиста толщиной 0.5–2.5 мм. Для этого подложка закрепляется вакуумным присосом на центрифуге. После нанесения нескольких капель резиста она вращается со скоростью 1200–4800 об/мин в течение 30–60 с. В результате получается равномерная пленка фоторезиста, у которой отклонения от средней толщины вдоль поверхности не превышает $\pm 10\%$. Выравнивающее действие центробежных сил приводит к образованию сверхгладких пленок с однородностью по толщине $\sim 1\%$, которую нельзя получить каким-либо другим способом.

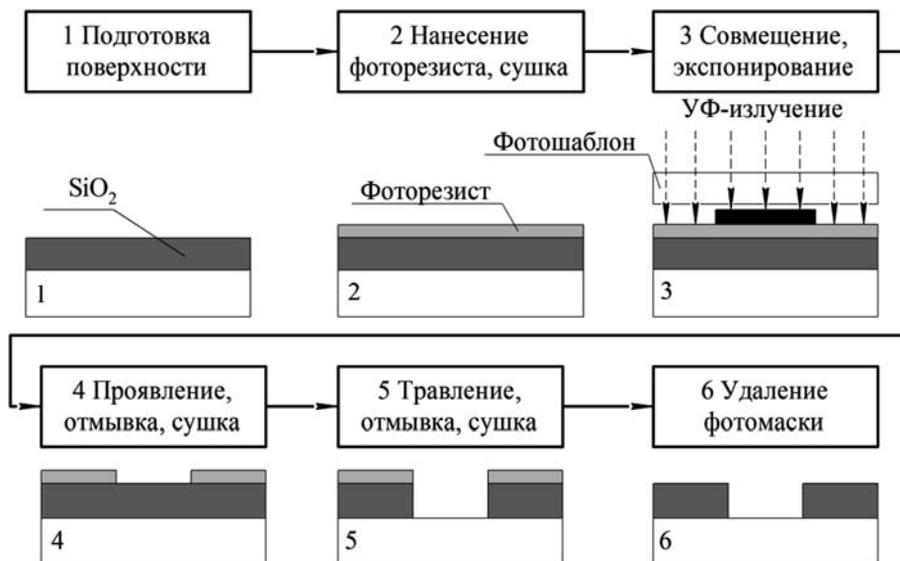


Рис. 7.9

Типичные технологические этапы литографии

Под воздействием УФ-излучения фоторезистовое покрытие претерпевает изменения в химической структуре и либо становится растворимым в растворе проявителя, либо полимеризуется и становится очень трудно растворимым.

Существует два типа фоторезистов: позитивные и негативные. В негативных фоторезистах под воздействием света происходит полимеризация мономерных молекул с образованием полимерных молекул. В результате этого растворимость фоторезиста на облученных участках уменьшается, и после проявления они остаются на поверхности подложки. Проявление скрытого изображения для негативных фоторезистов заключается в обработке фоторезиста органическим растворителем (толуол, диоксан, хлорбензол, трихлорэтилен и др.).

В позитивных фоторезистах в результате реакции распада под воздействием света происходит разрыв связей в молекулах полимеров, и на облученных участках растворимость фоторезиста увеличивается. В позитивных фоторезистах продукты распада полимера обладают кислотными свойствами, и для перевода их в растворимую форму применяют растворы на основе неорганических щелочей (например, 0.1–10% растворы KOH , NaOH в H_2O) или 1–2% раствор тринатрий-фосфата (Na_3PO_4). При проявлении позитивных фоторезистов облученные участки удаляются, а необлученные остаются на подложке.

Позитивные фоторезисты применяются более широко, чем негативные, поскольку они позволяют лучше управлять процессом создания изделий с малыми размерами. Позитивные фоторезисты особенно часто используются при изготовлении больших (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС). На рис. 7.10 показана последовательность этапов процесса фотолитографии для позитивных и негативных фоторезистов соответственно.

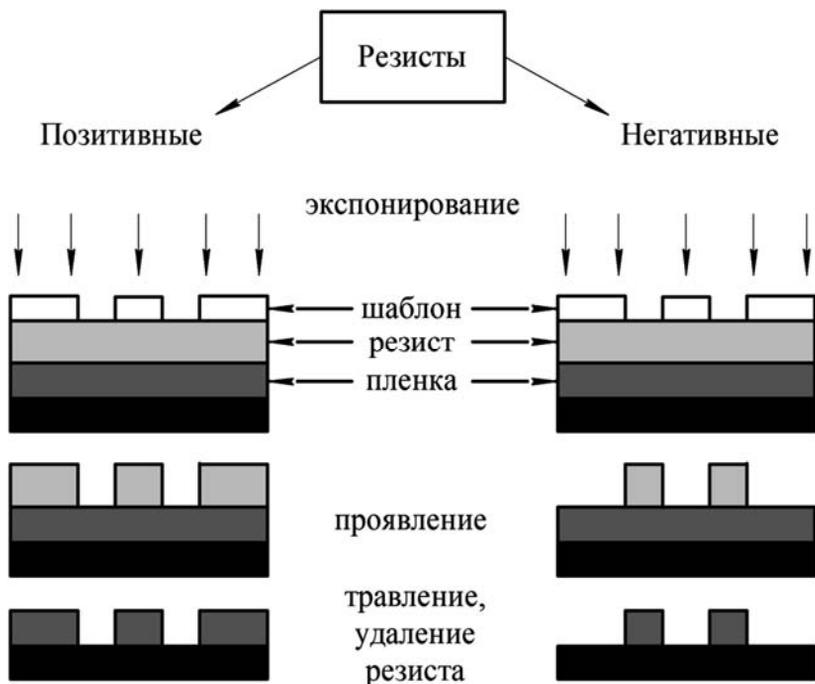


Рис. 7.10
Позитивные и негативные фоторезисты

Покрывая фоторезистом пластина затем подвергается предварительному «задубливанию». Для этого она выдерживается при температуре 90–100 °С в течение 30–60 секунд. Покрывая фоторезистом пластина становится светочувствительной только после прохождения такой фазы задубливания. Нарушение времени или температуры может ухудшить светочувствительность фоторезиста из-за снижения реакции на проявитель или уничтожение части светочувствительного слоя.

Затем приступают к установке шаблона и экспонированию кремниевой пластины под интенсивным ультрафиолетовым лазерным излучением. Различают контактный, бесконтактный и проекционный способы фотолитографии (рис. 7.11).

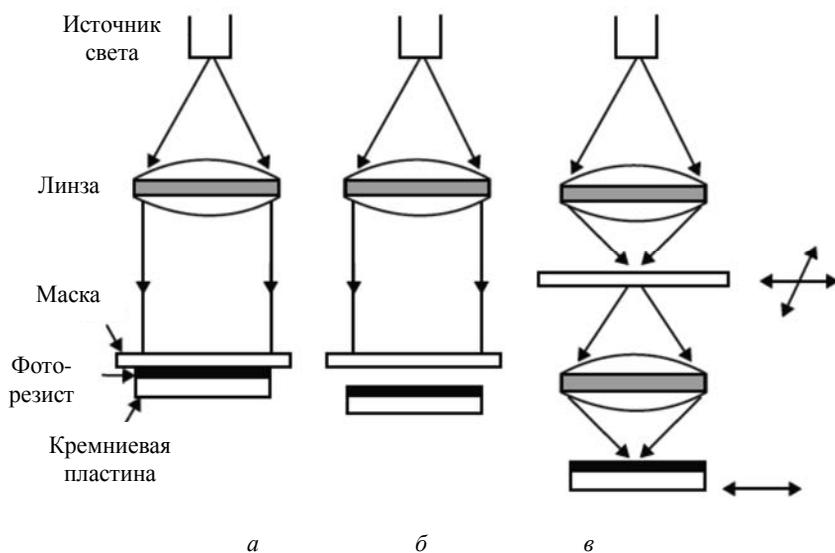


Рис. 7.11

Способы фотолитографии:
контактный (а), бесконтактный (б), проекционный (в)

При *контактном способе* фотошаблон и пластина с нанесенным фоторезистом соприкасаются. Пластина устанавливается на вакуумном держателе, который поднимает ее до тех пор, пока пластина и шаблон не придут в соприкосновение друг с другом. В этом положении проводится проверка на точность совмещения. Время экспонирования подбирают экспериментально, обычно в пределах 15–20 с. Вследствие тесного контакта между фоторезистом и шаблоном при контактной печати значения разрешения выше, чем при других методах литографии и составляет порядка 0,1 мкм. На рис. 7.11, а показана схема контактной литографии.

Способ бесконтактного экспонирования схож с методом контактной печати, но во время экспонирования между пластиной и шаблоном поддерживают небольшой зазор около 10–25 мкм. Этот зазор уменьшает возможность повреждения поверхности шаблона. Однако дифракция света снижает разрешающую способность и ухудшает четкость изображения. При бесконтактной печати величина разрешения составляет порядка 2–4 мкм. На рис. 7.11, б показана схема бесконтактной литографии.

При *проекционном способе* контакта фотошаблона с пластиной нет, что исключает возможные его повреждения. Кроме этого, проекционный метод упрощает процесс совмещения фотошаблона и позволяет осуществить совмещение точнее, чем при использовании контактного метода.

Проекционную фотолитографию осуществляют либо одновременной передачей всех элементов топологии на пластину, либо поэлементным (пошаговым) проецированием отдельных ее фрагментов с помощью сфокусированного лазерного пучка, управляемого от компьютера. Для достижения высокого разрешения отображают только небольшую часть рисунка шаблона. Затем шаблон и пластина синхронно перемещаются.

С помощью этого метода достигается разрешение порядка 1–1.5 мкм для ширины линий и расстояния между ними. В большинстве современных проекционных систем оптические элементы являются достаточно совершенными, и их характеристики точности отображения ограничены дифракционными эффектами, а не абберацией линз. На рис. 7.11, в показана схема проекционной литографии.

Для улучшения контрастности после операции экспонирования до проявления фоторезист сушат, чем достигается его однородная плотность. Далее приступают к проявлению фоторезиста.

Проявление позитивных фоторезистов проводят путем удаления облученных участков с помощью сильно разбавленных растворах щелочей КОН и NaOH (0.1–10% в H₂O) или 1–2% раствора тринатрийфосфата (Na₃PO₄). Проявление негативных фоторезистов – растворением необлученных участков в органических растворителях (толуол, диоксан, хлорбензол, трихлорэтилен и др.). Кроме химических методов, используют также плазмохимическую обработку поверхности кислородной плазмой.

Повторная операция «задубливания» фоторезиста является последним шагом в процессе фотолитографии. Пластины выдерживают при температуре 120–180 °С в течение 20–30 мин. Оставшийся фоторезист окончательно затвердевает, и его адгезия к подложке улучшается, что облегчает последующие операции травления или ионной имплантации.

7.4.2.

ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

В 1960-х и до середины 1980-х оборудование для фотолитографии состояло из газоразрядных ламп, наполненных либо ртутью, либо смесью ртути и инертного газа (обычно ксенона), в качестве источника ультрафиолетового излучения. Широкополосное излучение от этих ламп имеет сильные пики в ультрафиолетовом диапазоне, которые могут быть отфильтрованы до одной линии спектра. Спектральные линии ртутных ламп включают *g*-линию на 436 нм, *h*-линию на 405 нм, и *i*-линию на 365 нм.

В середине 1980-х фотолитографическое оборудование на ртутных лампах начали заменять системами, использующими эксимерные лазеры. Эксимерные лазеры значительно улучшили разрешение и позволили тем самым производить более быстрые и более плотно скомпонованные микросхемы, благодаря работе



Рис. 7.12

Установка безмасковой лазерной литографии типа DWL 66+ компании Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH (Германия)

в области коротких длин волн УФ-диапазона, а также привели к снижению эксплуатационных расходов за счет увеличения производительности.

Эксимерные лазеры для литографии на сегодняшний день способны производить изделия размером 25 нм, а к 2020 году будут способны достигнуть размеров 10 нм.

Наиболее широко в литографии применяют эксимерные ArF- и KrF-лазеры с длинами волн 193 нм и 248 нм соответственно.

Ранее считалось, что F₂ эксимерный лазер, излучающий на 157 нм, способен достигнуть более высокого разрешения, чем ArF- и KrF-лазеры.

Другие эксимерные лазеры, такие как XeCl и KrCl, не используются в фотолитографии.

Первый – в связи с невозможностью достичь требуемого разрешения, второй требует новых технологий производства фоторезистов. На рис. 7.12 изображена установка для фотолитографии на основе эксимерного лазера.

7.5.

ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ

Очистка является одним из базовых элементов технологического процесса формирования конечного изделия перед нанесением покрытий или выполнением технологических операций, а также элементом производственного цикла изделия – очистка от производственных загрязнений разного рода, очистка от старых покрытий и т.п. Кроме этого, необходим целый ряд специальных типов очистки, например, от биологических и радиационных загрязнений.

Очистка в общем виде представляет собой операцию удаления поверхностных слоев изделия, образованных какими-либо загрязнениями или покрытиями, а иногда даже включая поверхностный слой самого основного материала.

Все известные методы механической и химической очистки имеют ряд недостатков, в частности, нежелательное воздействие на основной материал изделия или плохие экологические параметры процесса. Поэтому очистка часто остается серьезной проблемой для целого ряда производств.

Основным преимуществом лазерного излучения является то, что световой пучок быстро нагревает тонкий поверхностный слой материала, который испаряется

без заметного воздействия на расположенные ниже слои, при этом практически не происходит термического разложения материала покрытия с образованием нежелательных или токсичных веществ.

Кроме того, при лазерном воздействии в приповерхностном слое возникают термоупругие напряжения и ударные акустические волны, за счет которых покрытия и загрязнения дополнительно отслаиваются от поверхности.

Основным препятствием развития технологий лазерной очистки считаются экономические проблемы (стоимость) и производительность процесса. Однако лазерные методы очистки давно успешно используются для очистки музейных ценностей, т. е. там, где стоимость и производительность не играют определяющей роли.

7.5.1. ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП

Для осуществления процесса очистки излучение импульсного лазера фокусируют на поверхности детали (рис. 7.14), причем режимы генерации и размер пятна выбирают так, чтобы плотность мощности излучения за время импульса приводила к быстрому повышению температуры поверхностного слоя до температуры его быстрого разрушения (испарения или сублимации). Ориентировочная величина такой плотности мощности составляет 10^7 - 10^{10} Вт/см².

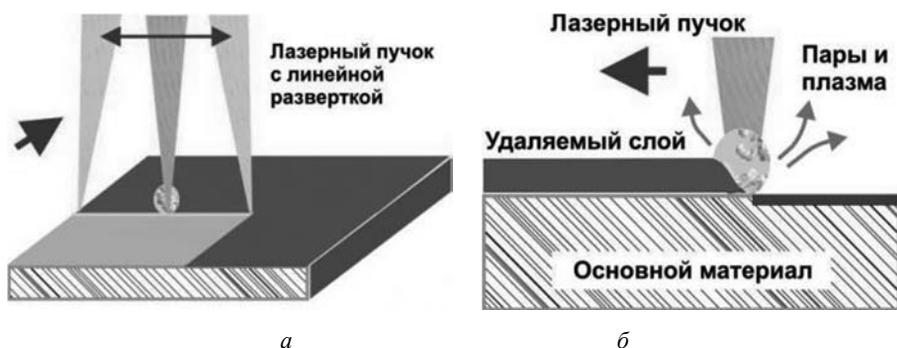


Рис. 7.13

Принципы лазерной очистки:

а – физические процессы на поверхности; б – сканирование лазерного пучка

Для полной обработки поверхности обычно применяют сканирующие системы с высокой скоростью. Общая производительность будет зависеть от мощности лазера, частоты импульсов, толщины и состава удаляемого слоя, в частности, существенную роль могут иметь поглощающие свойства поверхности.

На сильном различии степени поглощения лазерного излучения загрязнениями и основным материалом основаны некоторые специальные методы лазерной очистки – так, музейные экспонаты из мрамора и других камней очень эффективно очищаются излучением CO_2 -лазеров с длиной волны 10.6 мкм, поскольку длинноволновое излучение эффективнее поглощается загрязнениями органического характера, которые удаляются даже из микротрещин. Проводить очистку музейных экспонатов стало более удобно и высокопроизводительно с появлением волоконных лазеров (рис. 7.14, 7.15, вкл. ил. 3).



Рис. 7.14
Лазерная очистка
скульптуры

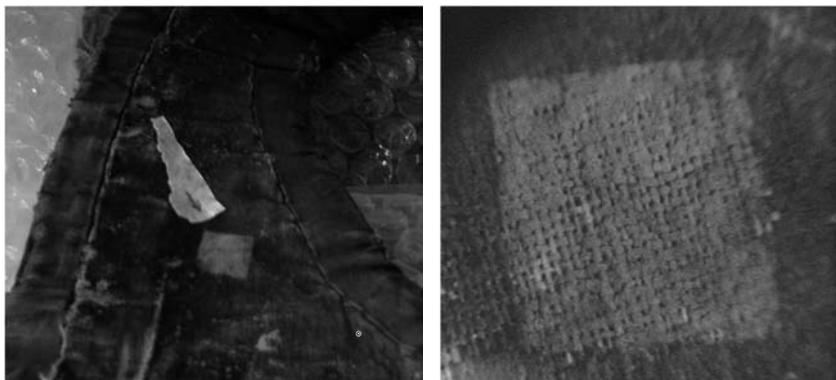


Рис. 7.15

Скульптура «Зефир, качающийся на ветке»
из собрания Государственного музея-заповедника «Царское село»
перед началом очистки, в процессе лазерной очистки в ООО «Ресстрой» (С.-Петербург)
и после завершения очистки с помощью установки SmartClean II

Параллельно с этим существует еще как минимум одно не менее интересное направление в применении лазерных технологий. Это изготовление высокоточных копий памятников в масштабе или в натуральную величину. Такой подход позволяет кардинальным образом изменить современные представления о воссоздании архитектурных деталей, предметов скульптуры и декоративно-прикладного искусства. Ведь в данном случае не только тиражируется объект в точной копии, но, что не менее важно, воспроизводится в историческом материале.

Еще одним важным направлением лазерной очистки является очистка исторических артефактов. Обычно применяют твердотельные лазеры, генерирующие на длине волны 532 нм. Для выполнения операции достаточно 10 импульсов длительностью 5–8 нс при плотности мощности 0.1–0.5 Дж/см² (рис. 7.16, 7.17, вкл. ил. 4).

**Рис. 7.16**

Лазерная очистка текстиля

**Рис. 7.17**Лазерная чистка бумаги
(пергамента)

Однако наибольшее распространение лазерная очистка нашла в машиностроении. К числу наиболее ярких ее применений можно отнести очистку поверхности пера лопатки турбин. Применение мобильных лазерных установок для выполнения очистки делает возможным производить очистку без демонтажа лопаток. Это существенно сокращает время выполнения регламентных работ, а также исключить работы по сборке и балансировке ротора турбины (рис. 7.18).



Рис. 7.18

Турбинная лопатка до и после лазерной очистки
(ООО «НПП «Лазерные технологии», Россия)

Еще одним весьма важным направлением лазерной очистки является дезактивация радиационно-загрязненных металлических поверхностей. Следует отметить, что, как правило, радионуклиды при поверхностных загрязнениях располагаются в окисных пленках, образующихся на металлических поверхностях, поэтому задача дезактивации сводится к удалению окисных пленок с поверхности и их улавливанию с последующей утилизацией (рис. 7.19).



Рис. 7.19

Мобильный комплекс для дезактивации на базе YAG-лазера с системой сканирования
(ООО «НПП «Лазерные технологии», Россия)

7.5.2. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ

В настоящее время применяют следующие основные механизмы лазерного удаления поверхностных слоев:

- испарительные механизмы лазерной очистки;
- ударно-механическая лазерная очистка;
- влажная лазерная очистка.

Испарительный механизм. В основе этого механизма лежит эффект испарения, то есть перевод материала непосредственно из твердой фазы в пароплазменную фазу с минимальным образованием жидкой фазы. Такой механизм применяют для удаления ржавчины, окалины, окислов и т.д.

Для реализации испарительного режима применяют, как правило, импульсное лазерное излучение с длительностью отдельного импульса в несколько десятков наносекунд и высокой пиковой мощностью при энергии в импульсе несколько миллиджоулей и частоте их следования более 10 кГц. Это обеспечивает плотность мощности в зоне обработки 10^7 – 10^{10} Вт/см² при диаметре сфокусированного пятна пучка лазера около 500 мкм.

Существуют особенности лазерной очистки в испарительном режиме с использованием эксимерных лазеров. Длина волны их излучения лежит в ультрафиолетовом диапазоне, что определяет малую глубину проникновения излучения в большинство металлов. Кроме того, при малой длине волны излучения фотон обладает энергией, которая достаточна для разрыва межатомных связей в молекулах многих загрязнителей.

В результате вещество удаляется в виде плазмы. При этом большая часть энергии удаляется вместе с испаряемым слоем материала, не превращаясь в тепло. В таком режиме воздействия не происходит существенного нагревания материала, поэтому его называют «холодной» абляцией. Такой тип очистки используется в тех случаях, когда недопустимо тепловое воздействие на основной материал, например, в реставрационных работах с объектами живописи.

Ударно-механическая лазерная очистка. В основе этого механизма лежит эффект быстрого теплового расширения пленок или поверхностных слоев основного материала при поглощении лазерного излучения и возникновение вследствие этого ударной волны в материале, а также взрывное удаление имеющихся газов и образующихся паров (рис. 7.20).

В результате лазерного нагрева происходит термическое расширение поверхностного слоя. При отсутствии изменения его размеров указанное термическое расширение приводит к возникновению напряжения сжатия. Энергия сжатия пленки расходуется на преодоление сил ее адгезии к основному металлу и преобразование в кинетическую энергию движения фрагментов слоя, оторвавшихся от поверхности. Превышение сил адгезии также может произойти и в результате

повышения давления в полости между пленкой и подложкой при нагревании, например, из-за десорбции газов, при газификации тонкого приповерхностного слоя основного материала в случае, когда он менее термостоек, чем материал пленки и т. д.

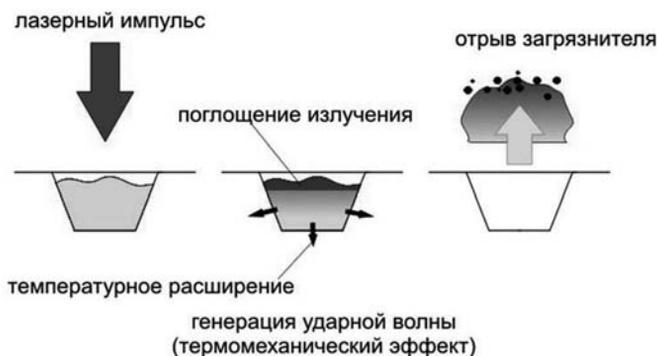


Рис. 7.20

Ударно-механическая лазерная очистка

Режимы лазерного удаления пленки с поверхности твердого тела зависят от упругих свойств материала приповерхностного слоя и его структуры.

Лазерная очистка в жидкости. При лазерной очистке поверхность перед обработкой покрывают тонким слоем жидкости (рис. 7.21). Поглощение лазерного излучения в основном материале во время обработки приводит к тому, что жидкость вблизи его поверхности нагревается до температуры, превышающей температуру ее кипения при нормальном давлении. Это инициирует объемное (пузырьковое) кипение, что обуславливает разрушение и вынос загрязнения.

При импульсном режиме генерации после прекращения воздействия импульса излучения энергетическая поддержка паровых пузырьков прекращается, вследствие теплопроводности в окружающую их жидкость пузырьки уменьшаются в размере и схлопываются. Совокупное схлопывание (сброс давления) пузырьков приводит к возникновению ударной волны в жидкости, которая, распространяясь вглубь материала, вызывает разрушение загрязняющего слоя и выброс жидкости и образующихся продуктов очистки.

7.5.3.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ

Для лазерной очистки поверхности традиционно применяются газовые CO_2 - и твердотельные YAG-лазеры. В последнее время все шире начинают применять волоконные Yb-лазеры. Достаточно высокое качество лазерного излучения волоконных лазеров открывает возможность применять длиннофокусную оптику (фо-

кусное расстояние до 2 м), что позволяет реализовать режим дистанционной обработки. Кроме того, это существенно упрощает интеграцию лазерного оборудования в современные роботизированные комплексы.

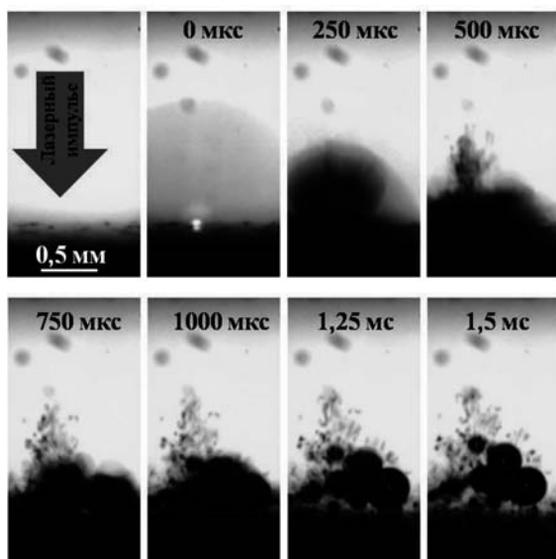


Рис. 7.21

Процесс лазерной очистки при толщине слоя жидкости 2 мм.
Плотность мощности лазерного излучения $2 \cdot 10^8$ Вт/см²

В настоящее время на базе волоконных лазеров создаются как стационарные лазерные установки и комплексы, так и мобильные или переносные системы (рис. 7.22, 7.23). Характерные данные по очистке различных материалов и различных покрытий и загрязнений, полученных на описанном лазере мощностью 10 Вт, приведены в табл. 7.2. При повышении мощности лазера производительность может быть увеличена в соответствующее число раз.



Рис. 7.22

Лазерная установка «LaserEcoClean» для очистки анилоксовых валов
(Компания «ЛазерЪ», Россия)



Рис. 7.23

Мобильная установка («Лазерный ранец») лазерной очистки (представлена компанией «Центр компетенции систем промышленной автоматизации», Россия)

Таблица 7.2

Лазерная очистка некоторых материалов

Материал	Покрытие/ загрязнение	Ориентировочная производительность, м ² /ч
Металлы и сплавы	Окисные пленки	0.3...0.6
Сталь	Ржавчина с толщиной слоя до 100 мкм	0.15...0.3
Металлы и сплавы	Масла и прочие консерванты	2...5
Металлы и сплавы	Краска порошковая, слой 50..100 мкм	0.2...0.4
Сварные швы перед покраской	Окисные структуры и остатки окалины	0.1...0.4
Пресс-формы	Сложные загрязнения от технологического процесса	0.3...0.5

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 7

7.1. Высокая концентрация подводимой энергии позволяет производить поверхностную обработку без нагрева остального объема изделия, что приводит к минимальному короблению деталей.

7.2. Возможность широкого регулирования параметров лазерного излучения позволяет реализовать ряд специальных методов поверхностной обработки материалов, к которым относятся лазерная термообработка, оплавление поверхности, получение покрытий, ударное воздействие, инициирование поверхностных химических реакций, лазерная маркировка, очистка поверхностей и др.

7.3. Отсутствие механических усилий, что дает возможность обрабатывать хрупкие изделия.

7.4. Возможность транспортировки излучения на значительные расстояния и подвод его в труднодоступные места.

7.5. Высокая производительность процессов.

7.6. Возможность обработки на воздухе, легкость автоматизации процессов, отсутствие вредных отходов при обработке, что определяет высокую технологичность лазерного луча.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 7

7.1. Назовите наиболее важные области применения лазерной поверхностной обработки.

7.2. Какая плотность мощности лазерного излучения необходима для осуществления поверхностной обработки?

7.3. В чем состоит отличие закалки без фазового перехода от закалки с фазовым переходом?

7.4. Какие процессы лежат в основе лазерной маркировки?

7.5. На каких процессах обработки материала основана лазерная микрообработка?

7.6. Какой механизм лазерной очистки является предпочтительным?

7.7. В чем состоят преимущества лазерной поверхностной обработки?

7.8. Какие недостатки имеет лазерная поверхностная обработка?

7.9. Опишите принципиальные схемы лазерной поверхностной обработки.

7.10. Каковы перспективы поверхностной лазерной обработки?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 7

7.1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие для вузов / ред. Григорьянц А. Г.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 663 с.

7.2. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.

7.3. Вейко В.П., Петров А.А. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Раздел: Введение в лазерные технологии.– СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 143 с.

7.4. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.

7.5. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / Под общей редакцией В.П. Вейко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 141 с.

ГЛАВА 8

ГЛУБОКАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

8.1. ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ГЛУБОКОЙ ОБРАБОТКИ

Наиболее массовой областью использования лазерной техники в технологии является лазерная глубокая обработка материалов, в основе которой лежит в большинстве случаев интенсивное тепловое воздействие лазерного излучения. Лазерное излучение можно применять для проведения целого перечня основных технологических процессов – резки, сварки, прошивки отверстий и др.

Локальность воздействия позволяет сконцентрировать лазерное излучение мощностью киловаттного уровня в объеме от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. При этом воздействие осуществляется в ограниченной зоне без нагрева остального объема и нарушения его структуры и потери свойств.

При использовании лазера больше возможностей для регулирования параметров обработки в очень широком интервале режимов (табл. 8.1): легкость автоматизации процесса, возможность обработки на воздухе, исключение механического воздействия на обрабатываемый материал, отсутствие вредных отходов, возможность транспортировки излучения.

Луч лазера как технологический инструмент не подвержен износу в отличие от инструментов механической обработки. Прецизионность обработки обеспечивается современными компьютерными системами управления и точными механизмами перемещения и позиционирования: роботами и специализированными координатными столами, которые обеспечивают точность позиционирования, соизмеримую с размером луча в зоне обработки, от сотен микрометров до единиц микрометров. При этом обеспечивается обработка широкого диапазона толщин и марок материалов, а также различные типоразмеры и геометрическая сложность деталей.

Таблица 8.1

Параметры глубокой лазерной обработки

Вид обработки	Плотность мощности, Вт/см ²	Время действия импульса, с	Режим технологического процесса
Сварка	10^6-10^7	$10^{-5}-10^{-2}$	Плавление
Пайка	$\leq 10^7$	$10^{-5}-10^{-2}$	Плавление
Резка	$\leq 10^8$	$10^{-8}-10^{-2}$	Плавление + испарение
Сверление	$\leq 10^9$	$10^{-8}-10^{-2}$	Испарение
Скрайбирование	$\leq 10^9$	$10^{-9}-10^{-5}$	Испарение

8.2. ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА

Лазерная технология позволила создать новые промышленные процессы, которые ранее было невозможно осуществить с помощью обычных механических операций. Использование лазерного излучения для резки материалов является на сегодня одним из наиболее широко используемых промышленных применений лазеров (рис. 8.1). Отсутствие контакта инструмента с заготовкой при лазерной резке уменьшает загрязнение материала, а малый размер пятна лазерного излучения создает очень чистый срез, который практически не требует дополнительной обработки после резки.

8.2.1. ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП

Мощное лазерное излучение импульсно-периодического или непрерывного лазера фокусируют в предполагаемом месте резки, на поверхности обрабатываемой детали, с помощью фокусирующей оптики. Диаметр сфокусированного пятна обычно составляет 25–100 мм для резки тонких деталей и 100–300 мм для резки толстых деталей. Энергия лазера преобразуется в тепловую энергию, которая локально расплавляет материал по всей глубине. Диаметр локализованного расплава, как правило, меньше 0.5 мм. Расплавленный материал удаляют из области реза с помощью газовой струи, которую подают в зону обработки под давлением.

Газовую струю направляют обычно соосно с лазерным лучом, чтобы ускорить процесс резки. Кислород и воздух, как правило, используется для резки металлов и их сплавов. Воздух используют для обдува при резке пластиков и тканей.

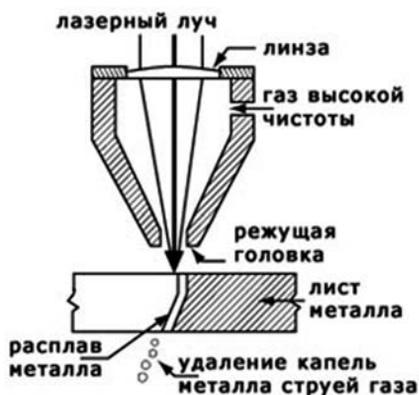
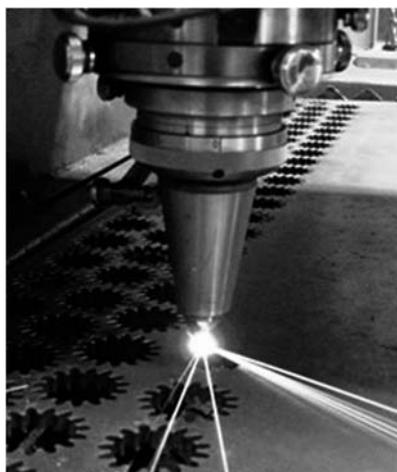


Рис. 8.1

Процесс лазерной резки

В случае резки некоторых металлов, когда требуется, чтобы передний край оставался неокисленным и с минимальным образованием окалины, используют инертный газ высокого давления. Перемещение лазерного луча осуществляют либо путем его сканирования относительно неподвижной обрабатываемой заготовки, либо перемещением заготовки относительно неподвижного лазерного луча. Выше приведённый рис. 8.1 показывает схематическое изображение процесса лазерной резки.

8.2.2 СПОСОБЫ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Технология лазерной резки сегодня хорошо известна и широко используется в промышленности для резки черных и цветных металлов, а также неметаллов, таких как полимеры, керамика, стекло, дерево и ткань. Например, при использовании CO_2 -лазера мощностью 1500 Вт можно резать мягкую сталь толщиной 2.5 мм со скоростью 7.5 м/мин или 5-мм акриловый лист со скоростью 12 м/мин. Существует целый ряд различных методов, которые используют в зависимости от обрабатываемого материала. Обычно используются следующие способы для лазерной резки:

- резка с удалением расплава струей газа;
- резка в режиме испарения или кипения;
- химическое разложение или горение;
- резка в режиме окисления;
- термораскалывание;
- скрайбирование.

В случае *резки с удалением расплава струей газа*, сфокусированный лазерный луч нагревает материал до температуры плавления. Затем газовая струя высокого давления удаляет расплавленный материал из зоны резки. При обдуве материала газовой струей, температура материала фактически не поднимается выше требуемых для процесса значений. Это определяет качество поверхности реза. Качество реза определяется шероховатостью его поверхности. Она отличается для различных зон по толщине металла. Лучшее качество характерно для верхних слоев разрезанного металла, наихудшее – для нижних слоев. Нижний край разреза, кроме того, может иметь остаток повторно затвердевшего расплава (шлака), поскольку не весь расплав сдувается из зоны резки. Это наблюдается при больших толщинах материалов.

В случае *резки в режиме испарения или кипения*, сфокусированный лазерный луч нагревает поверхность материала до точки кипения и создает узкий канал реза. Образовавшиеся пары металла и кипящий металл сдуваются из зоны резки с помощью газовой струи. В процессе удаления часть паров оседает на срезах краях. Если скорость газовой струи меньше некоторого максимального значения, пары металла затвердевают, оставляя глянцевые края реза. При более высокой скорости обдува застывший слой становится матовым. Этот метод используют для резки плексигласа и акрила.

Методика резки, основанная на *химическом разложении или горении*, наиболее применима для резки термореактивных пластмасс, таких как эпоксидные и фенольные смолы, кевлара и изделий из натурального каучука.

Метод *резки в режиме окисления*, известный также как газовая или реактивная резка, представляет собой сочетание двух рассмотренных выше способов – сдува расплава и химического разложения в струе кислорода. Оборудованием для резки является газовая горелка с лазером в качестве источника воспламенения. Эта техника часто употребляется для резки мягких и углеродистых сталей.

Применение этого метода позволяет разрезать толстые листы стали с высокой скоростью и получать высококачественные кромки реза без образования окалины. Скорость резки CO₂-лазером мощностью 1500 Вт может достигать 1 м/мин при резке листа из низкоуглеродистой стали толщиной 10 мм. Кислород в газовой струе реагирует с железом, содержащимся в стали, что приводит к образованию оксида железа. Химическая реакция выделяет тепло, что ускоряет процесс резки.

Окисленный расплав имеет более низкую температуру плавления, чем сталь. Он не прилипает к стенкам канала резки, и поэтому сдувается кислородной струей. Это препятствует образованию окалины на кромках реза.

Термораскалывание (раскалывание под действием термических напряжений) в первую очередь подходит для хрупких материалов, которые особенно чувствительны к тепловой деформации. Сфокусированный лазерный луч вызывает локализованный нагрев поверхности, создавая тепловое расширение. Это приводит к образованию трещины, направление образования которой управляется при перемещении лазерного луча вдоль поверхности. С помощью этого метода разрезают стекло по сложному контуру.

Скрайбирование обычно используется для резки кремниевых пластин на чипы и резки тонких листов керамики, используемых в производстве подложек для микроэлектронных устройств. Скрайбирование представляет собой сверление цепочки мелких глухих отверстий. Для этой цели обычно используется импульсный Nd:YAG-лазер. Просверленные вдоль линии реза отверстия, позволяют отламывать заготовки вдоль линий. Скорости скрайбирования на порядок выше скорости сквозной резки и может достигать 20 м/мин.

8.2.3.

УСТРОЙСТВО СТАНКОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

В зависимости от механизма перемещения лазерного луча по поверхности обрабатываемой детали, лазерные станки исполняют в следующих конфигурациях:

1. Станки с движущейся платформой и неподвижно закрепленной обрабатываемой деталью (рис. 8.2).
2. Станки с плавающей («летающей») оптикой (рис. 8.3).
3. Гибридные станки (рис. 8.4).

Для станков с подвижной платформой режущий луч является неподвижным, а заготовка перемещается под ним в направлении X - Y . Эта конфигурация станка характеризуется постоянным расстоянием от лазерной головки до заготовки, постоянным местом удаления отходов резки и относительно простой оптикой. К недостаткам можно отнести скорость резки, которая является самой медленной из всех конфигураций, а также зависимость динамики работы станка от размера заготовки. На рис. 8.5, *a* показан один из таких станков.

У станков с плавающей оптикой в направлении X - Y перемещается лазерная головка. При этом заготовка, расположенная на неподвижной платформе, также неподвижна. Эта конфигурация станка характеризуется высокой скоростью резки (самой высокой из всех категорий). Поскольку движущаяся масса (т. е. масса лазерной головки) постоянна, на скорость движения оборудования не влияет изменение размера обрабатываемой детали. Кроме того, заготовку можно дополнительно не закреплять.

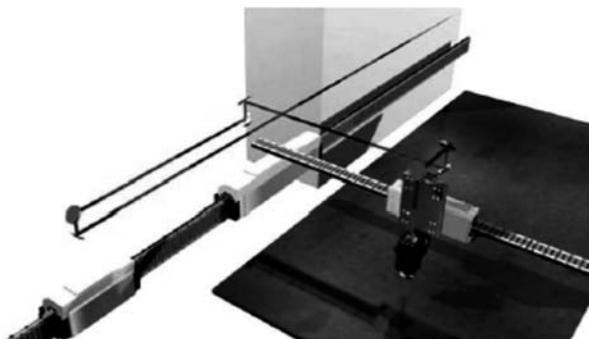


Рис. 8.2
 Схема станка
 с движущейся платформой
 и неподвижно закрепленной
 обрабатываемой деталью

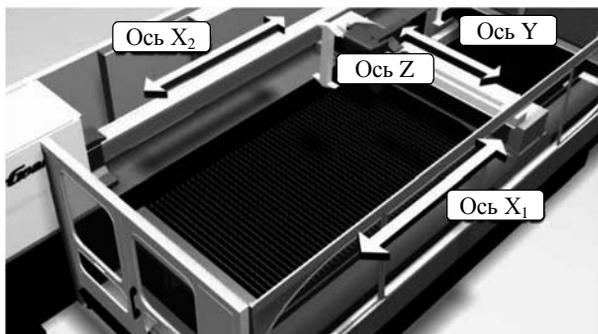


Рис. 8.3
 Схема движений станка
 с «летающей» оптикой

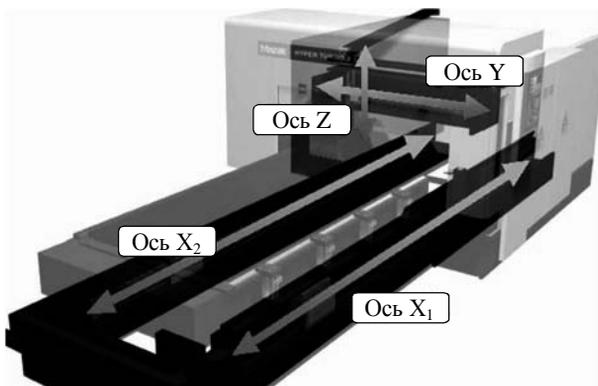


Рис. 8.4
 Схема движений станка
 гибридного типа

**Рис. 8.5**

Станок лазерной резки МЕТАЕ-серии компании Coherent Inc. (а); станок лазерной резки OMNIBEAM-серии (с плавающей оптикой) компании Coherent Inc (б)

Существует, однако, изменение длины пути луча за счет перемещения лазерной головки, которое может быть учтено посредством применения соответствующей оптики. На рис. 8.5, б показан станок лазерной резки с плавающей оптикой.

Гибридный станок представляет собой сочетание двух вышеуказанных конфигураций. В этом случае стол с заготовкой перемещается только в горизонтальном направлении, как правило, в X-направлении, а лазерная режущая головка перемещается в направлении короткой оси Y. Станки в данной конфигурации имеют преимущества рассмотренных выше станков с перемещением стола и станков с плавающей оптикой. Они характеризуются более простой оптикой доставки излучения и меньшими потерями мощности излучения, по сравнению со станками с плавающей оптикой.

8.3.

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

Для сварки лазерное излучение фокусируется на поверхности обрабатываемой детали. Сконцентрированная в фокальном пятне световая энергия поглощается материалом и преобразуется в тепловую энергию. Заготовка начинает плавиться в локальной зоне. Мощность лазерного луча при этом должна поддерживаться на таком уровне, чтобы температура материала заготовки была бы ниже температуры испарения. Когда подача лазерной энергии прекращается, расплав застывает, образуя сварное соединение, или сварной шов. Лазерная сварка является типом сварки, который можно использовать для получения точечной сварки или непрерывного шва.

Используются два типа лазерных сварочных процессов: теплопроводности и глубокого проплавления. В случае *сварки методом теплопроводности*, свариваемые поверхности материалов состыковывают друг с другом. Лазерный луч фокусируется на определенном месте, на стыке поверхностей заготовок. Тепловая энергия, выделившаяся в результате поглощения лазерной энергии, прогревает обе присоединенные части в силу их близости. Оба материала изменяют свое состояние от твердой фазы к жидкой, образуя общий расплав. Когда подача лазерной энергии прекращается, общий расплав затвердевает, образуя сварной шов. Глубина сварки в этом случае, как правило, менее 2 мм.

Метод глубокого проплавления характерен для плотностей мощности 10^6 Вт/см² и выше. Высокая плотность мощности приводит к локальному нагреву поверхности материала со скоростью, существенно превышающей скорость отвода теплоты за счет теплопроводности. Начинается локальное испарение материала, а на поверхности сначала формируется лунка, которая при достаточной мощности источника развивается вглубь материала и приводит к образованию глубокого канала, заполненного парами материала.

Давление паров материала не дает полости закрыться под действием гидростатических сил окружающего жидкого металла и сил поверхностного натяжения. При этом на передней стенке канала происходит плавление материала, а затем его затвердевание. Наличие канала дает возможность лазерному излучению проникать в материал на некоторую глубину. При этом образуется узкий шов с большим отношением глубины к ширине. Метод глубокого проникновения позволяет достичь глубины сварки более 25 мм.

На рис. 8.6, *а* и *б* изображены сварочные процессы методом теплопроводности и глубокого проплавления соответственно.

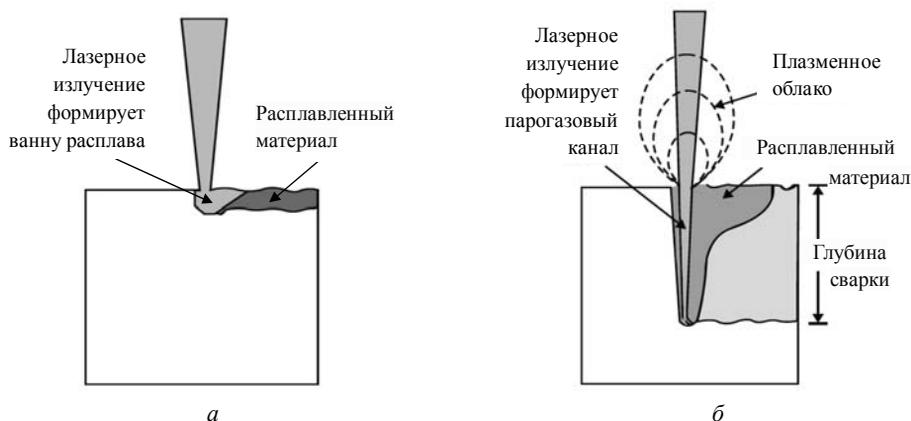


Рис. 8.6

Сварочные процессы методом теплопроводности (*а*) и глубокого проплавления (*б*)

8.3.1. ЛАЗЕРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ СВАРКИ

Обычно для сварки используются газовые лазеры, например, CO_2 -лазеры, и твердотельные лазеры, например, Nd:YAG-лазеры и лазеры на основе неодимового стекла.

Сварка с помощью CO_2 -лазера осуществляется на длине волны 10,6 мкм с характерной мощностью от нескольких сотен ватт до киловатт и высокой скоростью сварки. Для лазерной сварки используют как импульсные, так и непрерывные лазеры. Доставки излучения в зону обработки осуществляется с помощью зеркально-линзовой объемной оптической системы.

CO_2 -лазеры способны сваривать как металлические, так и неметаллические материалы. Лазерное излучение в дальнем инфракрасном диапазоне имеет начальный коэффициент отражения 80–90% для большинства металлов. Однако это ограничение легко преодолимо для мощных CO_2 -лазеров. Как только температура поверхности материала в фокальном пятне приближается к температуре плавления, его отражательная способность падает в течение микросекунд.

Сварка с помощью Nd:YAG-лазера осуществляется на длине волны 1,064 мкм с характерной мощностью от десятков до нескольких сотен ватт. Доставки излучения в зону обработки осуществляется как с помощью зеркально-линзовой объемной оптической системы, так и с помощью оптоволоконна.

Ключевым преимуществом использования Nd:YAG-лазера является высокая способность к поглощению металлическими материалами, включая алюминий и медь, излучения на длине волны 1,064 мкм.

Использование этих лазеров предпочтительно в электронной промышленности для изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Еще одним преимуществом сварки с помощью лазеров на Nd:YAG и неодимовом стекле является возможность применения коаксиальной оптики, что является большим преимуществом в деликатных сварочных работах, таких как сварка нитей накала ламп.

Установки на основе Nd:YAG-лазера более компактны по сравнению с установками на основе CO_2 -лазеров. На рис. 8.7 показан Nd:YAG-лазер для точечной сварки.



Рис. 8.7
Установка для лазерной сварки
серии LRS компании
ОКБ «Булат» (Россия)

8.3.2. ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Основными преимуществами лазерной сварки по сравнению с традиционными методами, такими как дуговая сварка, дуговая сварка под флюсом, контактная сварка и сварка электронным пучком, являются:

1. Бесконтактный процесс, который устраняет проблемы износа инструмента и избавления от производственных отходов.
2. Может использоваться для широкого диапазона материалов, в том числе металлов, сплавов и пластиков.
3. Легко автоматизируется.
4. Высокая скорость производства, более высокая скорость сварки и высокое качество, что исключает необходимость обработки после сварки.
5. Регулируемая мощность для лучшего соответствия различным материалам.
6. Более высокая безопасность эксплуатации с проверенными системами доставки луча.
7. Возможность одновременной точечной сварки, либо используя разные станки, либо станки с системой разделения луча.
8. Более высокая надежность и повторяемость.
9. Низкое тепловое влияние на материал.
10. Возможность односторонней двухсторонней сварки.
11. Облегчает доступ к труднодоступным местам.
12. Не требует вакуума или магнитного экранирования (как для электронно-лучевой сварки) и может использоваться для сварки магнитных материалов.

8.4. ЛАЗЕРНОЕ СВЕРЛЕНИЕ

Лазерное сверление – это процесс, при котором отверстия создаются сфокусированным лазерным лучом, имеющим высокую энергетическую плотность в фокальном пятне. Из канала отверстия расплав удаляется путем испарения с использованием или без использования струи газа под высоким давлением.

С помощью лазерного сверления стало возможным сверление с высокой точностью отверстий малого диаметра, различных форм и ориентации в широком диапазоне материалов, в том числе труднообрабатываемых аэрокосмических сплавов. Сверление сотен и тысяч тончайших охлаждающих отверстий в деталях турбин аэрокосмических двигателей под необходимым углом значительно повысило эффективность охлаждения. Лазерная технология сегодня широко используется при изготовлении деталей турбин в авиации и энергетике, в автомобильной промышленности и в медицине.

8.4.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Луч мощного лазера направляют на поверхность обрабатываемой детали, создавая высокую плотность мощности в диапазоне от единиц мегаватт до сотен мегаватт на квадратный сантиметр. Энергия лазерного излучения поглощается материалом и преобразуется в тепловую энергию, что приводит к локализованному плавлению и испарению материала.

Расплав удаляется из отверстия под действием высокого давления, создаваемого в канале парами материала, с помощью или без помощи дополнительной струи газа. Для удаления расплава только за счет давления паров материала необходимо достичь такого давления в канале, чтобы стало возможным преодолеть силу поверхностного натяжения. На рис. 8.8 показан процесс лазерного сверления.

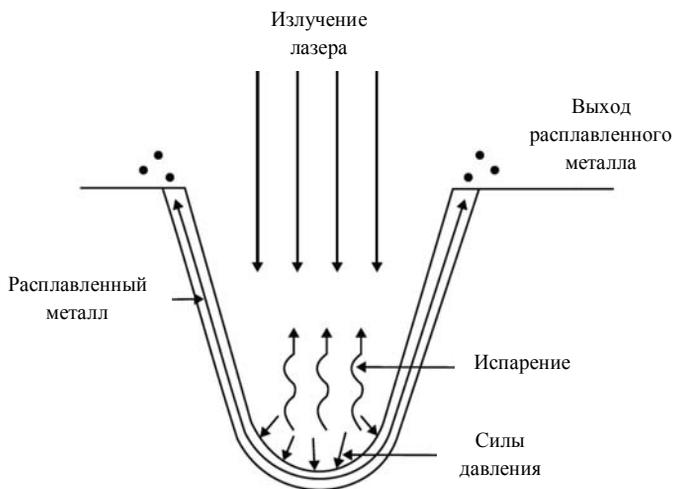


Рис. 8.8
Процесс лазерного сверления

8.4.2. СПОСОБЫ ЛАЗЕРНОГО СВЕРЛЕНИЯ

Обычно применяемые способы сверления включают в себя: моноимпульсное сверление; ударное сверление и его варианты; кольцевое сверление и его варианты; и шаблонное сверление.

При *моноимпульсном сверлении* используется один импульс для сверления каждого отверстия, как показано на рис. 8.9, а. Этот способ используется для высокоскоростного сверления глухих и сквозных отверстий и чаще всего используется в автомобильной промышленности.

Например, для создания разметочной линии для разлома шатуна в дизельных двигателях сверлением глухих отверстий так близко друг к другу, чтобы создать необходимый паз. Еще одним примером из автомобильной промышленности является производство фильтров.

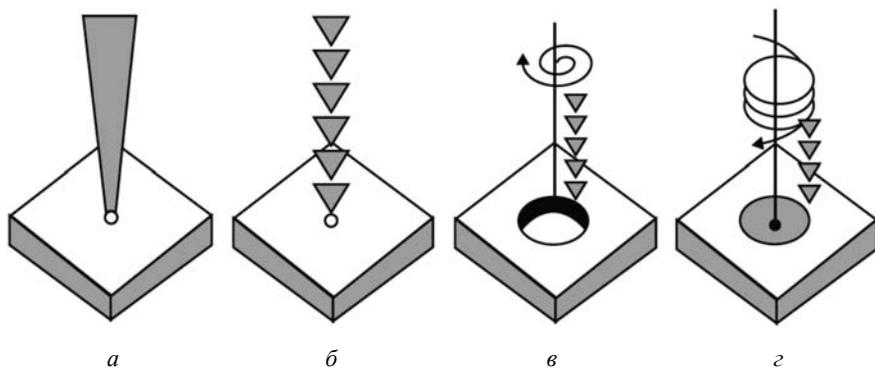


Рис. 8.9

Способы лазерного сверления отверстий: *а* – моноимпульсное, *б* – ударное, *в* – кольцевое, *г* – винтовое кольцевое

Ударное сверление показано на рис. 8.9, *б* и используется для сверления отверстий с диаметром 20–1200 мм. Аспектное число (отношение глубины к диаметру отверстия) может достигать 200:1. Ударное сверление может производиться с помощью или без вспомогательной газовой струи.

Если ударное сверление производится без вспомогательной газовой струи для удаления расплава, то в этом случае обязательно применение защиты фокусирующей оптики. При ударном сверлении, как правило, лазер и заготовки обычно неподвижны. Требуется более одного лазерного импульса, чтобы просверлить одно отверстие, при этом количество импульсов зависит от толщины материала.

Кольцевое сверление используется в случае, если диаметр лазерного луча много меньше, чем требуемый диаметр отверстия. В способе кольцевого сверления лазерный луч является подвижным и направляется в зону обработки вращающейся оптической головкой, а заготовка может быть подвижной или неподвижной, как показано на рис. 8.9, *в*. Применение такого способа сверления стало возможным при использовании высокоточных и обладающих хорошей повторяемостью систем лазерного позиционирования.

Сверление профилированных отверстий является новым применением кольцевого сверления. Оно позволило конструкторам попробовать новые системы охлаждения для компонентов турбин аэрокосмических двигателей и турбин для электростанций.

Разновидностью способа кольцевого сверления является *винтовое кольцевое сверление*. Этот метод в основном состоит из комбинации кольцевого и ударного сверления. В этом процессе лазерный луч вращается по окружности отверстия много раз до полного проникновения (рис. 8.9, з). Это приводит к значительному улучшению качества сверления. Однако для такого сверления хорошо подходит только обладающий очень высокой повторяемостью лазер.

Шаблонное сверление – это метод, применяющийся для высококачественного сверления. В процессе шаблонного сверления изображение шаблона проецируется на поверхность обрабатываемой детали. Затем, при помощи способа ударного сверления прошивается отверстие с формой, точно соответствующей шаблону. Этот метод требует короткого импульса лазера с однородным профилем луча. Шаблонное сверление, как правило, используется для сверления небольшого количества отверстий с очень высокой точностью. На рис. 8.10 показан процесс шаблонного сверления.

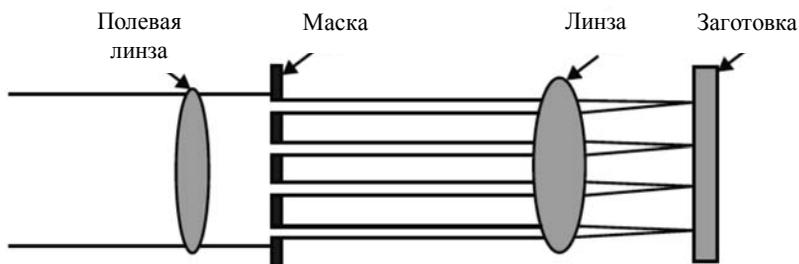


Рис. 8.10
Шаблонное сверление отверстий

8.4.3. ЛАЗЕРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ

Наиболее широко используемыми лазерами для операций сверления являются Nd:YAG-лазеры и CO₂-лазеры (рис. 8.11). CO₂-лазеры работают в режиме свободной генерации, а Nd:YAG-лазер – как в режиме свободной генерации, так и в режиме модуляции добротности. В режиме свободной генерации лазеры имеют длительность импульса от сотен микросекунд до миллисекунд и плотность мощности уровня мегаватт на квадратный сантиметр. В отличие от этого, лазеры с модуляцией добротности имеют длительность импульса от нескольких наносекунд до нескольких десятков наносекунд и плотность мощности от десятков до сотен мегаватт на квадратный сантиметр.

Плотность мощности в зоне обработки зависит от уровня мощности лазера и диаметра сфокусированного пятна, поэтому роль фокусирующей оптики здесь играет важную роль. Сфокусированный диаметр пятна также коррелирует с диа-

метром отверстия. Для тонких материалов с толщиной до 6 мм, диаметр пятна, как правило, равен, диаметру отверстия. Положение фокального пятна находится немного выше или ниже поверхности материала для достижения лучшего результата. В большинстве случаев фокальное пятно находится ниже поверхности на глубину, составляющую 5–15% от толщины материала.

Частота повторения импульсов определяется исходя из требуемой производительности и качества: 5–200 Гц в случае ударного сверления Nd:YAG-лазером, и до 1 кГц в случае сверления CO₂-лазером.



Рис. 8.11

Лазерная установка серии МЛ1-1, предназначенная для высококачественной размерной обработки – прошивка отверстий, скрайбирование.

Компания НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» (Россия)

8.4.4.

ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОГО СВЕРЛЕНИЯ

Лазерное сверление обладает следующими преимуществами.

1. Представляет собой бесконтактный процесс, независящий от проблем износа инструмента, которые возникают при использовании обычных технологий сверления.

2. Имеет малую зону термического влияния и может быть использован в широком диапазоне материалов, включая легированные стали, драгоценные металлы, цветные металлы, вольфрам, молибден, тантал, никель, бериллий, алюминий, кремний и неметаллические материалы.

3. Позволяет сверлить в труднообрабатываемых материалах, включая жаропрочные сплавы, композиты и керамики.

4. Имеет значительно ббльшую скорость сверления, чем обычное механическое сверление.

5. Лучше механических методов сверления обеспечивает получение отверстий под большими углами к поверхности.

6. Может применяться для сверления непроводящих или металлических подложек, покрытых непроводящим материалом, где обработка может приводить к электрическому разряду. Также лазерная технология используется для сверления отверстий в термоустойчивых сверхпрочных сплавах и многослойных композитах из углеродного волокна в аэрокосмической промышленности.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 8

8.1. Отличительные особенности глубокой лазерной обработки: локальность воздействия, отсутствие механического контакта с изделием, высокая точность и производительность, универсальность, возможность быстрой смены режима.

8.2. Лазерные технологии позволяют существенно увеличить скорость, точность и качество традиционных видов обработки: раскрой металлического листа, ввести в практику новые технологические приемы – скоростную сварку разнородных или разнотолщинных материалов, обрабатывать материалы, трудно поддающиеся стандартной механической обработке – твердые, хрупкие, жаропрочные и др.

8.3. Глубокая лазерная обработка дает возможность комбинирования с другими видами обработки, обеспечивая большую широту выбора технических решений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 8

8.1. Назовите отличительные особенности технологических операции лазерной резки, сварки, сверления отверстий.

8.2. По каким параметрам проводятся оптимизации лазерной резки, сварки, сверления отверстий?

8.3. Как выбирают режимы глубокой лазерной обработки?

8.4. Назовите области применения глубокой лазерной обработки.

8.5. В чем состоят преимущества глубокой лазерной обработки?

8.6. Какие недостатки имеет лазерная поверхностная обработка?

8.7. Опишите принципиальные схемы глубокой лазерной обработки.

8.8. Каковы перспективы глубокой лазерной обработки?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 8

8.1. У. Дьюли. Лазерная технология и анализ материалов. М.: Мир, 1986.

8.2. Н.Н.Рыкалин, А.А.Углов, И.В.Зуев, А.И.Кокора. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1985.

8.3. А.А.Веденов, Г.Г.Гладуш. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985.

8.4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие для вузов / ред. Григорьянц А. Г.– М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 663 с.

8.5. Ковалев О.Б., Фомин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.– 256 с.

8.6. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.

8.7. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой. – М.: Техносфера, 2008. – 440 с.

8.8. Волоконные технологические лазеры: учеб. пособие / Богданов А.В., Голубенко Ю.В., Иванов Ю.В., Третьяков Р.С. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.– 503 с.

8.9. Вейко В.П., Петров А.А. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Раздел: Введение в лазерные технологии. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 – 143 с.

8.10. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / Под общей редакцией В.П. Вейко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 141 с.

ЛАЗЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

9.1.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ВИДЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аддитивные технологии предназначены для сокращения циклов разработки и производства изделия. Эти технологии позволяют выполнить быстрое прототипирование новой продукции, которое обычно проводится перед запуском серийного производства, с применением специальных форм, инструментов или приспособлений (рис. 9.1).

Применение обычных методов механической обработки для изготовления прототипа нового образца является весьма трудоемким процессом, требующим значительного числа квалифицированных специалистов в различных процессах изготовления, таких как резка, гибка и формовка и т.д. Кроме того, процесс создания прототипа требует постоянного внесения изменений в конструкцию до того момента, пока он не будет готов к серийному производству. Как следствие, прототипирование с помощью обычных технологий является не только трудоемким, но и довольно дорогим процессом.

Аддитивные технологии также используются для быстрого изготовления инструмента, необходимого для массового производства. Применение аддитивных

технологий позволило сократить время выхода на рынок новых изделий, снизить стоимость их изготовления и открыло возможность производства сложных изделий, которые ранее невозможно было создать с использованием традиционных методов обработки.

Аддитивные технологии широко используются для изготовления макетов и прототипов, а также функциональных изделий из металла, пластмассы и композиционных материалов, в первую очередь, в военной и аэрокосмической промышленности (рис. 9.2).



Рис. 9.1

Аддитивная технология

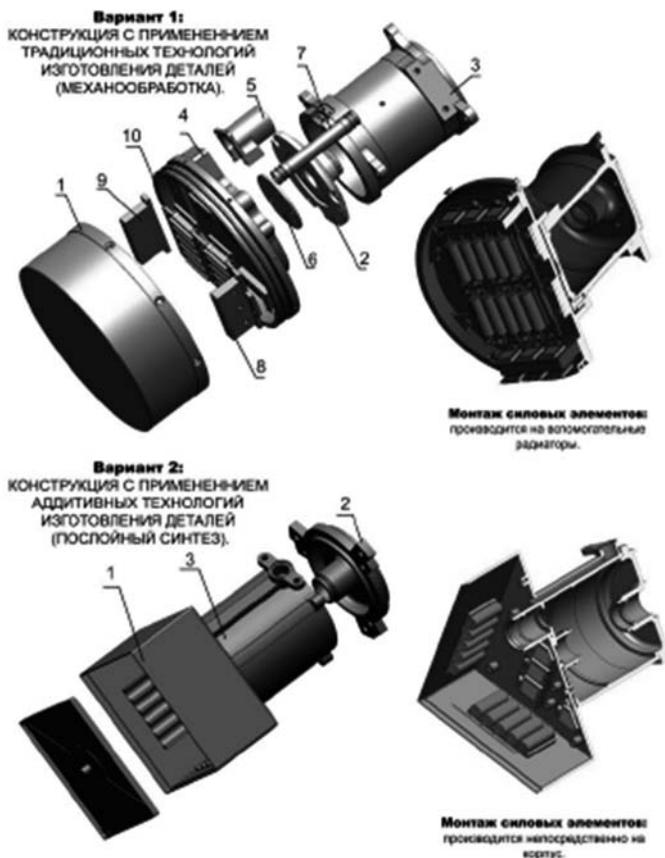


Рис. 9.2

Сравнение традиционной (вариант 1) и аддитивной технологий (вариант 2) по методике компании EOS

Чтобы лучше понять суть *принципов аддитивной технологии*, необходимо напомнить, что существует два главных способа производить детали и изделия. Первый – при помощи механической обработки, постепенно материал удаляется с помощью резки, точения, сверления и др. Второй – аддитивный, постепенное, послойное добавление материала и наращивание необходимой формы по 3D CAD-модели изделия (рис. 9.3).

Ранее эти технологии называли «технологиями быстрого прототипирования», но так как изготовление моделей и макетов на 3D-принтерах перешло в создание конечных и серийных изделий, то термин «прототипирование» теперь не используется (рис. 9.4).

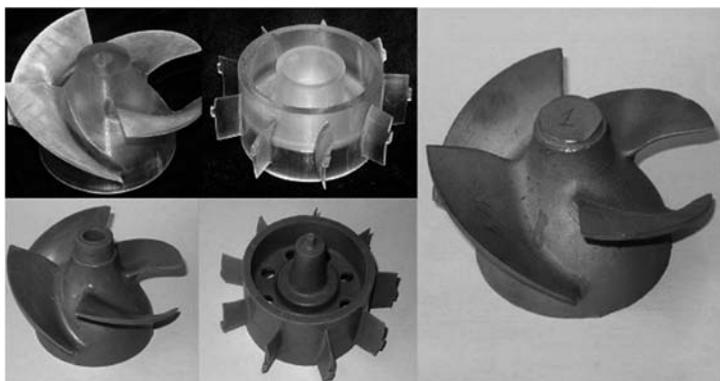


Рис 9.3

Стереолитографические модели рабочих колес, изготовленные по ним восковые модели («восковки») и готовая металлическая отливка

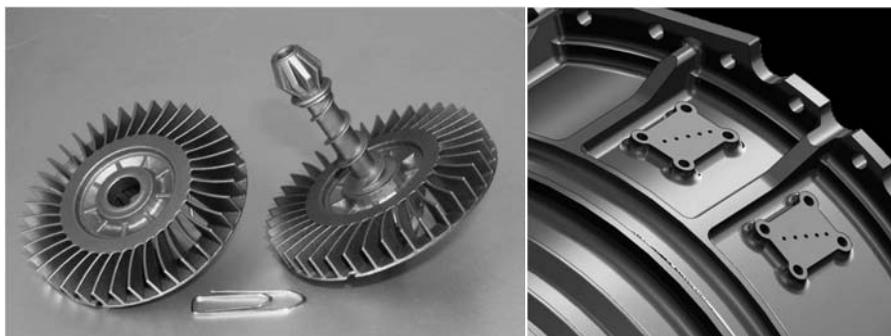


Рис. 9.4

Сложные металлические изделия, полученные аддитивной технологией

Аддитивные технологии различаются в основном используемыми материалами и способами нанесения слоев. Наиболее широкое применение нашли следующие *методы аддитивной технологии*:

- стереолитография;
- селективное лазерное спекание;
- изготовление методом осаждения;
- послойное изготовление;
- 3D-печать.

В стереолитографии в качестве основного материала используется светочувствительная полимерная смола. Лазерный луч с длиной волны УФ-диапазона

сканируется по поверхности жидкой смолы, находящейся в кювете (рис. 9.5, *а*). Лазерное излучение вызывает послойное термическое отвердевание смолы. Эти слои в совокупности и образуют требуемую 3D-форму изделия.

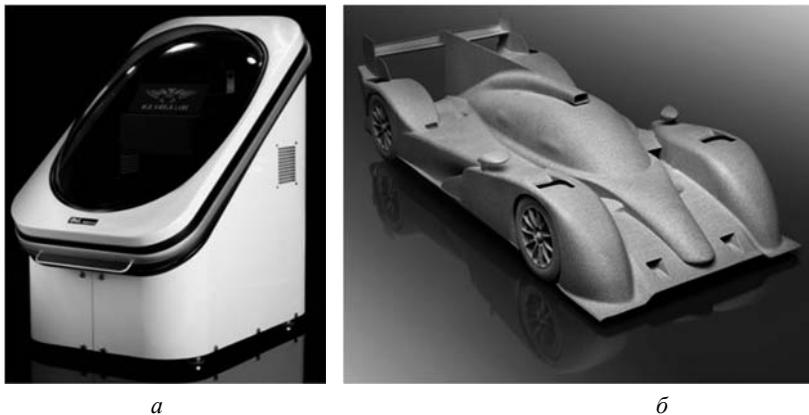


Рис. 9.5

Настольный стереолитографический принтер OWL Nano компании (Old World Laboratories, США) (*а*); СЛС-технология позволяет исследовать аэродинамические характеристики моделей (*б*)

При *селективном лазерном спекании* материал в виде порошка осаждается на платформе. Излучение лазера используется, чтобы выборочно послойно расплавить или спекать порошок. Рыхлый материал в виде неиспользованного порошка вокруг выращенной структуры выступает в качестве поддержки последующего верхнего слоя. Селективное лазерное спекание может быть использовано для широкого диапазона материалов, включая термопластики, металлы и керамические порошки (рис. 9.5, *б*). Мощность лазера и скорость сканирования может варьироваться, чтобы контролировать пористость и прочность материала. Этот метод обычно используется для изготовления роторов турбин и медицинских изделий.

Изготовление методом осаждения сочетает процесс осаждения с обработкой на станке с ЧПУ. Для этого метода характерно последовательное нанесение слоев с последующей их механической обработкой. После каждого осаждения и операции обработки добавляется новый слой материала и снова обрабатывается перед нанесением следующего слоя. Пошаговая обработка позволяет создавать толстые слои при сохранении гладкой поверхности. Использование порошка, заполняющего возникающие пустоты, позволяет поддерживать слои с нависающими краями и выточками во время изготовления без использования специальных приспособлений.

В случае послойного изготовления объекта части, сделанные из листового материала, соединяются в слои, формируя слоистую структуру. Основными матери-

алами, используемыми при таком методе, являются пластики, водоотталкивающая бумага, керамические и металлические порошковые ленты. Техника используется для литья автозапчастей под давлением.

3D-печать аналогична технологии струйной печати. Группу печатающих головок сканируют по порошкообразному материалу. Во время операции сканирования, печатающие головки распыляют жидкое связующее вещество, которое скрепляет материал, образуя требуемую форму каждого слоя. Этот процесс последовательно повторяется для формирования каждого из слоев, начиная с нижней части детали и добавляя дополнительный порошок перед формированием каждым последующим слоем. После того, как все слои будут сформированы, деталь извлекают из слоя порошка и очищают. Технология 3D-печати широко используется при изготовлении функциональных частей металлических пресс-форм.

9.2.

СПЕКАНИЕ ПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Спекание пластиковых материалов является разновидностью СЛС-технологии, в которой порошкообразный предварительно выровненный тонкий слой материала в рабочей камере разогревается до температуры, близкой к плавлению, и лучом лазера на нем создается необходимый контур слоя будущей модели.

В месте воздействия излучения частицы порошка расплавляются и спекаются друг с другом, а также с предыдущим слоем.



Рис. 9.6

Первая машина для спекания пластиковых материалов компании EOS

Затем платформа опускается на толщину одного слоя, в камеру подается новый слой порошка, разравнивается, и процесс повторяется. В итоге формируется готовая модель (рис. 9.6).

Существует много вариантов исполнения этапов такого производства. Выделяют два основных алгоритма спекания: в первом случае расплавляют только те участки, которые соответствуют границе модели, во втором – расплавляют по всему слою модели.

На сегодняшний день разнообразие материалов, применяемых в качестве порошка, уже достаточно велико и про-

водятся работы по созданию новых. Традиционно при СЛС в качестве исходного порошка использовались следующие материалы: акрило-нитрил-бутадиенстирольный пластик (АБС-пластик), поливинилхлорид (ПВС), полиуретан, поликарбонаты (ПК), нейлон, парафин, сложные полиэфиры, стеарат цинка и различные пластифицирующие добавки (рис. 9.7).

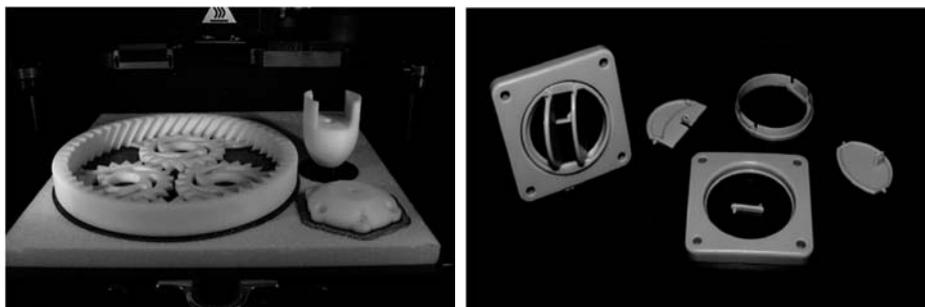


Рис. 9.7

Модели (слева) и изделия (справа) из АБС-пластика

Важная особенность и достоинство селективного лазерного спекания пластиковых материалов:

- отсутствие необходимости в поддерживающих структурах, так как избышек окружающего порошка поддерживает модель по всему объему и не дает ей разрушиться, пока окончательная форма модели еще не создана и не достигнута прочность целевого объекта;

- отсутствие необходимости выдержки готовой модели в специальной печи для выжигания технологических полимеров, которые нужны на этапе спекания в случае, если использовались порошки композитных металлов.

К недостаткам селективного лазерного спекания можно отнести:

- наличие воздушной окислительной среды и высокоразвитая поверхность порошков полимеров приводит к тому, что разложение (деструкция) наступает при более низких температурах, чем при нагреве их в массе. Термоокислительная деструкция в основном сводится к образованию низкомолекулярных продуктов – CO_2 , CO , H_2O и т. д.;

- низкие значения теплопроводности полимеров, которые на два порядка меньше, чем у стали, обуславливают плохую передачу тепла в массу полимерного материала, вызывая неравномерный нагрев отдельных участков образца, разные скорости нагрева и охлаждения. Это, в конечном счете, приводит к образованию остаточных напряжений. Теплоемкость полимеров в 3–5 раза выше, чем теплоемкость металлов. В целом, все эти теплофизические свойства изменяются (в сторону увеличения) при переходе полимеров из стеклообразного в высокоэластичное и вязкотекучее состояние;

– при охлаждении полимеров из расплава может происходить значительная усадка из-за различий в коэффициенте объемного расширения до и после плавления, что также приводит к появлению внутренних напряжений в изделиях, а следовательно, будет способствовать расслоению синтезируемых методом СЛС образцов.

Регулируют физико-механические свойства полимеров путем добавок различных пластификаторов. Это позволяет смещать интервалы температуры плавления и температуры деструкции, снижать или повышать модуль упругости и твердость, увеличивать гибкость и т. д. Однако существуют ограничения в дозировке и пределах совместимости полимерных композиций, которыми нельзя пренебрегать.

9.3.

СПЕКАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Селективное спекание (сплавление) металлических порошков является наиболее важной аддитивной технологией, поскольку позволяет создать серийное производство с программой выпуска в десятки или сотни изделий. Таких изделий, зачастую сложной геометрии, из специальных материалов достаточно много в авиационной промышленности, а также в космической индустрии, энергетическом машиностроении и ряде других отраслей. И именно там наиболее остро стоит вопрос альтернативы традиционным технологическим методам для производства не прототипов или опытных образцов, а готовой продукции. Причем мотивацией является не только возможность создавать изделия с уникальными свойствами, но и экономическая целесообразность (рис. 9.8).

Следует отметить, что нет единого мнения в терминологии. Технология селективного лазерного сплавления (SLM) весьма схожа с технологией лазерного спекания (SLS). Считается, что отличие состоит в том, что в SLS-технологии частицы порошка лишь спекаются друг с другом, а в SLM-технологии металлические частицы доводятся до состояния расплавления и свариваются друг с другом, образуя жесткий каркас.

Первый подход. Частицы покрывают термопластическим связующим материалом или легкоплавким связующим, используется процесс косвенного жидкофазного спекания.



Рис. 9.8

Цельные металлические детали сложной геометрической формы, созданные с помощью аддитивной технологии

Под лучом лазера связующий материал расплавляется и соединяет частицы металлического порошка, образуя требуемую форму (greenpart – заготовка). Затем greenpart – заготовка подвергается обработке в печи, в ходе которой связующий материал выжигается, а частицы металлического порошка связываются за счет обычных механизмов спекания. Получившаяся деталь носит название brownpart.

Без дальнейшей обработки деталь будет довольно пористой из-за наличия пустот, которые ранее занимали частицы связующего материала. Чтобы снизить пористость, в печь помещается еще один материал – инфильтрант. Этот металл расплавляется при рабочей температуре печи и проникает в поры детали за счет капиллярного эффекта. Данный метод часто используется для изготовления форм для литья непосредственно по их геометрическим моделям. Ресурса таких форм достаточно для изготовления от 2 500 до 10 000 деталей-прототипов. Таким образом, такой процесс СЛС требует ряда дополнительных операций (постпроцессы), что отразилось в его названии – Non Direct SLS.

Однако последние годы активно внедряется метод Direct SLS (DSLS), предполагающий изготовление функциональных изделий непосредственно на установке

Второй подход. Лазерное послойное спекание порошков, которое представляет собой многократно повторяющийся процесс, включающий несколько стадий: а) нанесение порошкового слоя и выравнивание его роликом; б) лазерная обработка (сканирование) порошкового слоя с полным проплавлением легкоплавкой компоненты порошковой смеси; в) чистка полученного слоя; г) сдвиг столика с образцом вниз на величину толщины одного слоя; д) повторение всего процесса, т.е. нанесение следующего порошкового слоя, лазерное сканирование и т.д. Обработка осуществляется в камере с продувкой инертным газом и управляется компьютером для получения заданной 3D-геометрии детали.

Поверхность получаемых покрытий представляет собой сложное наноструктурное состояние, характеризующееся наличием метастабильных фаз. Особенностью структуры является система связанных пор разного масштаба: от наноразмерных пор до пор размером в несколько микрометров. Данные выводы сделаны по результатам сопоставления нескольких методов исследования: ожеспектроскопии, рентгеновской дифракции, растровой электронной микроскопии

Эмпирический поиск энергетических режимов лазерной обработки, обеспечивающих получение заданного структурно-фазового состояния, затруднителен и трудоемок. Фактически, только в очень узком диапазоне режимов излучения формируются удовлетворительные по качеству слои.

Третий подход. Он в принципе сходен со вторым подходом, однако металлический порошок («строительный материал») и лазерное излучение для его сплавления подводятся одновременно в локализованную область построения изделия. Эти технологии предполагают применение машин, рабочий орган которых – головка, оснащена системами подвода «строительного материала» и лазерного

излучения, обычно в виде сфокусированного лазерного излучения (представитель – компания Optomes, США). В ряде случаев головку устанавливают на роботизированной «руке».

Получение различных изделий методом DSLS основано на затекании образовавшегося расплава-связки в пустоты между частицами под действием капиллярных сил. При этом для успешного выполнения процесса в порошок добавляют соединения с фосфором, которые снижают поверхностное натяжение, вязкость и степень окисления расплава, тем самым улучшая смачиваемость. Порошок, используемый в качестве связки, обычно имеет меньший размер, чем порошок основы, поскольку это позволяет увеличить насыпную плотность порошковой смеси и ускорить процесс образования расплава.

Этот метод находит все более широкое применение. Известная компания DMG MORI SEIKI AG (Германия) впервые интегрировала генеративную лазерную технологию в 5-осевой высокотехнологичный фрезерный станок (рис. 9.9, ил. 5). Это инновационное гибридное решение до сих пор остается уникальным на мировом рынке. В рамках этой технологии применен процесс нанесения при помощи распылителя металлического порошка, что в 20 раз быстрее, чем при генерировании во флюсовой подушке.

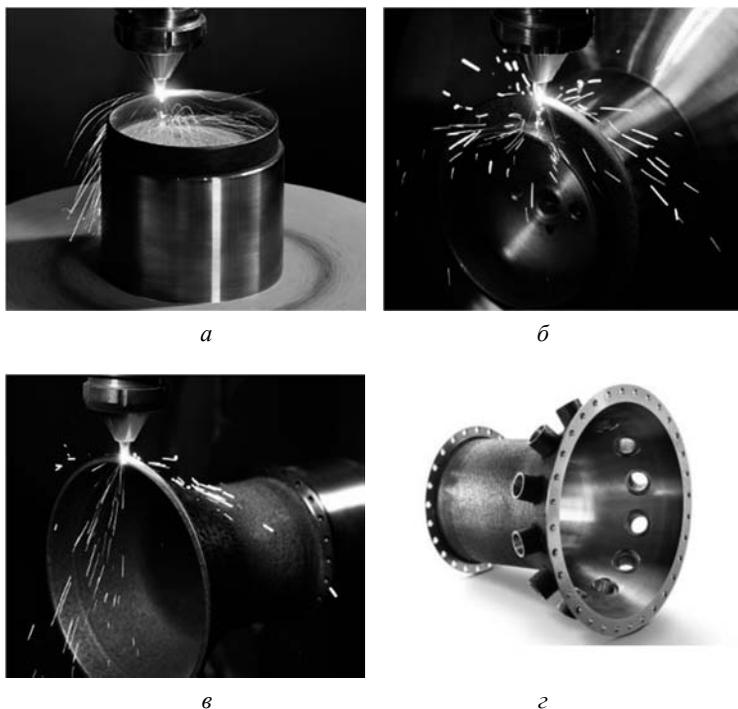


Рис. 9.9

Процесс создания детали с помощью аддитивной технологии

До настоящего времени аддитивные технологии ограничивались изготовлением опытных образцов и мелких деталей, которые невозможно изготовить с использованием каких-либо обычных технологий. Благодаря комбинации аддитивной обработки и обработки резанием на одном станке, аддитивная технология дополняет и расширяет традиционные методы обработки.

Дальнейшее усовершенствование технологии и установок для аддитивного производства связано с появлением возможности использования более мощного лазера, меньшего диаметра сфокусированного пятна и нанесения более тонкого слоя порошка, что позволило использовать СЛС-технологии для получения изделия с пористостью не более 3%.

После аддитивного производства материалы характеризуются анизотропией свойств, повышенной прочностью и пониженной пластичностью из-за наличия остаточных напряжений. Для снятия остаточных напряжений, получения более равновесной структуры, повышения вязкости и пластичности материала проводят отжиг.

9.4.

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АВИА- И РАКЕТОСТРОЕНИИ

Внаши дни пластиковые композиты составляют примерно 15% от структурной массы современного гражданского самолета и преимущественно изготавливаются из углеродной пластмассы, армированной волокном. В новом поколении самолетов планируется использовать уже до 50% конструкционных композитов.

Использование пластмассовых композитов в авиационно-космической промышленности, согласно сведениям EADS Deutschland GmbH (European Aeronautic Defense and Space Co), экономия на эксплуатационных расходах за счет уменьшения массы самолетов оценивается суммой от 100 до 1000 евро (в зависимости от области применения) на килограмм сэкономленной массы. Такая экономия образуется за счет более низких затрат на топливо и меньшей потребности в материально-техническом обслуживании, которое при использовании металлов возникает из-за их усталости и коррозии.

Крупнейшие машиностроительные компании и научные ведомства уже используют 3D-печать и проводят испытания. Компания Boeing устанавливает компоненты, изготовленные из термопластика по процессу SLS, на гражданских самолетах серий 737, 747 и 777 и использовала несколько сотен таких деталей на самолете 787-й серии. В дополнение к этому множество SLS-деталей установлено на нескольких версиях военных самолетов, таких как самолет 127 дальнего

воздушного радиолокационного обнаружения и управления, модели С-40, AWACS и Р-8. Еще одним примером может служить трубопровод охлаждения (система контроля состояния среды) на истребителе F/A-18E/F SuperHornet, разработанном компанией Boeing для ВМС США. Технология SLS позволила инженерам объединить различные каналы в единые детали, встроить в них механизмы крепления и сократить общее число компонентов. Это стало возможным благодаря сложной геометрии деталей. В итоге процесс сборки упростился и сократился во времени, а вес самолета снизился.

В последние годы они активно внедряются и в России. Высокая эффективность технологии отмечается не только разработчиками авиационной, вертолетной и ракетной техники, но и ее заказчиками и серийными заводами-изготовителями (рис. 9.10). Организация широкого применения технологии стали приоритетной задачей для ведущих российских предприятий.

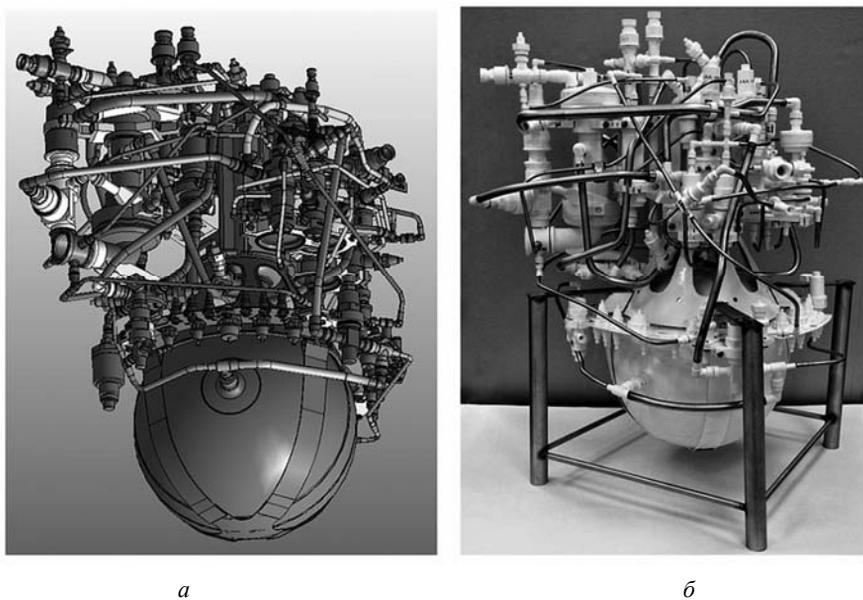


Рис. 9.10

Компьютерная 3D-модель (а) и конструкторский макет (б) бортового источника питания для тяжелой ракеты «Ангара». Использован ABS пластик российской фирмы ООО «РЭК»

Кроме того, несмотря на существенные преимущества, которые дает их использование, пластмассовые композиты все еще медленно внедряются в авиационно-космическую промышленность. Они зачастую оказываются дороже, чем сопоставимые металлические материалы.

Активно идет внедрение технологии изготовления деталей и узлов из металлов и сплавов.

Французский производитель вертолетных газотурбинных двигателей Turbomeca использует 3D лазерное спекание с толщиной слоя 100 мкм для создания топливных форсунок. Деталь изготавливается из никелевого суперсплава и имеет более эффективное впрыскивание и охлаждение. Проект является частью программы по внедрению в компанию новых технологий, вслед за форсунками они предлагают изготовление завихрителей камеры сгорания.

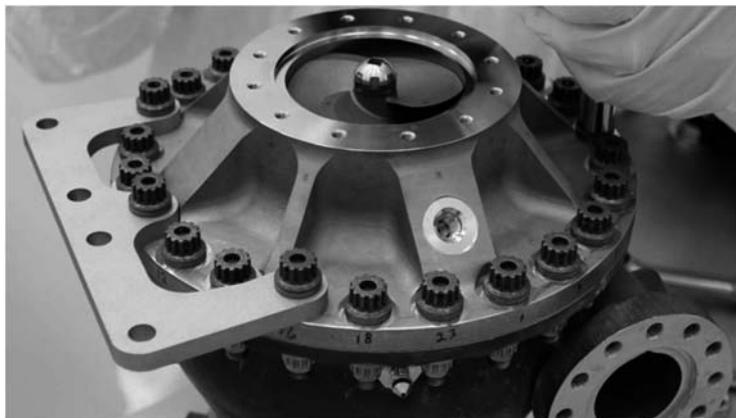
Американская компания General Electric также сделала огромные шаги в области промышленной 3D-печати, открыв заводы по массовому производству топливных форсунок для реактивных двигателей типа LEAP. Компания Rolls-Royce проводит испытания крупнейшей печатной детали для самолета, которая когда-либо производилась. Компонент реактивного двигателя Trent XWB-97 изготовлен из титана и имеет диаметр 1.5 м, толщину 0.5 м, а также 48 фронтальных лопаток. Компания провела испытания нескольких двигателей на земле и готовится к полетным испытаниям. Изделие получилось гораздо более легким, а время на производство сократилось на 30%, что сэкономило затраты и время создания прототипа.

НАСА также проводило испытания простых 3D-печатных компонентов ракетного двигателя: камеры сгорания и топливные инжекторы. Теперь. С этой целью инженеры Центра космических полетов им. Маршалла в Хантсвилле, штат Алабама, США, построили и недавно протестировали более сложные компоненты турбонасоса, который на сегодняшний день является самым сложным 3D-печатным компонентом для ракетного двигателя.

3D-печатный турбонасос (рис. 9.11), разработанный инженерами Центра совместно с партнерами НАСА, способен вращаться на скорости более 90000 оборотов в минуту и генерировать более 2000 л.с. (1500 кВт) энергии, обеспечивая накачку 1200 галлонов (4500 литров) низкотемпературного водорода в минуту. Как утверждает НАСА, благодаря использованию 3D-печати, в конструкции турбонасоса использовано на 45% меньше деталей, чем в обычном турбонасосе.

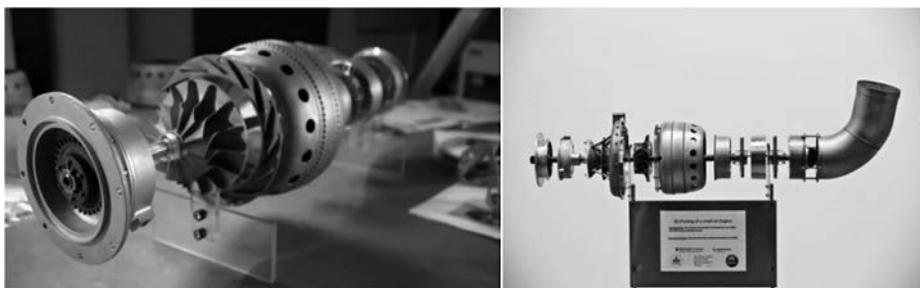
Турбонасос был подвергнут 15-ти тестам, во время которых, заведенный на полную мощность, он оказался способен доставить топливо при температуре -240°C в верхнюю ступень ракеты, которое затем сжигалось при температуре 3315°C для генерации 35000 фунтов тяги.

Для изготовления турбонасоса была использована технология селективного лазерного спекания. НАСА расценивает 3D-печать как более экономичный способ изготовления компонентов космических аппаратов. Кроме того, агентство считает, что использование технологии аддитивного производства позволит осуществлять более далекие пилотируемые космические полеты без необходимости нести с собой огромные запасы запчастей для двигателей.

**Рис. 9.11**

Турбонасос для реактивного двигателя

Как доказательство того, что современные 3D-принтеры пригодны для использования в аэрокосмической промышленности инженеры из университета Монаша (Австралия) напечатали и собрали реактивный двигатель (рис. 9.12). Настоящий двигатель был разобран на части, каждую деталь отсканировали 3D-сканером, а потом распечатали.

**Рис. 9.12**

Реактивный двигатель, созданный с помощью аддитивной технологии

Для аддитивных технологий лучше всего подходят импульсные и непрерывные CO_2 - и Nd:YAG-лазеры, генерирующие излучение на длине волны 10.6 мкм и 1.064 мкм, соответственно, а также волоконные Yb-лазеры с длиной волны 1.07 мкм. Использование полупроводниковых диодных лазеров на длине волны 810 нм оказалось невозможным из-за их низкого качества излучения.

Большинство коммерческих станков для аддитивных технологий оснащены CO_2 -лазерами, поскольку они имеют более высокую эффективность и низкие эксплуатационные расходы по сравнению с Nd:YAG-лазерами.

Выходная мощность лазера находится, как правило, в диапазоне 50–500 Вт. Также применяются и более мощные CO₂-лазеры с уровнем выходной мощности в диапазоне киловатта.

Импульсные и непрерывные Nd:YAG- и волоконные Yb-лазеры также широко используются для аддитивных технологий. В частности для изготовления деталей из металлов и их сплавов, в связи с их гораздо более высокой поглощающей способностью и более высокой эффективностью длины волны около 1 мкм по сравнению с длиной волны 10.6 мкм CO₂-лазера. В связи с этим глубина плавления для Nd:YAG-лазера и волоконного Yb-лазера гораздо выше по сравнению с CO₂-лазером при одинаковой плотности мощности.

Еще одним преимуществом твердотельных лазеров является возможность использования оптического волокна для доставки выходного излучения. Исследования показали, что при сравнении твердотельных и CO₂-лазеров, имеющих одинаковую энергию излучения, первые обеспечивают более высокую плотность энергии, большую глубину спекания и большие возможности обработки.

По сравнению с непрерывными твердотельными лазерами, импульсные лазеры позволяют получить лучшее качество спекания слоев из металлов, благодаря высокой энергии импульса и возможности изменения длительности импульса. Nd:YAG-лазеры с модулируемой добротностью при длительности импульсов на уровне единиц наносекунд и частоте их повторения порядка десятков килогерц также применяют для аддитивных технологий. На рис. 9.13 показано оборудование для лазерного прототипирования.

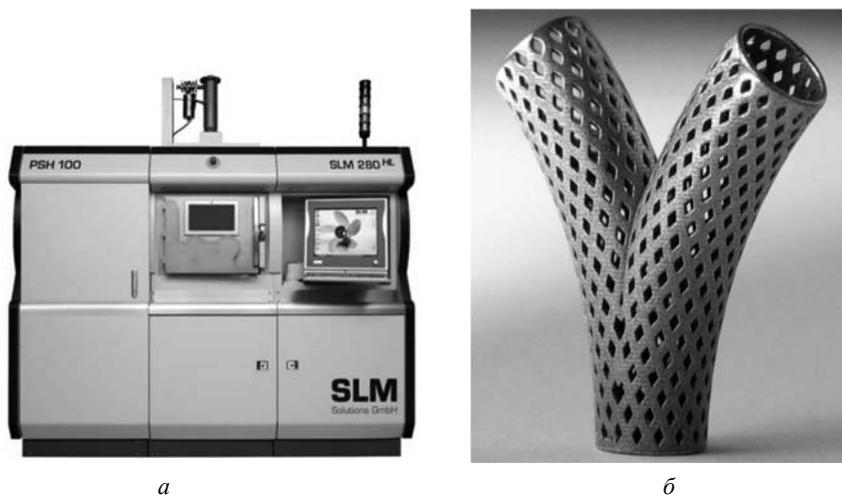


Рис. 9.13

Машина лазерного плавления типа SLM 280 компании SLM Solution (Германия) (а);
Y-стент, полученный с помощью аддитивной технологии (б)

9.5.

ПРЕИМУЩЕСТВА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Есть много преимуществ аддитивных технологий, среди которых наиболее существенными являются высокая точность, низкая стоимость и сокращение времени выхода на рынок.

Также можно отметить следующие плюсы:

- может быть использованы для обработки широкого спектра материалов, которые могут быть расплавлены и соединены с помощью лазера в изделие за один шаг;
- обеспечивает гибкость процесса за счет возможности регулировки таких параметров, как мощность лазера, скорость подачи и толщина слоя;
- позволяет использовать то же самое оборудование, которое используется в процессе обработки различных материалов;
- может обрабатывать различные материалы (или последовательность материалов) в пределах одного изделия для создания определенных свойств;
- позволяет за один шаг создать изделия, которые либо невозможно, либо сложно создать при помощи обычной механической обработки.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 9

9.1. Аддитивная технология – готовое решение для создания прототипов или готовых деталей и изделий средних и больших размеров, с простой или средней сложностью поверхности. Она позволяет сократить время технологической подготовки производства при переходе к выпуску новых изделий в авиа- и ракетостроении и других наукоёмких отраслях, время изготовления и повышает качество создаваемых изделий.

9.2. Технологические процессы синтеза различных материалов позволяют создать прототип или модель изделия сложной формы в соответствии с твердотельной моделью детали, созданной на компьютере при проектировании.

9.3. Основным достоинством применяемого материала и метода изготовления является достаточная дешевизна, хорошие механические свойства (если необходимы работающие прототипы сложных механизмов), стабильность геометрических размеров, возможность последующей доработки.

9.4. Варьирование объемного наполнения материала позволяет снизить массу изготавливаемых деталей, что дает значительную экономию средств. Для более детального изучения характеристик необходимо проводить испытания на прочность в соответствии с условиями работы детали в конструкции.

9.5. Темпы развития аддитивных технологий позволяют предполагать, что через несколько лет установки станут использоваться повсеместно.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 9

- 9.1. В чем состоит суть аддитивных технологий?
- 9.2. Чем аддитивные технологии отличаются от традиционных технологий механической обработки?
- 9.3. Какие недостатки имеют аддитивные технологии?
- 9.4. Опишите основные этапы технологии?
- 9.5. Какие методы аддитивных технологий считаются наиболее перспективными?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 9

- 9.1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутьлина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие для вузов – СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013. – 222 с.
- 9.2. Технология лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов в авиадвигателестроении: учеб. пособие / Р.Р. Латыпов [и др.]. – М., 2007. – 234 с.
- 9.3. Валетов, В.А. Современные технологии нанесения покрытий: Технология приборостроения / В. А. Валетов, Ю. П. Кузьмин, А. А. Орлова и др.; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. – СПб.: ИТМО, 2008. – 163 с.

ЧАСТЬ IV

**ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

М. А. Коняев

ВВЕДЕНИЕ К ЧАСТИ IV

Лазерная локация атмосферы относится к дистанционным методам диагностики атмосферы. Эти методы не требуют участия человека в заборе проб для анализа. Среди них различают: активные (лидарные технологии) и пассивные (ИК фурье-спектрометрия, широкоспектральная фото и видео съемка).

Активные методы предполагают использование источников излучения с заданными свойствами, которые в процессе взаимодействия с объектом исследования изменяются, и по степени и виду этих изменений можно судить о его характеристиках, как в качественном, так и в количественном виде. Пассивные методы используют собственное тепловое излучение объекта или тепловое излучение подстилающей поверхности.

Термин лидар в общем случае является аббревиатурой английского выражения light identification, detection and ranging – LIDAR (оптическая идентификация, обнаружение и локация).

ГЛАВА 10

ПРИНЦИПЫ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

10.1.

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С точки зрения оптических свойств атмосфера является аэрозольно-газовой средой. Существующие методы лазерного зондирования атмосферы используют эту особенность при распространении излучения. Большинство эффектов взаимодействия оптических потоков с аэрозолями и молекулами осуществляется независимо, поэтому методы лазерного изучения атмосферных компонентов разделяются на ряд классов в зависимости от задачи и используемого явления взаимодействия света с атмосферной средой.

При распространении лазерного излучения в атмосфере происходит взаимодействие излучения с составными частями атмосферы, аэрозолями и молекулами. На рис. 10.1 схематически представлены основные процессы.

Любой из процессов взаимодействия можно охарактеризовать так называемым эффективным сечением – относительной вероятностью осуществления события между фотоном излучения и молекулой или аэрозольной частицей. В табл. 10.1 представлены основные типы, используемые при дистанционном контроле атмосферы и соответствующие им сечения взаимодействия.

В методах лидарного зондирования основанных на аэрозольном рассеянии (рассеянии Ми) используют зависимость лидарных сигналов от формы и размера частиц, комплексного коэффициента преломления материала частиц и их спектральных свойств. Метод одночастотного лазерного зондирования аэрозоля эффективен с точки зрения, оценки профиля коэффициента ослабления или обратного рассеяния на фиксированной длине волны.



Рис. 10.1
Основные типы взаимодействия

Таблица 10.1

Основные типы взаимодействия

Вид взаимодействия	Сечение взаимодействия, см ²	Применение
Релеевское рассеяние	$10^{-25} - 10^{-24}$	Плотность, температура атмосферы
Рассеяние Ми	$10^{-6} - 10^{-5}$	Исследование аэрозолей, смога и т.д.
Резонансное рассеяние	$10^{-8} - 10^{-6}$	Идентификация веществ
Флуоресценция	$10^{-14} - 10^{-12}$	Идентификация веществ (Na, K, Li, OH, и т.д.)
Молекулярное поглощение	$10^{-15} - 10^{-14}$	Идентификация веществ (O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , CH ₄ , CO, H ₂ O, сложные молекулы)
Рамановское рассеяние	$10^{-25} - 10^{-24}$	CO ₂ , H ₂ O, N ₂ (температура)

При использовании нескольких длин волн (метод многочастотного зондирования), выбранных определенным образом, возможно определение спектра размеров аэрозольных частиц и (или) параметров их распределения. Методы одночастотного поляризационного лазерного анализа дают информацию о форме аэро-

зольных частиц, а также о возможном вкладе многократно рассеянных пучков, что в значительной мере может усложнить интерпретацию сигналов. Использование явления спектрального резонанса в обратном рассеянии на аэрозолях перспективно для определения материала частиц.

Молекулярная (газовая) атмосфера при лазерном зондировании проявляется в поглощении, в явлениях молекулярного (релеевское), комбинационного, резонансного рассеяния и флуоресценции. Перечисленные явления отличаются интенсивностью или сечениями взаимодействия и соответственно возможностями для достоверной регистрации сигналов.

Наиболее интенсивные – поглощение и молекулярное рассеяние позволяют получение профиля концентрации избранного газа в варианте метода дифференциального поглощения и рассеяния (зондирование в полосе и вне полосы поглощения данного газа, при этом молекулярное, а также аэрозольное рассеяние выступает как источник сигнала). При лазерном зондировании атмосферы (особенно в мобильных модификациях) наиболее перспективны методы, основанные на явлениях с большими сечениями взаимодействия или рассеяния.

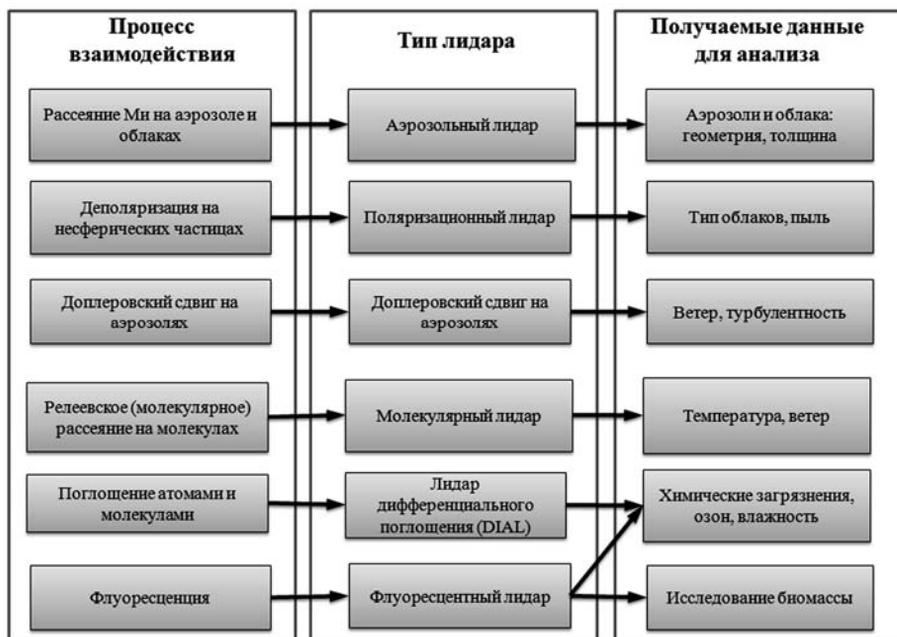


Рис. 10.2
Основные типы лидарных систем

Можно выделить следующие основные типы лидаров, которые способны детектировать и идентифицировать химический состав, а также физические пара-

метры атмосферы, схематично процессы, на которых они основаны, соответствующие типы лидаров и результат представлены на рис. 10.2.

Каждый тип лидара основан на характерном взаимодействии с особенностями, которые надо учитывать при разработке лидарной системы, особенно если система является комплексной и включает в себя несколько типов лидаров.

10.2. СХЕМЫ ЛИДАРОВ

Принцип действия лидара основан на измерении интенсивности рассеяния лазерного излучения частицами атмосферы. Для решения каждой конкретной атмосферной задачи используется конкретная схема (тип) лидара. Большинство лидаров состоит из трех основных частей: а) передающего канала, б) приемного канала и в) системы управления и сбора данных (СУСД). На рис. 10.3 показаны основные функциональные элементы и принцип работы лидаров.

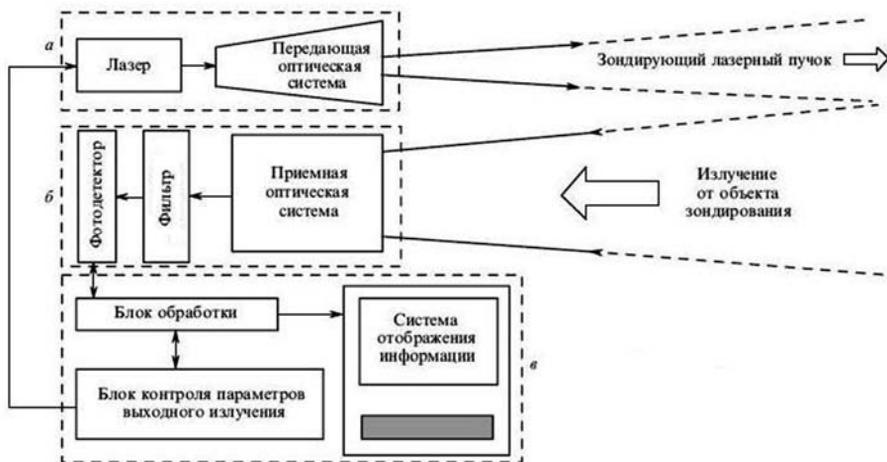


Рис. 10.3

Принципиальная схема лидара:

передающий канал (а), приемный канал (б) и система управления и сбора данных (в)

Передающая часть лидара состоит из лазерного источника и оптической системы, позволяющая формировать зондирующий пучок с заданным размером и расходимостью. Обратное рассеянное и (или) отраженное излучение собирается приемным каналом, который обычно включает в себя один или несколько теле-

скопов, при необходимости пространственные, спектральные, или поляризационные фильтры, и фотодетектор. Система управления и сбора данных предназначена для обеспечения временной диаграммы работы всего лидара, синхронизацию фотодетектора и лазера, оцифровку сигнала с фотодетектора, хранение и обработку полученных данных.

В зависимости от конструкции приемно-передающего тракта лидара, их можно разделить на три основных типа по типу совмещения полей передающего и приемного канала: моностатический коаксиальный, моностатический биаксиальный, а также бистатический. На рис. 10.4 представлены схемы таких лидаров.

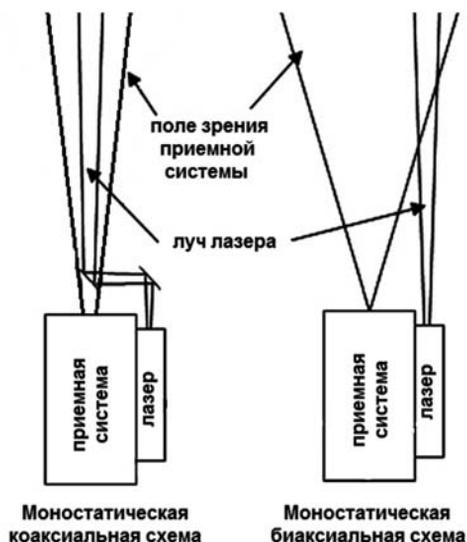


Рис. 10.4

Типы приемно-передающих трактов лидаров

Как видно из рис. 10.4, типы лидаров различаются методом совмещения полей зрения приемника и зондирующего лазера. Каждый тип оптической системы лидара обладает своими преимуществами. В частности, бистатический тип используется, когда необходимо произвести измерения коэффициента рассеивания аэрозольной составляющей под определенным углом, т. е. определение функции рассеивания аэрозоля или провести трассовые измерения (излучатель и приемник расположены напротив друг друга) без использования отражателей.

Моностатический биаксиальный вариант вывода и приема излучения позволяет избежать сильного сигнала на детекторе вызванного рассеянием на оптике и из ближней зоны. Подобные лидары обладают так называемой «слепой» зоной, размер которой зависит от его конфигурации и может составлять несколько сот мет-

ров. Данный тип лидаров более чувствителен к юстировке, по сравнению с моностатическими и коаксиальными лидарами.

Выбор схемы приемной системы лидара определяется большим количеством факторов, в частности массогабаритными ограничениями, спектральными особенностями детектируемого излучения, поперечным распределением интенсивности, технологичность изготовления, термо- и виброустойчивость и т.д.

Неотъемлемой частью приемной системы является телескоп, который может относиться к одному из видов:

- рефракторы (телескоп, состоящий только из линз);
- рефлекторы (телескоп, состоящий только из зеркал);
- зеркально-линзовые (состоит как из линзы, так и зеркал).

Использование рефракторов актуально для систем с диаметром оптики до 100...150 мм, поскольку изготовление высококачественных объективов с большим диаметром сопряжено с технологическими трудностями, и приводят к увеличению линейных габаритов. Естественная дисперсия оптических материалов приводит к хроматическим аберрациям, что критично для систем, работающих в широком оптическом диапазоне. Поэтому применение подобных телескопов во флуоресцентных лидарах нецелесообразно.

Зеркальные системы в отличие от линзовых могут работать в различных диапазонах спектра, где использование линзовых систем затруднено из-за отсутствия материалов с низким коэффициентом поглощения. К преимуществам зеркальных систем относится отсутствие хроматических аберраций, высокий коэффициент пропускания многоэлементных систем. При сравнительно несложной конструкции зеркальных систем можно получить хорошую коррекцию сферической аберрации. При одинаковых значениях фокусных расстояний продольные габариты рефлекторов меньше, чем у рефракторов, это позволяет сделать систему компактной при больших габаритах.

Требования к материалу, из которого может быть изготовлена подложка для зеркал (подложка может быть и металлической), значительно ниже, чем требования к материалу, предъявляемые для изготовления линзовых систем. Однако для зеркальных систем характерно наличие экранирования приемной апертуры, вызванное наличием вторичного элемента. В табл. 10.2 представлены основные схемы зеркальных телескопов используемых в приемных системах лидарных систем.

Излучение, собранное приемным телескопом имеет полезную составляющую, определяемую процессом взаимодействия и помеху, вызванную фоновым излучением неба, солнца, подстилающей поверхности и других источников. Для отсеечения помехи используются фильтры различного типа: спектральные интерференционные фильтры для выделения узкой части спектра и подавления фонового излучения; поляризационные фильтры для выделения определенной поляризации

и т. д. Отфильтрованное излучение, направляется на фотодетектор, который предназначен для преобразования оптических сигналов в электрические, с целью их последующей обработки в электронных трактах лидара.

Таблица 10.2

Основные схемы телескопов для лидарных применений

Название	Оптическая схема	Поверхности	Примечания
Система Ньютона		1 - парабола; 2 - плоскость	Зеркало 1 можно делать сферическим при маленьком относительном отверстии
Система Кассегрена		1 - парабола; 2 - гипербола	Хорошее качество изображения при небольшом поле зрения
Система Ломоносова		1 - парабола	Зеркало 1 можно делать сферическим при маленьком относительном отверстии
Система Мерсена		1 - парабола; 2 - парабола	Не строит изображения - на выходе параллельный пучок света

Информация о свойствах зондируемой среды извлекается из анализа амплитудных, временных, спектральных, поляризационных и когерентных характеристик принятого приемной системой рассеянного атмосферой оптического сигнала. Характеристики сигнала накладывают технические условия на выбор и работу фотоприемных устройств.

Для сравнения фотоприемников между собой и оценки их функциональных возможностей в составе аппаратуры можно определить основные параметры, характеризующие их свойства.

1. *Спектральная чувствительность фотоприемника.* Это зависимость величины генерируемого тока от длины волны.

2. *Чувствительность фотоприемника.* Это величина фотосигнала на выходе фотоприемника при единичной падающей световой мощности. Сигналы на выходе фотоприемников измеряют в вольтах либо амперах, следовательно, чувствительность фотоприемника имеет размерность ампер/ватт либо вольт/ватт.

3. *Обнаружительная способность.* Эта величина определяется шириной полосы частот, площадью приемной площадки и минимальной регистрируемой световой мощностью. Таким образом, D^* описывает предельные шумовые характеристики фотоприемников.

4. *Эквивалентная мощность шума.* Этот параметр равен мощности световой мощности, при котором отношение сигнал/шум равно 1. Этот параметр измеряется в Вт/Гц^{0.5}. Если рабочая площадка фотоприемника S , полоса частот $\Delta\nu$, и для фотоприемника известен параметр D^* , то эквивалентная мощность:

$$NEP = \frac{\sqrt{S \Delta\nu}}{D^*}. \quad (10.1)$$

Эта величина может быть найдена, если известны S , $\Delta\nu$ и D^* , и является характеристикой конкретного приемника, в то время как D^* является характеристикой типа приемника.

5. *Частотно-временные характеристики.* Эти свойства описываются величинами τ – постоянной времени и $f_{гр}$ – граничной частотой. Граничная частота $f_{гр}$ соответствует частоте, при которой величина сигнала будет меньше падающего в 2 раза (3 дБ).

Для лидарных систем УФ, видимого и ближнего ИК-диапазонов универсальным приемником излучения является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – высоковакуумный прибор, конструктивно и функционально объединяющий фотокатод и электронный усилитель на эффекте вторичной эмиссии электронов. Для среднего и дальнего ИК-диапазона наиболее подходят полупроводниковые приемники.

Спектральные характеристики фотоприемников определяются электронным (зонным) строением полупроводникового материала, температурой, технологией изготовления. На рис. 10.5 представлены кривые обнаружительной способности в зависимости от длины волны основных полупроводниковых материалов используемых в фотодетекторах.

Сигнал, детектируемый лидаром, определяется эффектом, на котором основано взаимодействие излучения со средой и описывается лидарным уравнением.

Совокупность характеристик зондирующего лазера, приемной системы и фотодетектора под управлением СУСД определяет эффективность решения задачи дистанционного зондирования с помощью лидара.

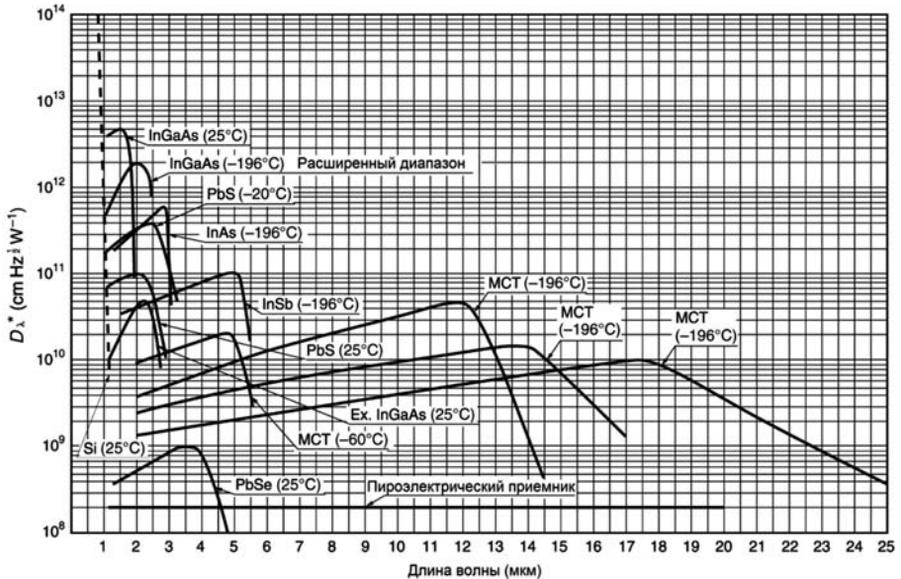


Рис. 10.5
Спектральные характеристики полупроводниковых материалов

10.3. ЛИДАРНОЕ УРАВНЕНИЕ

Эффективность работы лидара определяется несколькими факторами, часть которых определяется атмосферой, например: коэффициент обратного рассеяния β [$\text{м}^{-1}\text{ср}^{-1}$], коэффициент ослабления α [м^{-1}] и структурная постоянная показателя преломления C_n^2 . Аппаратные характеристики лидара, такие как диаметр приемного телескопа, выходная энергия лазера, шумы приемника, пропускание системы оптимизируются с учетом массогабаритных требований и т.д.

Коэффициенты β и α определяют мощность рассеянного зондирующего излучения, которая собирается приемной апертурой лидара. В предположении однократного рассеяния, сигнал одночастотного лазерного зондирования аэрозольной атмосферы на длине волны λ описывается уравнением лазерной локации, справедливого в условиях слабого вклада многократного рассеяния:

$$P_r(\lambda, r) = \eta_{all}\eta_g(r)P_0 \left[\frac{c\tau}{2} \right] \frac{A_r}{r^2} \beta(\lambda, r) \exp\left\{-2 \int_0^r \alpha(\lambda, r) dr\right\} + P_{bg}, \quad (10.2)$$

где P_0 – пиковая мощность импульса лазера, r – дальность с которой принимается сигнал, λ – длина волны лазера, η_{all} – общая эффективность лидарной системы, c – скорость света, τ – длительность лазерного импульса, $\eta_g(r)$ – геометрический фактор (зависит от геометрии оптической системы лидара, максимальное значение равно единице), A_r – площадь приемной антенны, $\beta(\lambda, r)$ – аэрозольный коэффициент обратного рассеяния, $\alpha(\lambda, r)$ – аэрозольный коэффициент ослабления, P_{bg} – мощность фонового сигнала.

Общая эффективность системы η_{all} включает в себя эффективность передающей оптической системы, оптической приемной системы, потери связанные с юстировкой приемника, эффективность фотодетектора и другие факторы, специфичные для каждой конкретной системы.

Геометрический фактор $\eta_g(r)$ описывает функцию перекрытия полей зрения приемной системы и пятна лазерного излучения (рис. 10.6).

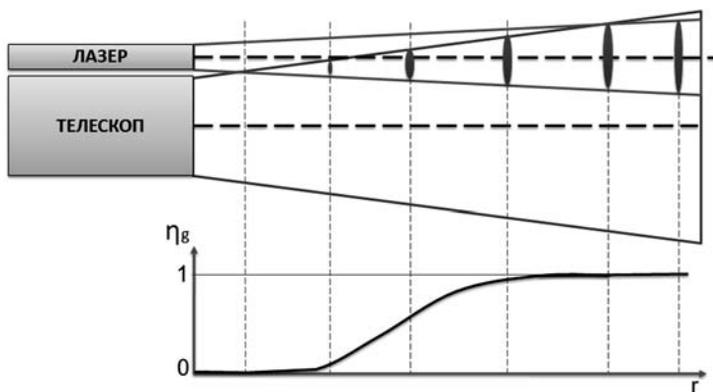


Рис. 10.6
Геометрический фактор лидара

Форма кривой геометрического фактора определяется конструкцией системы, в частности расходимостью лазерного пучка, полем зрения приемной системы, линейным расстоянием и углом рассогласования (разъюстировки) между осями передающей и приемной системы и другими факторами. Значение геометрического фактора безразмерное и лежит в диапазоне от 0 до 1.

В общем случае, отражение назад лазерного импульса из атмосферы обуславливается как аэрозолями, так и молекулами, т.е. коэффициент β можно представить в виде суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния:

$$\beta(\lambda, r) = \beta_a(\lambda, r) + \beta_m(\lambda, r), \quad (10.3)$$

где индексы a и m определяют аэрозоль и молекулы соответственно.

Связь объемных коэффициентов обратного рассеяния и коэффициентов ослабления, можно выразить через так называемое «лидарное отношение» g :

$$\begin{aligned} \alpha_a &= g^a \beta_a; \\ \alpha_m &= g^m \beta_m. \end{aligned} \tag{10.4}$$

Соответственно, в уравнении (10.2) коэффициент ослабления α в общем случае является суммой аэрозольной и молекулярной составляющей:

$$\alpha(\lambda, r) = \alpha_a(\lambda, r) + \alpha_m(\lambda, r). \tag{10.5}$$

Множитель $\frac{Ar}{r^2}$ определяет телесный угол, под которым видна приемная система с расстояния r .

Множитель $\frac{ct}{2}$ определяет пространственное разрешение лидара, т.е. длину пространства с которого регистрируется сигнал в определенный момент t . Сигналы из объема определяемым пространственным разрешением принимаются одновременно, поэтому в общем случае данное расстояние определяет минимальное расстояние, на котором возможен анализ лидарного сигнала.

При одночастотном лазерном зондировании, мощность эхосигналов и получаемая информация связана с профилем коэффициента аэрозольного ослабления α или обратного рассеяния β .

Информация о физической природе, концентрации и распределении аэрозольных частиц по размерам содержится в величинах β и α , а о концентрации газовых компонентов – в величине α . В случае наличия поглощающих газов по трассе зондирования, оптическая плотность вычисляется следующим образом:

$$T(\lambda, R) = \exp \left\{ -2 \sum_i \int_0^R [c_i(r) \cdot k_i(\lambda) + \alpha_a(\lambda, r) + \alpha_m(\lambda, r)] dr \right\}, \tag{10.6}$$

где $c_i(r)$ – относительная объемная концентрация i -го поглощающего компонента в атмосфере в точке на удалении r от лидара; $k_i(\lambda, r)$ – коэффициент поглощения i -м компонентом на длине волны λ ; $\alpha_a(\lambda, r)$ – коэффициент ослабления излучения вследствие рассеяния и поглощения излучения аэрозолем на длине волны λ в точке r ; $\alpha_m(\lambda, r)$ – коэффициент ослабления излучения вследствие молекулярного рассеяния длине волны λ в точке r (2).

На рис. 10.7 представлен характерный лидарный сигнал, получаемый при распространении излучения в однородной атмосфере, отраженный от аэрозольных образований с учетом геометрического фактора лидара.

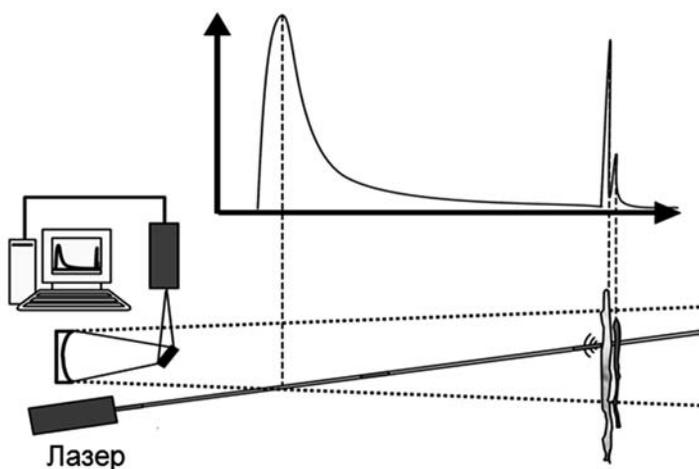


Рис.10.7
Типичный лидарный сигнал

10.4.

РЕШЕНИЕ ЛИДАРНОГО УРАВНЕНИЯ

Уравнение лидарной локации (10.2) входят две оптические аэрозольные характеристики. Данное обстоятельство затрудняет обработку лидарных сигналов, но применительно к конкретным аэрозольным ситуациям и, внося некоторые допущения, можно вывести достаточно эффективные методы решения лидарного уравнения и оценки α или β .

Для решения лидарного уравнения относительно α или β при проведении зондирования атмосферы используется один из следующих методов:

- метод логарифмической производной;
- метод асимптотического сигнала;
- метод интегрального накопления;
- метод Клетга;
- метод Фернальда.

При использовании указанных методов восстановления параметров атмосферы необходимо провести первоначальную обработку данных лидарного зондирования. Она заключается в следующих этапах:

- вычитание фона;
- нормировка на R^2 ;
- нормирование на геометрический фактор (если требуется).

Полученный массив данных описывает лидарный сигнал, который зависит только от оптических характеристик среды, и следовательно, к нему можно применить один из указанных выше методов восстановления, рассмотрим некоторые из них подробнее.

**10.4.1.
МЕТОД ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДНОЙ**

Этот метод обычно используют при зондировании квазиоднородной среды, для которой лидарное отношение можно считать постоянным, а поглощением излучения можно пренебречь.

Введя обозначение: $S(r) = (P_r(r) - P_{bg})r^2$ и обозначая через A все аппаратные константы, получим упрощенное лидарное уравнение в виде:

$$S(r) = P_0 A \beta \exp(-2\alpha r), \tag{10.7}$$

где $\alpha = \alpha_a + \alpha_m$, а $\beta = \beta_a + \beta_m$ – коэффициенты ослабления и обратного рассеяния с учетом аэрозольной и молекулярной составляющей.

В однородной аэрозольной атмосфере выполняется условие $\frac{d\beta(r)}{dr} = 0$, следовательно, коэффициент ослабления равен:

$$\alpha(r) = -\frac{1}{2} \frac{d \ln S(r)}{dr}. \tag{10.8}$$

Данный метод не требует априорной информации о лидарном отношении и аппаратных констант лидара. Определив значение $S(r)$ в двух точках R_1 и R_2 , получим значение коэффициента ослабления (экстинкции) в однородной толще:

$$\alpha(r) = \frac{1}{2(R_2 - R_1)} \ln \frac{S(r_1)}{S(r_2)}. \tag{10.9}$$

При наличии неоднородности аэрозольного рассеяния вдоль направления зондирования значение α в пределах неоднородности определяется по формуле (10.9) при значениях R_1 и R_2 , соответствующих границам области, занимаемой неоднородностью (в предположении сохранения значения лидарного отношения).

**10.4.2.
МЕТОД КЛЕТГА**

Методы логарифмической производной, асимптотического сигнала, или интегрального накопления применимы к атмосфере с относительно однородной структурой, что приводит к увеличению ошибки восстановления $\alpha(r)$ или $\beta(r)$ в случае наличия в трассе аэрозольного образования с другим лидарным отношением.

В неоднородной среде требуется учитывать зависимость распределения коэффициента обратного рассеяния, в связи с этим был предложен метод решения лидарного уравнения на основе нескольких допущений, который получил название метод Клетта. Аналитическое решение лидарного уравнения базируется на следующих предположениях:

- режим однократного рассеяния;
- постоянное лидарное отношение ($g = 20 - 100 \text{ ср}^{-1}$);
- имеется точка на трассе зондирования, для которой характерно только молекулярное рассеяние.

Последнее условие обычно выполняется для атмосферы выше приземного слоя. Для метода Клетта, используется следующая связь коэффициента обратного рассеяния и ослабления:

$$\beta(r) = k\alpha^s(r), \quad (10.10)$$

где k – константа, зависящая от типа аэрозоля, длины волны лазера, s – константа, лежащая в пределах $0.67 - 1$ (для водных облаков $s \approx 1$ и $k \approx 0.05 \text{ ср}^{-1}$).

При решении лидарного уравнения методом Клетта, принимается, что детектируемый сигнал является результатом молекулярного и аэрозольного рассеяния.

Коэффициенты молекулярного поглощения и рассеяние в лидарном уравнении могут быть найдены, используя данные измерения радиозондов или рассчитаны, используя стандартные модели атмосферы и атмосферные константы. Как показывает практика, для аэрозольных лидаров используются лазеры с длиной волны слабо поглощаемое молекулами воздуха, поэтому, молекулярным поглощением можно пренебречь. Профили температуры и давления получают прямыми измерениями с помощью зондов или рассчитываются, используя атмосферные модели и текущие измерения у поверхности земли.

Таким образом, остается два неизвестные α и β для аэрозольной составляющей, чтобы решить одно уравнение с двумя неизвестными, вводится априорная связь этих коэффициентов через лидарное отношение, которое, строго говоря, не является постоянной в пространстве и зависит от многих параметров, в том числе и длины волн:

$$g_{aer}(\lambda, r) = \frac{\alpha_{aer}(\lambda, r)}{\beta_{aer}(\lambda, r)}. \quad (10.11)$$

Для связи молекулярного ослабления и рассеяния назад используется молекулярное лидарное отношение:

$$g_{mol}(\lambda, r) = \frac{\alpha_{mol}(\lambda, r)}{\beta_{mol}(\lambda, r)} = \frac{8\pi}{3}. \quad (10.12)$$

Используя указанные допущения и введенные обозначения, решение лидарного уравнения для коэффициента аэрозольного рассеяния назад выглядит следующим образом:

$$\beta_{aer}(r) = -\beta_{mol}(r) + \frac{S(r)\exp[-2(g_{aer}-g_{mol})\int_{r_0}^r \beta_{mol}(r)dr]}{\frac{S(r_0)}{\beta_{aer}(r_0)+\beta_{mol}(r_0)} - 2g_{aer}\int_{r_0}^r S(r)\exp[-2(g_{aer}-g_{mol})\int_{r_0}^r \beta_{mol}(r)dr]dr}, \quad (10.13)$$

где $S(r_0)$ – нормированный лидарный сигнал на дистанции r_0 , где вводится допущение о только молекулярном рассеянии.

Уравнение (10.13) может быть решено как в «прямом» направлении, т. е. когда r_0 выбирается близко к лидару, так и в обратном, когда r_0 – дистанция максимального удаления от лидара, в котором присутствует сигнал (отношение сигнал/шум более 1), однако предпочтительнее использовать калибровку в дальней зоне.

При зондировании оптически плотной среды погрешности решения Клетта зависят от погрешности определения коэффициента экстинкции на границе области зондирования. Завышение граничного значения коэффициента экстинкции дает меньшую погрешность, чем эквивалентное занижение. Для однородной атмосферы метод логарифмической производной имеет преимущество перед методом Клетта в силу его простоты, однако сильные ошибки при наличии аэрозольных неоднородностей не позволяют его использовать в лидарах.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 10

10.1. Множество процессов взаимодействия лазерного излучения с атмосферой явились основой для разработки множества типов лидарных систем. В зависимости от типа приема-передающего тракта детектируемый сигнал определяется условием совмещения лазерного пучка и поля зрения приемной системы. Получение качественных и количественных результатов из данных лидарного сканирования возможно после обработки данных в определенной последовательности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 10

- 10.1. В каких лидарах предпочтительно использовать зеркальные оптические системы?
- 10.2. Зависит ли величина принимаемого приемником сигнала от угла согласования осей приемника и передатчика?
- 10.3. Максимальное значение, которое может принимать геометрический фактор в лидарном уравнении?
- 10.4. В чем смысл предварительной обработки лидарных сигналов?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 10

- 10.1. ГОСТ 24631-81. Атмосферы справочные. Параметры. М.: ГК Стандартов, 1981, 30 с.
- 10.2. Хинкли Э.Д. Лазерное зондирование атмосферы. М.: «Мир», 1979, 416 с.
- 10.3. Зув В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982.

ГЛАВА 11

ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Аэрозольный лидар предназначен для детектирования аэрозольных образований естественного и антропогенного характера, к ним относят облака различного типа, дымовые шлейфы, выбросы пыли, сажи и т.д. Также с помощью аэрозольного лидара возможно определение концентрации атмосферного аэрозоля, построение его пространственного распределения в реальном времени и анализ его физической природы.

Обычно реализация аэрозольного лидара осуществляется на основе системы с твердотельным Nd:YAG-лазером, полупроводниковым или волоконным лазером, и коаксиальной приемной системой. Для обеспечения возможности детектирования аэрозолей на большой площади, аэрозольные лидары имеют сканирующую систему.

В режиме сканирования лидар имеет возможность автоматического (полуавтоматического) обнаружения аномальных паровых или аэрозольных образований в зоне видимости, и определения координат центра облака, для последующего анализа, а также для слежения за динамикой распространения облака. Автоматическое обнаружение аэрозольных образований, необходимо для регистрации факта возможного выброса опасных химических соединений на производствах.

Сканирование пространства может осуществляться однозеркальным или двухзеркальным сканером (рис. 11.1, вкл. ил. б), который изменяет положение оптических осей приемных и передающих каналов одновременно. Такое решение позволяет обеспечить стабильность взаимной юстировки всех каналов лидара, независимой от углового положения линии зондирования.

Однозеркальный сканер (рис. 11.1, а) в походном положении убирается внутрь контейнера в случае мобильного лидара с помощью специального привода и герметично закрывается крышкой. Диапазон сканирования по углу места от -7° до $+20^\circ$, по азимуту $\pm 180^\circ$. Схема двухзеркального сканера (рис. 11.1, б) позволяет зондировать всю верхнюю полусферу.

Точность и повторяемость углового положения линии зондирования определяется классом применяемых датчиков угла и составляет $40''$. На корпусе сканера возможно установка систем видеонаблюдения, которое осуществляется синхронно с лидарным зондированием в видимом диапазоне – цифровой видеокамерой с переменным фокусным расстоянием – и (или) в дальнем инфракрасном диапа-

зоне – тепловизором. На рис. 11.2 (вкл. ил. 7) представлена схема вывода и приема излучения аэрозольных лидаров в МЛК-2 и МЛК-3 через единый телескоп.

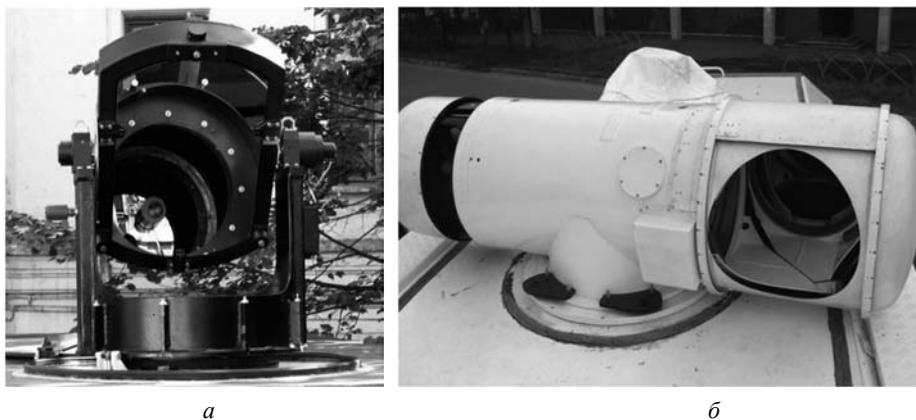


Рис. 11.1

Сканер:

а – однозеркальный, *б* – двухзеркальный

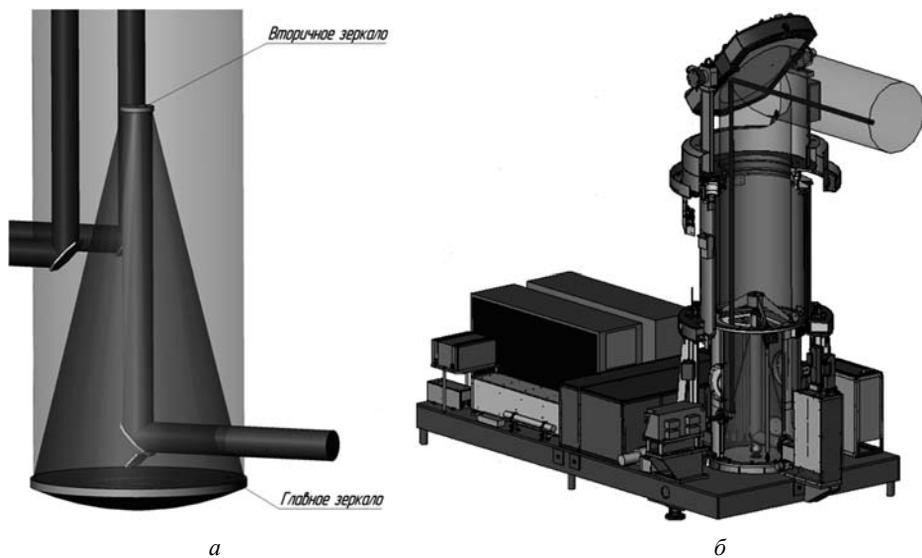


Рис. 11.2

Схемы вывода излучения:

а – аэрозольный лидар в МЛК-2; *б* – аэрозольный лидар в МЛК-3

Все крупногабаритные оптические элементы изготовлены из ситалла по облегченной технологии и закреплены с разгрузкой, обеспечивающей сохранение оптического качества поверхности во всех режимах работы и при всех ориентациях зеркал.

На рис. 11.3 и 11.4 представлены оптические схемы аэрозольного канала мобильного лидарного комплекса в части приемо-передающего телескопа и фотоприёмного модуля.

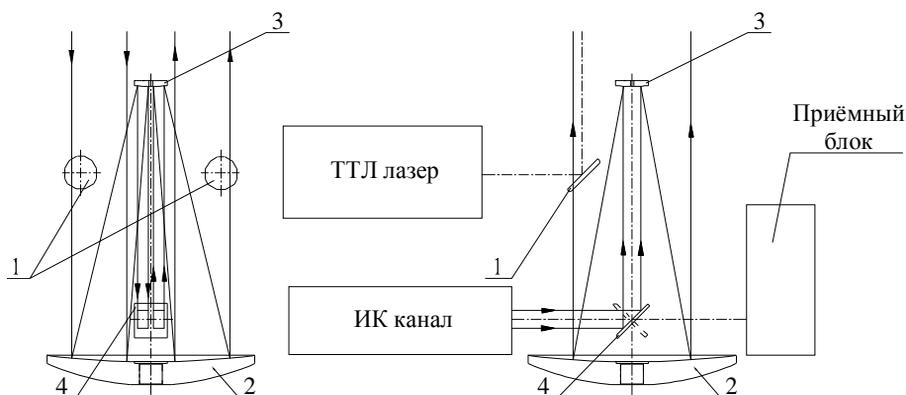
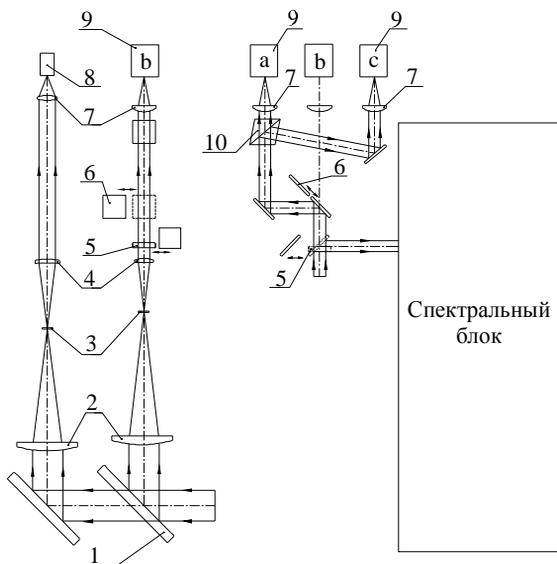


Рис. 11.3

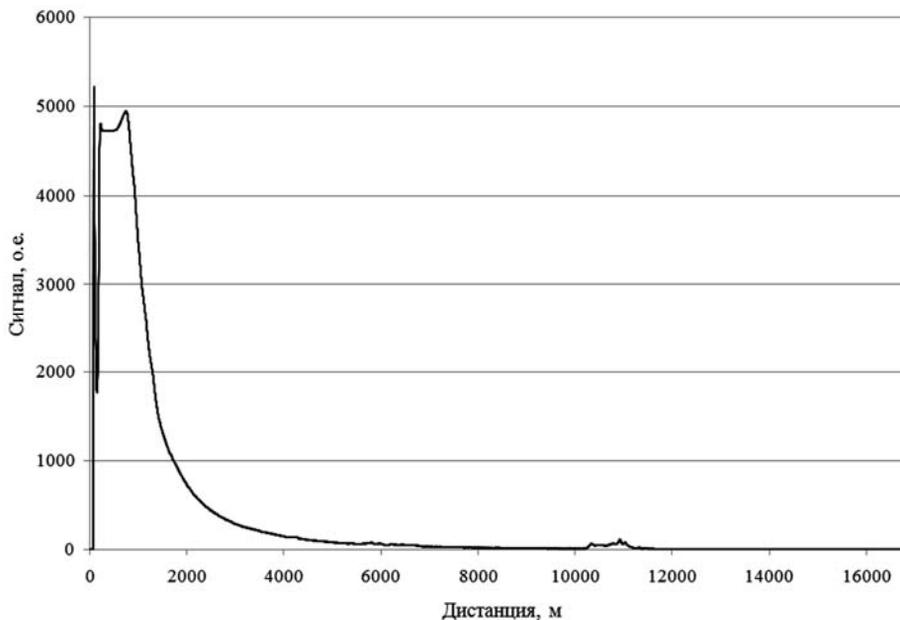
Оптическая схема аэрозольного канала МЛК-2, представлен приемо-передающий телескоп: 1 – выводные зеркала KV канала, 2 – главное зеркало телескопа, 3 – вторичное зеркало, 4 – разделительное выводное зеркало

При работе в режиме аэрозольного лидара получаемые данные обрабатываются методами, характерными для нахождения параметров аэрозольной атмосферы, коэффициентов обратного рассеяния и аэрозольного ослабления. На рис. 11.5 представлены характерные первичные данные, получаемые лидаром, при зондировании на длине волны 532 нм вертикальной трассы. Результат первичной обработки включающей в себя вычитание фона и нормировки на квадрат дистанции (рис. 11.6). Видно, что после первичной обработки, в сигнале отчетливо выделяются структура облачного слоя на расстоянии 4200 и 6200 метров. Это связано с сильной обратной квадратичной зависимостью принимаемого сигнала.

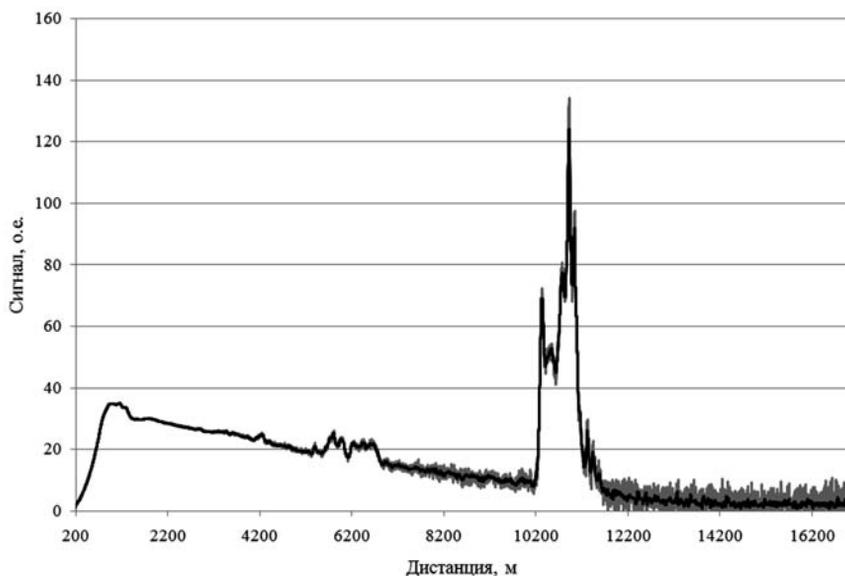
На рис. 11.6 черным графиком представлен результат медианной фильтрации нормированного сигнала, серым – исходный нормированный сигнал.

**Рис. 11.4**

Оптические схемы аэрозольного канала МЛК-2: представлен приемный блок коротковолнового канала: 1 – зеркало с диэлектрическим покрытием, 2, 4 – оптика объектива, 3 – диафрагма, 5 – сменные оптические фильтры и отводное зеркало на вращающейся турели, 6 – подвижное зеркало, 7 – фокусирующие линзы, 8 – ЛФД, 9 – ФЭУ, 10 – призма Глана-Тейлора

**Рис. 11.5**

Первичные лидарные данные

**Рис. 11.6**

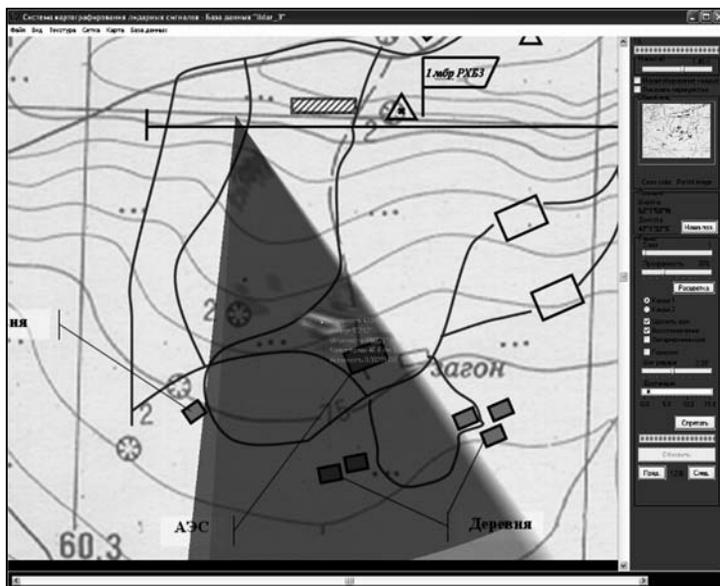
Лидарные данные после первичной обработки

Обработанные данные можно использовать для визуального отображения данных аэрозольного сканирования на карте местности. На рис. 11.7 представлены результаты сканирования в горизонтальной плоскости аэрозольным лидаром, входящим в состав мобильного лидарного комплекса «Смуглянка – ЛС», разработанного «ООО «НПП «Лазерные системы». Параметры лидара приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Технические характеристики мобильного лидарного комплекса зондирования атмосферных аэрозолей

Лазер	Nd-YAG
Длина волны, нм	1.064
Частота следования импульсов, Гц	25
Энергия импульса, мДж	200
Длительность импульса, нс	30
Максимальная дальность, км	18
Минимальная дальность, м	200
Углы обзора, °	
- по вертикали	- 7 +15
- по горизонтали	± 360

**Рис. 11.7**

Картографирование аэрозольного следа выброса
в режиме аэрозольного сканирования

По результатам сканирования производится наложение сигналов (рис. 11.7) на карту местности и в полуавтоматическом режиме определяются координаты центра облака для проведения дальнейшего анализа.

На рис. 11.8 представлен результат мониторинга вертикального профиля объемного коэффициента ослабления (экстинкции) $\alpha(z)$, полученный при зондировании в зенит с использованием лазера на 1064 нм, выполненного 25 марта 2013 г. на башне обсерватории экологической безопасности СПбГУ, расположенной в центре Санкт-Петербурга на Васильевском острове.

На рис. 11.8 показан график коэффициента экстинкции, измеренного в течение 1 часа. На рисунке виден слой аэрозольного загрязнения над городом до высоты 1.7 км с максимумом на 0.7 км, который уменьшается в течение 45 мин (от 15:30 до 16:15) ($\alpha(z) \sim 0.056 \text{ км}^{-1}$).

При увеличении вертикальной развертки до 25 км в стратосфере отчетливо виден аэрозольный слой Юнга на высотах от 17 до 22 км ($\alpha(z) \sim 0.02 \text{ км}^{-1}$).

Аэрозольный лидар позволяет измерить деполаризацию излучения, которая говорит об одной из основных характеристик аэрозольных частиц – форме. Выделяют частицы сферические (капли) и несферические (кристаллы, пыль и др.). Форма частиц определяется их происхождением и может указывать на источник аэрозолей.

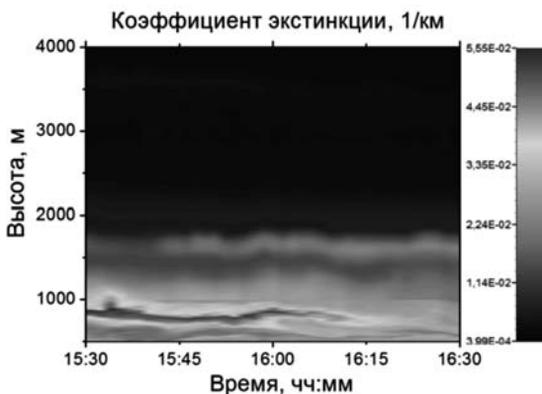


Рис. 11.8
Кoeffициент экстинкции

Рис. 11.9 иллюстрирует результат измерения объемного коoeffициента ослабления и деполаризации атмосферных аэрозолей в г. Санкт-Петербурге 06.06.2013 г. Видно, что в приземном слое < 1 км («шапка загрязнений» над городом) преобладают частицы, по форме близкие к сферическим (но не сферические). На высоте 10 км явно выделяются тонкие перистые облака с частицами кристаллической формы.

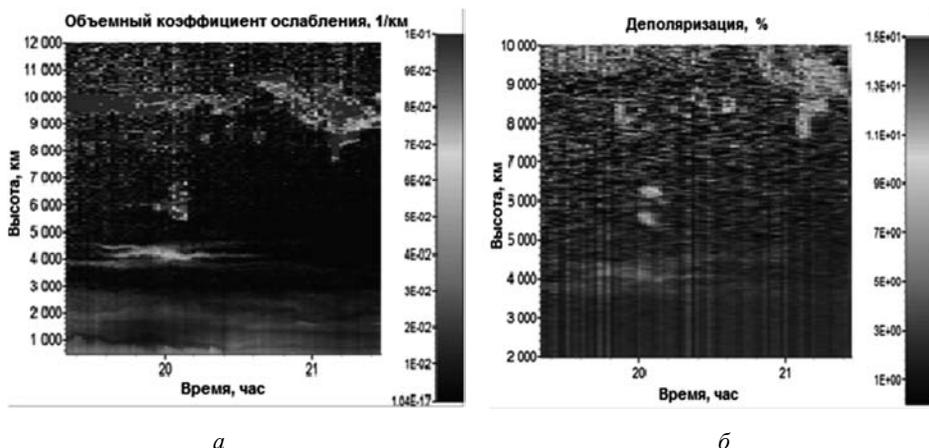


Рис. 11.9

Зависимость от времени и высоты в атмосфере: *а* – объемного коoeffициента ослабления (1/км); *б* – деполаризации (%) по результатам лидарного зондирования 06.06.2013 г.

Развитие технологий микрочиповых лазеров позволило создать новый класс компактных, мобильных аэрозольных лидаров позволяющих детектировать аэрозольные образования на дистанциях свыше 10 км. Следует отметить портативный

аэрозольный лидар EZLIDAR (внешний вид представлен на рис. 11.10, *а*), разработанный французской компанией LEOSPHERE, который работает на одной длине волны, 355 нм и позволяет детектировать аэрозольные образования на дистанциях до 15–20 км. Основные технические характеристики лидара представлены в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Технические характеристики EZLIDAR

Дистанция детектирования	50 м–20 км
Обновление данных зондирования, с	1 /30
Пространственное разрешение, м	1.5/15
Угловое разрешение, °	0.2
Скорость сканирования, °/с	8
Температурные режимы, °С	–20...+50
Влажность, %	0...100
Уровень пылевлагозащиты	IP65
Масса, кг	~48
Класс безопасности	IEC60825-1 2001

В особый ряд стоит отнести микроимпульсные лидары, например, производимый фирмой Sigma Space Corporation лидар MPL (рис. 11.10, *б*). Он работает на длине волны 532 нм, с выходной мощностью менее 10 мкДж и позволяет детектировать аэрозольные образования на дистанциях до 10 – 20 км.

Исследование аэрозольного состава земной атмосферы возможно не только помощью лидаров, установленных на земле, но и на воздушных носителях, в том числе космических платформах. Зондирование из космоса позволяет исследовать стратосферу и верхнюю тропосферу. Запущенный на орбиту в 2006 года лидар на борту космического аппарата CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) работал на двух длинах волн 532 нм и 1064 нм.



Рис. 11.10
Внешний вид лидаров: EZLIDAR (а), MPL (б)

Спутник предназначен для исследования особенностей влияния облаков и аэрозолей на формирование климата в глобальных масштабах. Лазерная передающая система представляет собой два идентичных Nd:YAG-лазера с диодной накачкой, каждый из которых имеет расширяющий объектив. Объективы уменьшают угловую расходимость лазерного луча до такой степени, что лазерное пятно на поверхности Земли составляет 70 м. Лазеры имеют пассивное охлаждение в виде радиаторной панели. Характеристики лазера представлены в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Технические характеристики лидара на борту космического аппарата CALIPSO

1064 нм выходная энергия, мДж	100...125
532 нм выходная энергия, мДж	100...125
Длительность импульса, нс	15 ... 50
Частота следования импульсов, Гц	20
Качество пучка (для обеих λ), мм-мрад	10
1064 нм ширина линии, пм	150
532 нм ширина линии, пм	35
532 нм, поляризация	Линейная 100:1
Дрожание оси r	10 % выходной расходимости

Приемная система (рис. 11.11) состоит из телескопа, передающей оптики, детекторов, электронных усилителей, линейных подвижек смонтированных на одной оптической плите. Первичное и вторичное зеркала приемного телескопа, выполнены из бериллия для минимизации и уменьшения влияния температурных градиентов. Карбоновая композитная оболочка предотвращает прямую солнечную засветку зеркал. Телескоп термически развязан с оптической плитой. Основные параметры приемной системы представлены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Параметры приемной системы лидара на борту космического аппарата CALIPSO

Диаметр телескопа, м	1
Поле зрения телескопа, мрад	130
Детектор канала 532 нм	ФЭУ
Детектор канала 1064 нм	Лавинный фотодиод

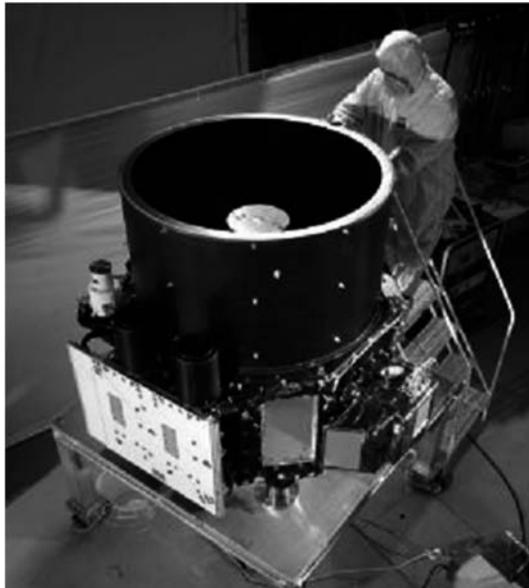


Рис. 11.11

Приемная система космического лидара в сборе

Данные, получаемые лидаром, представляют собой вертикальные профили облачности и аэрозолей с 5 км горизонтальным разрешением и включают диагностику и индексы качества данных (рис. 11.12, 11.13, вкл. ил. 8). Оптическая схема

приемного канала позволяет детектировать две поляризации обратного рассеянного излучения на длине волны 532 нм.

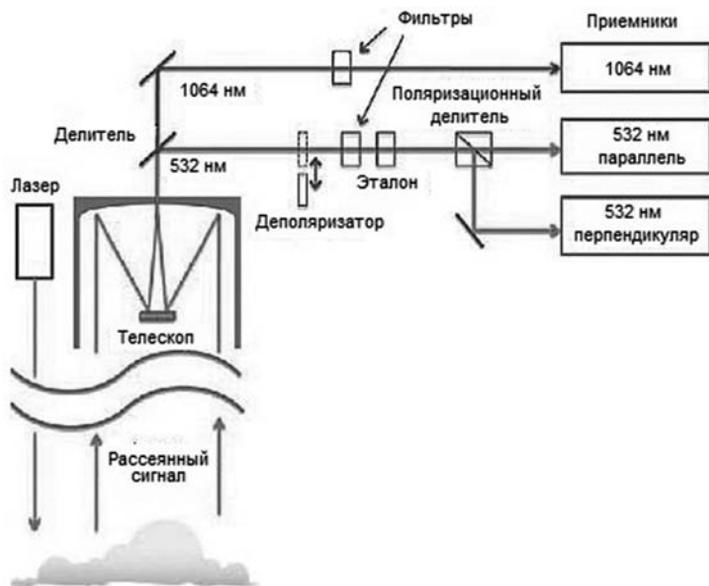


Рис. 11.12

Упрощенная оптическая схема приемного канала лидара CALIPSO

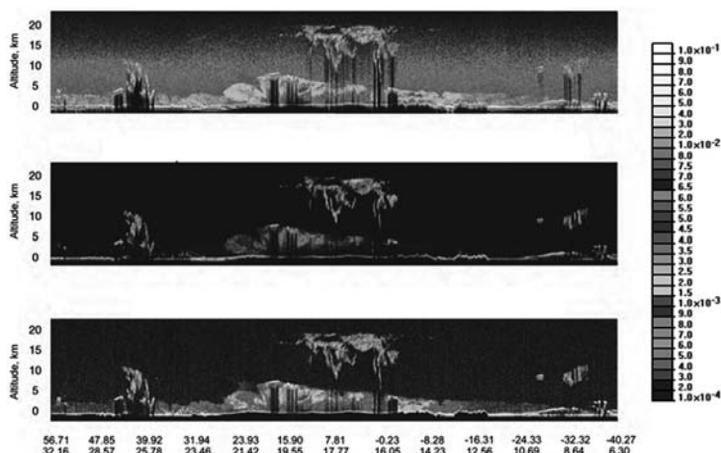


Рис. 11.13

Изображение лидарных сигналов, полученных лидаром CALIPSO в июне 2006 г.

Данные охватывают атмосферу от поверхности моря до высоты 30 км.

Верхний график – обратный сигнал на 532 нм, средний – перпендикулярная составляющая сигнала на 532 нм, нижний – обратный сигнал на 1064 нм

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 11

11.1. Аэрозольный состав атмосферы меняется непрерывно как в горизонтальном направлении, так и в вертикальном, масштаб изменений может варьироваться от нескольких сот метров до десятков километров, поэтому требуется постоянный мониторинг состояния атмосферы. Основным типом лазеров, используемых в аэрозольных лидарах, являются твердотельные лазеры, благодаря значительной выходной энергии зондирующего импульса и высокой чувствительности приемников в диапазоне генерации лазеров. Получаемые аэрозольным лидаром данные могут обрабатываться как в режиме реального времени, так и на удаленном сервере после серии измерений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 11

- 11.1. Какой тип сканера позволяет сканировать всю верхнюю полусферу?
- 11.2. Возможна ли установка лидара на космический аппарат?
- 11.3. В чем особенность сигнала, получаемого космическим лидаром?
- 11.4. Какой тип рассеяния используется в лидарах для картографирования облаков?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 11

- 11.1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Наука 1987. – 550 с.
- 11.2. Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг: Оптико-электронные приборы и системы. Т. 1. СПб., 1998. – 734 с.

ГЛАВА 12

КОНТРОЛЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

В настоящее время в технологии дистанционного определения химического загрязнения окружающей среды существует ряд методов детектирования и идентификации опасных химических веществ распределенных в атмосфере в различной фазе. Среди методов диагностирования воздушной среды различают активные и пассивные способы. Пассивные методы детектирования используют естественное излучение подстилающей поверхности или самих загрязняющих веществ, таким образом, не воздействуя на исследуемый объект. Активные подразумевают использование источника излучения с заданными исходными свойствами, при взаимодействии этого излучения с атмосферными газами происходит количественное и качественное изменение первоначальных характеристик излучения. Анализируя полученные данные можно определить количественные характеристики загрязняющих веществ распределенных в атмосфере.

Технологии дистанционного лидарного зондирования атмосферы предоставляют широкие возможности для сбора необходимых данных. Наличие мощных, надежных источников лазерного излучения покрывающих широкий спектральный диапазон, позволяет провести детальный анализ состояния окружающей среды на наличие широкого круга специфических веществ. Использование высокочувствительных и разработанных лидарных методов зондирования атмосферы на наличие опасных веществ, таких как дифференциальное поглощение (DIAL) и дифференциальное рассеяние (DISC) позволяет измерять величины концентраций на уровнях ПДК рабочих и жилых зон.

Техника дифференциального поглощения зарекомендовала себя как высокочувствительный и эффективный метод обнаружения и определения концентраций различных химических соединений. Особенности и интенсивности поглощения, характерные для каждой молекулы, позволяют идентифицировать газообразные загрязнители, а также определять их концентрации. Эффективные сечения поглощения молекул обычно имеют значение порядка 10^{-20} см², т.е. на шесть-восемь порядков больше сечений комбинационного рассеяния.

В классической схеме лидара дифференциального поглощения используется две длины волны, одна из которых имеет более сильное поглощение газом, чем другая, и они соответственно обозначаются *on* и *off*. Особенности спектрального поглощения различных молекул обуславливают выбор рабочих длин волн. В случае узкополосного поглощения, *on*-длина волны выбирается таким образом, чтобы она попадала в линию поглощения газа, а *off*-длина, не поглощалась или имела минимальный коэффициент поглощения. На рис. 12.1 приведен пример выбора длин волн для узкополосного спектра поглощения на примере молекулы метана. Для широкополосного спектра поглощения, например как у озона выбор длин волн осуществляется исходя из требуемой разности поглощения (см. рис. 12.1).

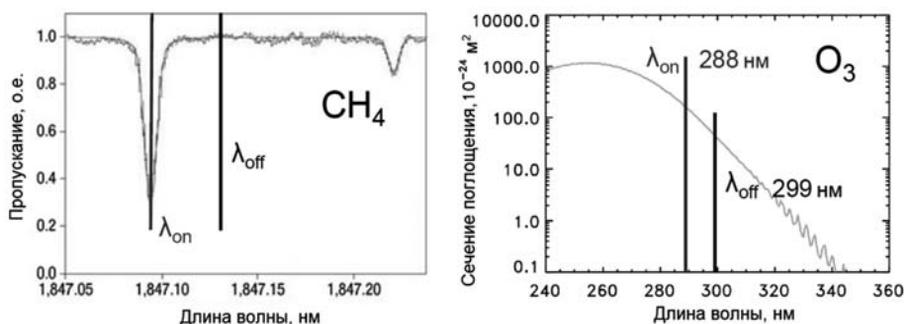


Рис. 12.1

Метод дифференциального поглощения для различных типов спектра

В ультрафиолетовой области (220...400 нм) возможности лидаров для газоанализа сильно ограничены вследствие поглощения кислорода ниже 220 нм. В УФ-диапазоне находятся спектры поглощения многих газов, в частности: SO_x, O₃, NO, NO₂, Cl₂, и др. В видимом диапазоне (400...700 нм) несколько газов имеют линии поглощения, пригодные для использования в ДП методе: N₂O, I₂, и H₂O. В среднем ИК-диапазоне (1...25 мкм) многие газы имеют характерные особенности поглощения. Линии поглощения в ИК спектральном диапазоне в основном обусловлены колебательно-вращательными переходами, а в УФ-диапазоне они определяются электронными переходами молекул.

Однако, в ИК-диапазоне дистанционный контроль атмосферы ограничивается окнами прозрачности. Главные атмосферные окна приходятся на длины волн менее 2.5 мкм, от 3 до 5 мкм, и от 8 до 14 мкм, вне этих диапазонов пропускание резко уменьшается вследствие поглощения парами воды и двуокисью углерода. В дальнем ИК-диапазоне (25–500 мкм) присутствуют только сильные вращательные полосы поглощения воды, перекрывающие большую часть этого диапазона.

В ДП-лидаре лазерные импульсы испускаются либо поочередно, либо одновременно на двух близких длинах волн: λ_{on} , на которой излучение поглощается

данном веществом, и λ_{off} , на которой излучение им не поглощается. Отношение амплитуд сигналов ДП-лидара на разных длинах волн зависит только от разности эффективных сечений поглощения и от концентрации рассматриваемого вещества на пути пучка. Для реализации метода ДП требуется перестройка лазеров по частоте или излучение на двух различных длинах волн.

Рассмотрим стандартное лидарное уравнение в приближении однократного рассеяния для нескольких газов. При зондировании на двух длинах волн on и off два сигнала делятся друг на друга, и восстановление концентрации данного газа осуществляется из выражения:

$$c_k(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{2dR} \left[-\ln \frac{P_{\text{on}}(R)}{P_{\text{off}}(R)} + \ln \frac{\beta_{\text{on}}^{\pi}(R)}{\beta_{\text{off}}^{\pi}(R)} \right] - \sum_{i=1, i \neq k}^n c_i(R) \Delta\alpha_i(R) - \Delta\alpha^{\text{sct}}(R) - \Delta\beta^{\text{ext}}(R), \quad (12.1)$$

где Δ – обозначение разности между соответствующими коэффициентами на длинах волн on и off. Обычно коэффициенты обратного рассеяния, молекулярного рассеяния и аэрозольного ослабления на двух близких длинах волн одинаковы, что позволяет не брать в рассмотрение данные параметры, и их отношение берет-ся равной единице, а разность нулю. При наличии других поглощающих составляющих их необходимо учитывать либо подбирать зондирующие длины волн таким образом, чтобы нивелировать их влияние.

Средняя концентрация газа на расстоянии ΔR запишется следующим образом:

$$N(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left[\ln \frac{\frac{P_{\text{on}}(R+\Delta R)}{P_{\text{off}}(R+\Delta R)}}{\frac{P_{\text{on}}(R)}{P_{\text{off}}(R)}} \right] - \frac{\alpha_{\text{on}}^R - \alpha_{\text{off}}^R}{\Delta\sigma} + B + E; \quad (12.2)$$

$$B = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left[\frac{\beta_{\text{on}}(R+\Delta R) \beta_{\text{off}}(R+\Delta R)}{\beta_{\text{on}}(R) \beta_{\text{off}}(R)} \right];$$

$$E = \frac{-(\alpha_{\text{on}}^A - \alpha_{\text{off}}^A)}{\Delta\sigma},$$

где индексы A и R обозначают соответственно величины для аэрозольного и релеевского процесса.

Из уравнения (12.2) видно, что длины волн для дифференциального зондирования необходимо подбирать таким образом, чтобы коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния, поглощения были одинаковы, тогда вклад в изменение лидарного сигнала будет вносить только поглощение исследуемого газа.

При зондировании с помощью лидара облака, содержащего исследуемый газ, мощность рассеянного импульса на длине волны on уменьшается вследствие большего поглощения. На рис. 12.2 схематично представлена схема измерения лидаром дифференциального поглощения, а на рис. 12.3 – соответствующее изменение в детектируемом сигнале.

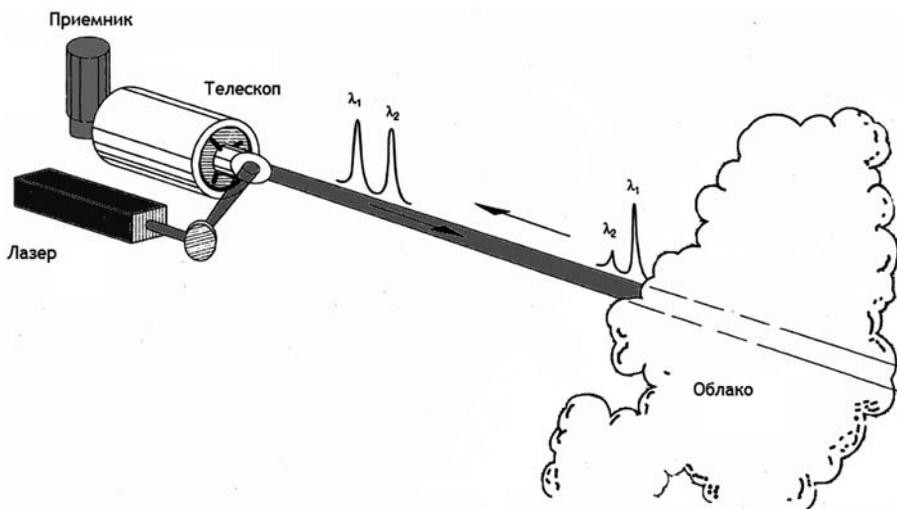


Рис. 12.2

Схема измерения лидаром дифференциального поглощения

Графики на рис. 12.3 иллюстрируют идеальные сигналы на on - и off -длинах волн, получаемые с детектора лидара, в зависимости от распределения концентрации по трассе зондирования.

Однако в лидарном уравнении, из которого восстанавливается концентрация искомого газа помимо свойств атмосферных газов и аэрозоля на рабочих длинах волн присутствует геометрический фактор лидара для каждой длине волн. Разницу геометрического фактора необходимо учитывать при проведении измерений тщательной юстировкой оптической системы или проведением калибровочных тестовых измерений для последующей нормировки получаемых данных. Кроме того, при проведении длительных измерений, т.е. когда сигнал записывается дольше, чем время изменения атмосферных условий возможна сильная деградация восстановленных данных. На рис. 12.4 представлен график получаемого сигнала при проведении измерений выброса NO_2 на расстоянии порядка 800 м в течение 30 с при сильном ветре.

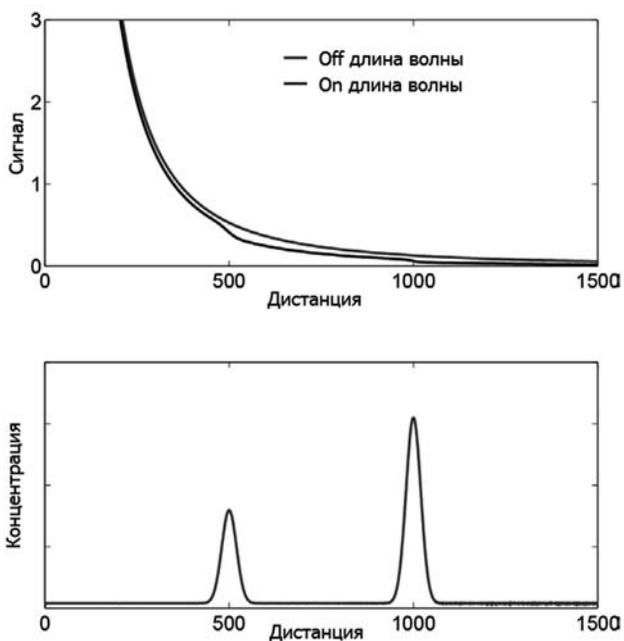


Рис. 12.3
 Детектируемый сигнал в ДП-лидаре

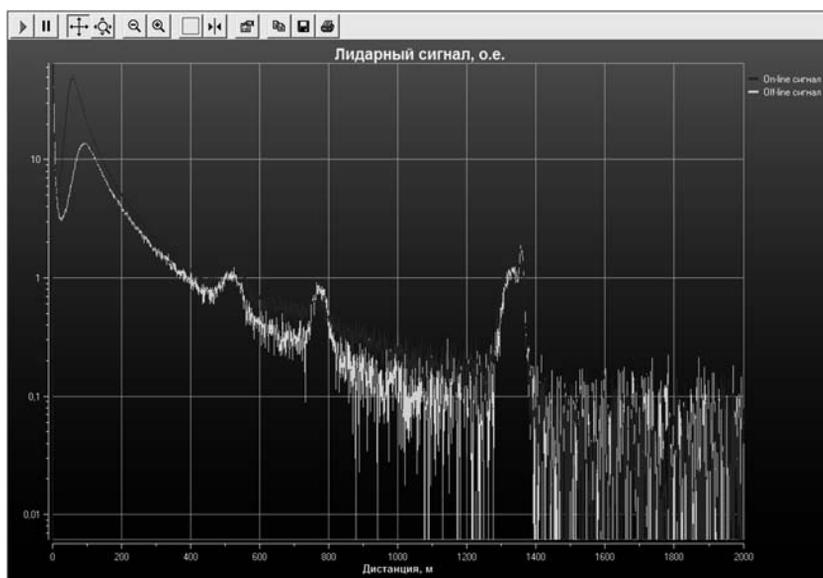


Рис. 12.4
 Лидарный сигнал

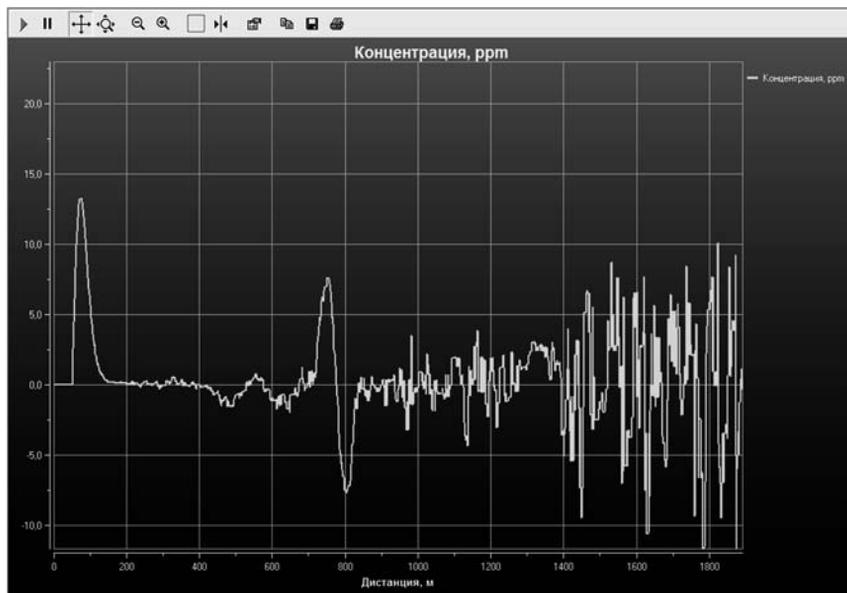


Рис. 12.5
Восстановленная концентрация NO_2

Как видно из сигналов, геометрический фактор для on- и off-длины различен, к тому же аэрозольное образование на дистанции 750 м изменяется во время измерения. При прямой обработке данных получается картина (см. рис. 12.5) не позволяющая надежно идентифицировать наличие загрязнения и его концентрацию.

В настоящее время известно более 100 стационарных и мобильных ДП-лидаров наземного и воздушного базирования для определения концентрации атмосферных газов и обнаружения опасных примесей в атмосфере. Дальность зондирования, пространственное разрешение, минимальная концентрация, определяемая ДП-лидаром, зависят от типа используемого лазера, его энергетических параметров, длины волны излучения, метода регистрации и других факторов. В число молекул, важных в экологическом отношении, входят практически все углеводороды (НС), а также окислы азота (NO , NO_2 , N_2O), аммиак (NH_3), SO_2 , окислы углерода (CO , CO_2) и др.

В табл. 12.1 представлены длины волн, используемые для детектирования нескольких газов, и характеристики спектральных коэффициентов поглощения.

На рис. 12.6 представлена схема оптических каналов лидара (а) в состав которого входят коротковолновый ДП-лидар (б) и ИК-канал для ДП-лидара в диапазоне 9–11 мкм (в).

Длинноволновый гетеродинамный лидар дифференциального поглощения (ДВ-DIAL) работает на любой из 60 линий VR-спектра CO_2 в диапазоне 9–11 мкм (рис. 12.7). Диапазон излучения CO_2 -лазера представляет собой набор узких спек-

тральных линий расположенных в диапазоне 9.2–10.8 мкм. Линии генерации расположены в четырех характерных ветвях, имеющих индексы 9R, 9P, 10R и 10P. В каждой ветви существует набор частот с четными номерами.

Таблица 12.1

Длины волн для детектирования некоторых газов

Газ	Длина волны, нм		Спектральные коэффициенты поглощения			
	On	Off	σ , (1/(atm*cm))		σ , (cm ² /mg), 10 ⁻¹⁹	
			On	Off	On	Off
NO ₂	448.25	446.83	16.73	11.2	3	2
Cl ₂	383.9	393.0	1.23	0.77	0.44	0.27
SO ₂	308.5	307.6	17.8	4.6	6.62	1.73

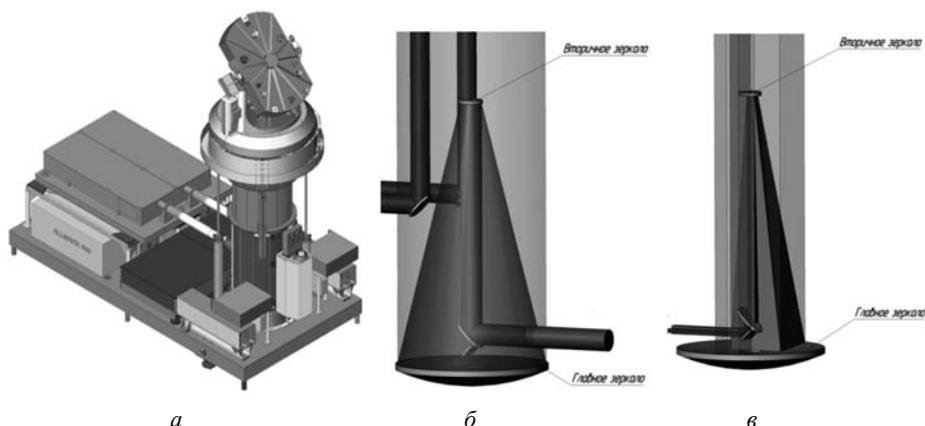


Рис. 12.6

Реализация двух ДП-лидаров (дифференциального поглощения) (а) и схема приемо-передающих каналов для коротковолновой (б) и длиноволновой части (в)

Таким образом, частоты излучения лазера можно обозначить сочетаниями, например: 9R30 или 10P18. Указанным линиям генерации соответствуют строго определенные длины волн, они табулированы и могут быть использованы для расчета поглощения отдельными газами. Количество линий генерации зависит от усиления в лазере и соответственно от добротности резонатора. При атмосферном давлении ширина линии усиления становится 5 ГГц, поэтому обычно

количество линий без применения специальных мер селекции составляет порядка 60, с использованием дополнительных мер их можно увеличить до 80.

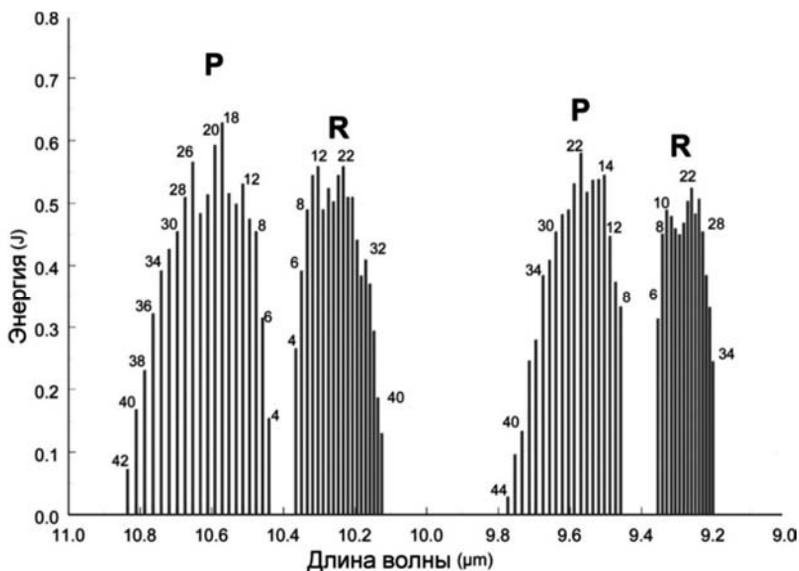


Рис. 12.7

Спектр генерации CO_2 -лазера в составе гетеродинного канала МЛК (НПП «Лазерные системы»)

Основные отравляющие вещества, применяемые в химических войсках, такие как табун, зарин, зоман и VX газы, имеют характерные линии поглощения в диапазоне генерации CO_2 -лазера, что делает его применимым для диагностики этих веществ в атмосфере. На рис. 12.8 представлены спектры поглощения веществ G-типа и диапазон генерации CO_2 -лазера.

Важная особенность оптической схемы длинноволнового лидача состоит в том, что двухканальная лазерная система, реализующая метод дифференциального поглощения, работает с матричным КРТ-детектором в режиме гетеродинного приема.

Анализ спектров показывает, что для детектирования зарина и зомана, основных ОВ необходимо обеспечить генерацию лазера в диапазоне 9.8 мкм, эта длина волны соответствует краю 9P ветви.

Возможность наложения на карту местности полученного результата измерений в режиме реального времени позволяет определить зону поражения, а наличие информации о направлении ветра и модели распространения ядовитого облака – спрогнозировать дальнейшее развитие ситуации. Сканирование сектора ответственности может осуществляться в различных временных режимах: непрерывном или периодическом (в запрограммированной последовательности).

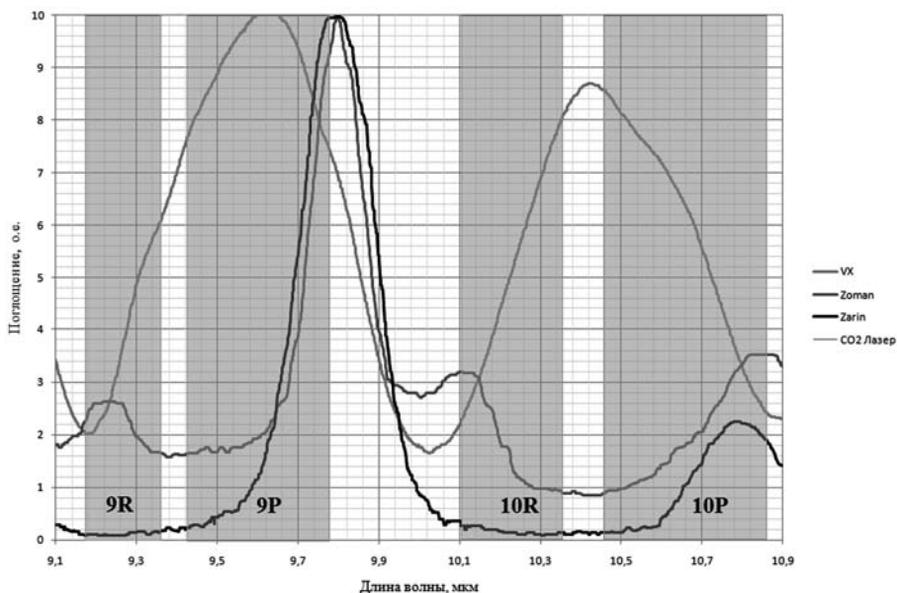


Рис. 12.8

Спектр поглощения основных отравляющих газов и спектр генерации CO₂-лазера

На рис. 12.9 приведена карта концентраций NO₂, измеренных в городских условиях в режиме коротковолнового лидара дифференциального поглощения на трассах, наклоненных к горизонту под углом 10° с помощью мобильного лидарного комплекса. Отмечаются закономерно повторяющиеся максимумы концентрации, которые могут быть привязаны к определенным объектам на карте города.



Рис. 12.9

Результаты измерений фоновых концентраций NO₂ в Санкт-Петербурге.
Цветом показаны концентрации в диапазоне 0±1 ppm

Наличие сканера позволяет проводить измерения в любом направлении и отслеживать в режиме реального времени загрязнение воздуха. На рис. 12.10 приве-

дены результаты измерения концентрации SO_2 в выхлопе транспортного корабля с интервалом в 2 минуты.

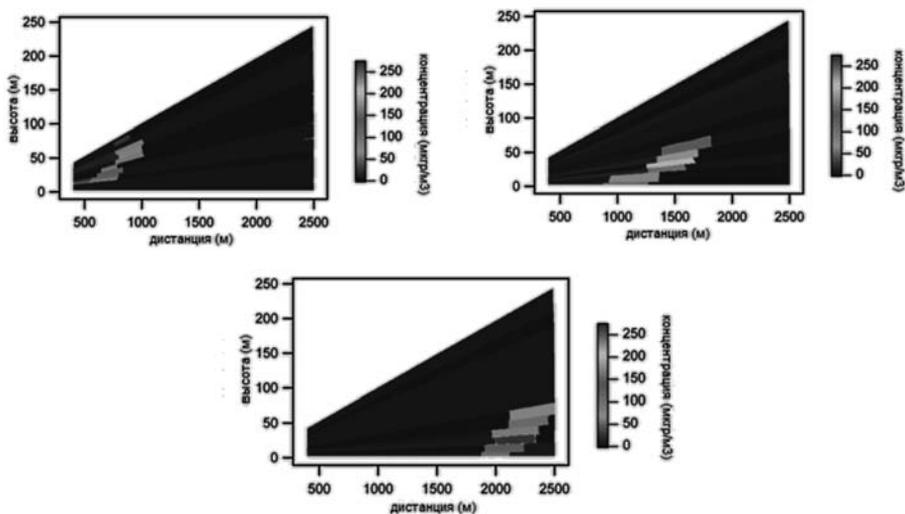


Рис. 12.10

Измерения концентрации SO_2 в выхлопе корабля

Одним из методов детектирования химических веществ в составе атмосферы является лазерная диодная спектроскопия на основе диодных перестраиваемых лазеров (TDLAS – Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy). Такой метод универсален для широкого круга веществ и позволяет обнаруживать газы при очень низкой концентрации. Малые размеры диодного лазера позволяют создавать на их базе достаточно компактные аналитические приборы.

В основе метода лазерной диодной спектроскопии лежит явление ослабления зондирующего излучения лазера при распространении его в поглощающей однородной среде. Поглощение света описывается законом Бугера-Ламберта, который выражается формулой:

$$I(l) = I_0 e^{-\chi Cl}, \quad (12.3)$$

где I_0 – интенсивность зондирующего излучения, l – толщина слоя поглощающего вещества, χ – удельный показатель поглощения вещества на данной длине волны, C – концентрация вещества. Зная толщину слоя поглощения (длину трассы зондирования), интенсивность входящего и выходящего света, удельный коэффициент поглощения для данной длины волны, можно определить концентрацию вещества.

Удельный коэффициент поглощения света определенной длины волны является характеристикой вещества и определяется из спектра поглощения вещества. При известных параметрах системы (температура воздуха, длина измерительного тракта, давление) концентрация газа в воздухе может быть определена при анализе глубины провала графика пропускания в указанном диапазоне длин волн. Для примера на рис. 12.11 показан спектр пропускания метана при определенных атмосферных условиях для разных концентраций.

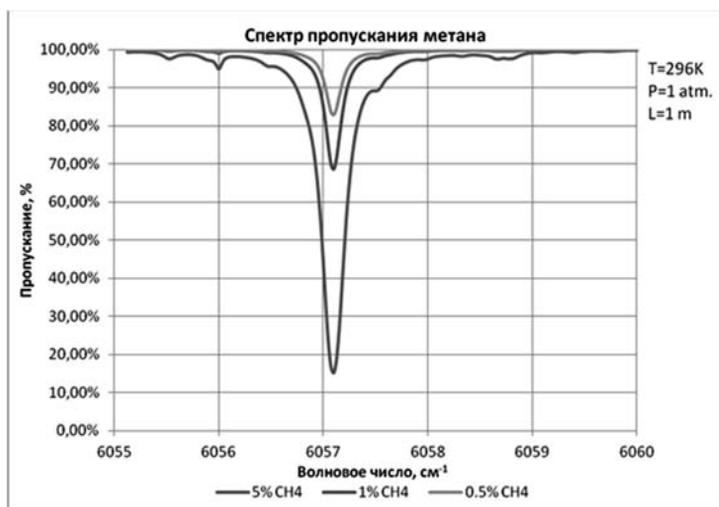


Рис. 12.11

Спектры пропускания метана при различных концентрациях

В методе TDLAS для определения величины поглощения используется узкополосный полупроводниковый лазер с распределённой обратной связью (DFB-лазер – Distributed Feed Back laser) с центральной длиной волны, близкой к линии поглощения измеряемого газа. Рабочий режим лазера (сканирующий режим) обеспечивается стабилизацией при определенной температуре и в заданном диапазоне изменения тока. Ток питания лазера модулируется по форме (пилообразная модуляция). При этом ток с заданной периодичностью изменяется между двумя значениями, не достигая нуля. Это приводит к пропорциональной модуляции выходной оптической мощности лазера и к сдвигу его центральной длины волны.

Циклический сдвиг длины волны лазера обеспечивает сканирующий режим, необходимый для детектирования пика поглощения газа в воздухе. Частота повторения может колебаться в различных пределах; она обусловлена спецификой методики измерения, конструкционными особенностями прибора, а также пара-

метрами самого лазера. Обычно частота модуляции составляет от нескольких килогерц до нескольких десятков килогерц.

Одна часть излучения DFB-лазера отводится на опорный фотоприемник (может быть встроен в конструктив лазера), а другая часть по волоконному тракту подводится к прямо-передающей оптике, передается в зону детектирования и затем, пройдя через измеряемый газовый объем и отразившись, через прямо-передающую оптику попадает на сигнальный фотоприемник. Фотоприемники в реальном времени осуществляют детектирование оптического сигнала. Электрический сигнал с фотоприемников усиливается и поступает на плату, где после обработки вычисляется концентрация газа (рис. 12.12).

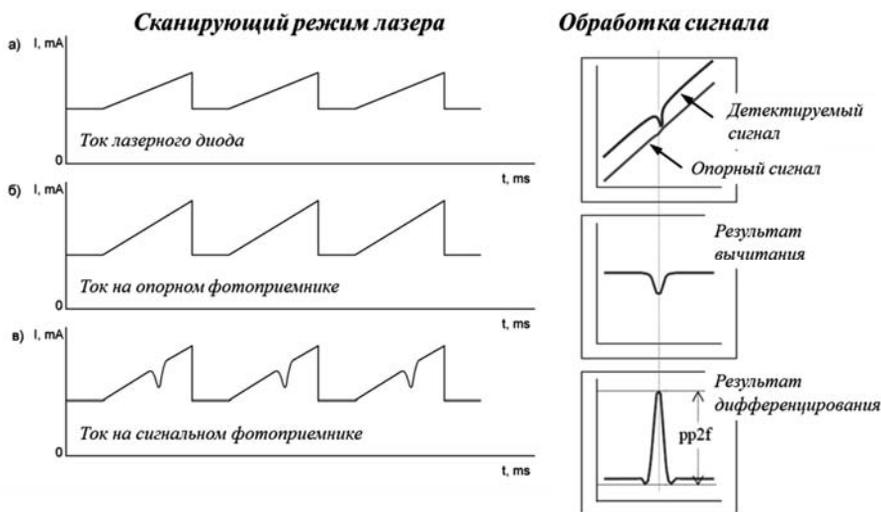


Рис. 12.12

Сканирующий режим лазера и обработка полученных сигналов

Глубина провала на графике тока фотоприемника при прочих равных условиях зависит от концентрации газа в воздухе (рис. 12.13).

Температурная стабилизация DFB-лазера осуществляется с помощью элемента Пельтье и встроенного датчика температуры. Блок управления лазером поддерживает температуру кристалла с точностью ± 0.01 градуса в диапазоне температур от $+10$ до $+40^\circ\text{C}$.

Одним из вариантов реализации метода TDLAS является устройство бесконтактного дистанционного экспресс-теста состояния алкогольного опьянения «Алкорамка», созданного в НПП «Лазерные системы» и предназначенного для измерения в выдохе человека паров этилового спирта и оперативного оповещения о результате теста.

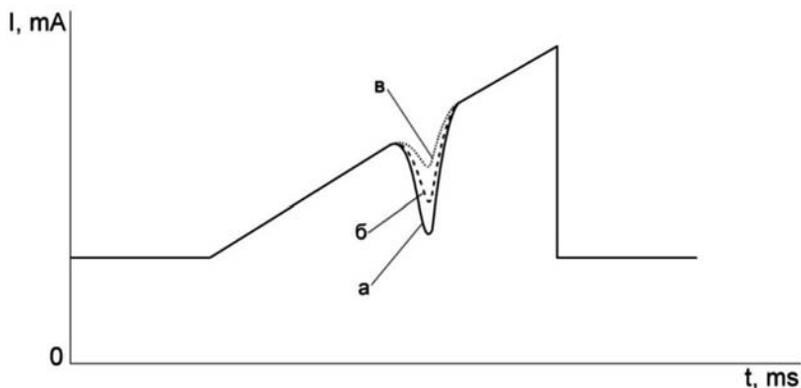


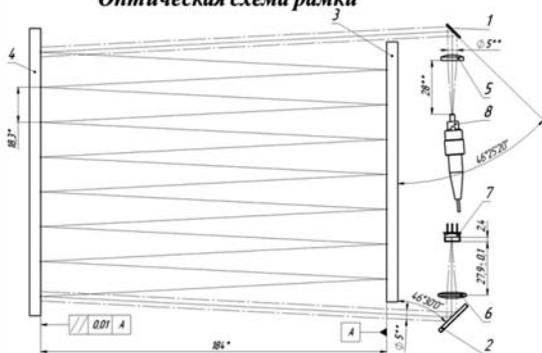
Рис. 12.13

Глубина провала графика тока фотоприемника при различных концентрациях газа в измерительном объеме

«Алкорамка» состоит из рамки и блока электроники (рис. 12.14). В рамке смонтирована оптика и приемник излучения, обеспечивающие организацию измерительного объема и регистрацию оптического сигнала. Блок электроники располагается в основании прибора и включает в себя DFB-лазер, излучение которого подводится в рамку по оптическому волокну, управляющий компьютер и вспомогательные платы и элементы. Общий вид и оптическая схема прибора показаны на рис. 12.14.



Оптическая схема рамки



- 1...4 – Зеркала
- 5,6 – Линзы
- 7 – Приемник излучения
- 8 – Наконечник подвода зондирующего излучения

Рис. 12.14

Общий вид и оптическая схема «Алкорамки»

Тестируемый человек делает выдох в рамку, через которую проходит зондирующее излучение DFB-лазера. Требуемая длина трассы обеспечивается за счет многократного отражения от боковых зеркал. После прохождения тестируемого объема излучение попадает на фотоприемник, сигнал с которого передается в управляющий компьютер и обрабатывается для получения информации о содержании паров алкоголя в выдохе. Время одного измерения не превышает 1 секунды, а порог измеряемой концентрации составляет 150 мкг/л (0.3‰ по крови).

Для работы такой системы не требуется применения специальных индивидуальных средств гигиены, а именно различных мундштуков и насадок, что снижает затраты на эксплуатацию. Кроме того, работа осуществляется полностью в автоматическом режиме, и не требует обслуживающего персонала, что позволяет интегрировать ее с системой контроля и управления доступом на предприятие (например, с турникетной системой), что обеспечит полностью автоматический контроль персонала.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 12

12.1. Наличие спектральных особенностей поглощения атмосферных газов позволяет использовать различные методики для определения концентрации различных газов. Для детектирования наличия и концентрации газов могут использоваться лазеры в различных диапазонах, от УФ до ИК. Помимо дистанционного зондирования возможно использование технологий перестраиваемой спектроскопии для определения вредных веществ в локальном объеме.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 12

- 12.1. В каком оптическом диапазоне способны перестраиваться CO₂-лазеры?
- 12.2. В чем заключается принцип лидара дифференциального поглощения?
- 12.3. В чем заключается принцип перестраиваемой диодной спектроскопии?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 12

- 12.1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Наука, 1987. – 550 с.
- 12.2. Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг: Оптико-электронные приборы и системы. Т. 1. СПб., 1998. – 734 с.
- 12.3. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. – М.: Изд-во Московского университета, 1986. – 344 с.
- 12.4. www.cfa.harvard.edu/hitran

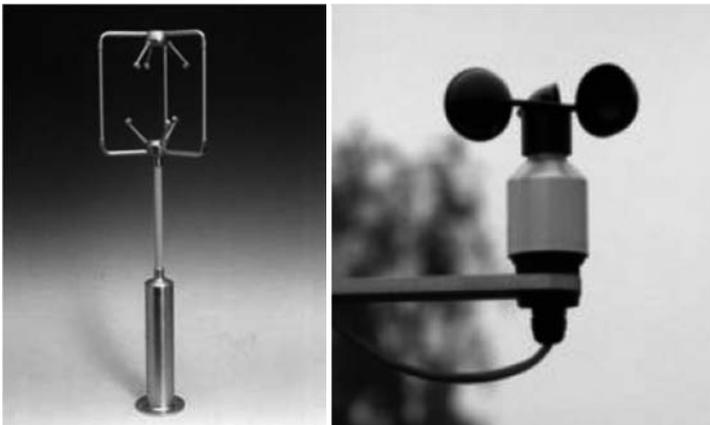
ГЛАВА 13

ИЗМЕРЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

Измерения скорости ветра особенно важно для некоторых областей прикладной науки, например метеорологии и аэродинамики. Точное измерение ветра, как его скорости, так и его направления, становится наиболее актуальным при наличии не контролируемых и случайных флуктуаций, например при расчете вызываемой турбулентности при полете самолета, а также в ветровой энергетике для оптимального направления оси ветряка в направлении ветра.

Глобальное измерение ветра, например над океаном, производится со спутников, на меньших масштабах измерения ветра производят с помощью локальных датчиков.

Доминирующими локальными датчиками измеряющие скорость ветра в точке установки являются чашечный анемометр и ультразвуковой анемометр. Внешний вид этих датчиков представлен на рис. 13.1. Основной недостаток локальных датчиков – невозможность их установки в труднодоступных местах, например на большой высоте.



а

б

Рис. 13.1

Ультразвуковой (*а*) и чашечный (*б*) анемометр

Альтернативным способом измерения скорости ветра является использование дистанционных датчиков, которые могут измерять параметры ветра на большом удалении от прибора. К ним относят: радары, содары, лидары и т. д.

13.1.

ЛИДАРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВЕТРОВЫХ ПОЛЕЙ

Измерения с помощью ветровых лидаров основаны на том же принципе, что и работа содаров. В качестве получаемых данных фигурирует продольная скорость по лучу, измеренная в узком, но длинном объеме воздуха. 3D-вектор скорости ветра и данные о турбулентности могут быть получены при измерении с помощью лидара.

В отличие от содаров, лидар зондирует атмосферу узконаправленным лазерным лучом с высоко пространственной и временной когерентностью. Рассеяние лазерного излучения происходит на аэрозольных частицах, которые всегда присутствуют в атмосфере, что позволяет работать в очень чистой атмосфере, и достигать доступности данных порядка 100%.

13.1.1.

ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА

Доплеровский лидар измеряет радиальную (по направлению распространения зондирующего излучения) скорость, используя изменение частоты обратно рассеянного излучения, которое возникает за счет эффекта Доплера. В случае доплеровского лидара, принимаемый сигнал рассеивается в обратном направлении, следовательно, выражение для частотного сдвига можно записать в следующем виде:

$$2\pi\Delta f = 2\frac{2\pi}{\lambda}V_r, \quad (13.1)$$

где V_r – проекция мгновенного вектора $\mathbf{V}=\{v_x, v_y, v_z\}$, на направление зондирования.

$$V_r = \frac{\Delta f\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}f_D, \quad (13.2)$$

где $\Delta f = f_D$ – непосредственно измеряемый доплеровский сдвиг в частотном выражении. Или:

$$\Delta f = -2V_r/\lambda, \quad (13.3)$$

где V_r – радиальная скорость, λ – длина волны зондирующего лазера, Δf – частотный доплеровский сдвиг.

13.1.2. МЕТОДЫ ЛИДАРНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА

В настоящее время существуют два основных метода лазерного зондирования скорости ветра: доплеровский и корреляционный. Метод, использующий эффект Доплера, применяется при зондировании скорости ветра на достаточно больших расстояниях; различают когерентный и некогерентный (прямой) метод детектирования обратно рассеянного излучения. Прямой метод детектирования основан на использовании оптических элементов с высоким спектральным разрешением, которые позволяют непосредственно измерить частоту обратно рассеянного излучения. Когерентный метод измеряет частоты биений между рассеянным излучением из атмосферы и излучением локального осциллятора.

Корреляционные методы используют естественную неоднородность оптических параметров атмосферы (в основном аэрозольной природы) и основаны на анализе флуктуаций лидарных сигналов, отраженных на нескольких из нескольких пространственно разнесенных рассеивающих атмосферных объемов для каждой исследуемой высоты. Время переноса неоднородностей рассеивающих свойств атмосферы между измеряемыми объемами, оптимальной оценкой которого в условиях воздействия шумов и процессов разрушения неоднородностей служит положения максимума взаимно корреляционной функции, является мерой соответствующей составляющей скорости ветра.

Для измерения профиля скорости ветра корреляционным методом должен быть обеспечен съем информации не менее чем по трем трассам зондирования. Технически это осуществляется посредством последовательного сканирования трех направлений одним лазерным пучком.

Полученные лидарные данные подвергаются корреляционной обработке для нахождения вектора скорости и направления ветра. Корреляционная функция находится на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), при этом обрабатываемые массивы подвергаются стандартным предварительным процедурам обработки.

Оптическое гетеродинирование, лежащее в основе когерентного приема, является аналогом гетеродинирования в радиодиапазоне. Используя когерентный метод детектирования можно добиться высокой точности измерения скорости ветра, вплоть до уровней 0.1 м/с в атмосфере с необходимым количеством аэрозоля в приземном слое. Поэтому когерентное детектирование в вертикальной трассе эффективно только в приземном слое, верхняя граница которого составляет 2–3 км.

Как показано выше, скорость движения воздушных масс можно вычислить, измерив величину доплеровского сдвига обратно рассеянного излучения. Существует два метода измерения доплеровского сдвига лазерного излучения это когерентный и некогерентный.

Когерентный прием заключается в непосредственном измерении частоты рассеянного излучения посредством смешения сигнального излучения из атмосферы с излучением локального гетеродина на площадке приемника. Таким образом, происходит переход из частот терагерцового диапазона в радиодиапазон.

Отличительной особенностью гетеродинного способа от прямого, является интерференции на приемной площадке фотодетектора двух волн: сигнальной (E_c) и опорной (E_r).

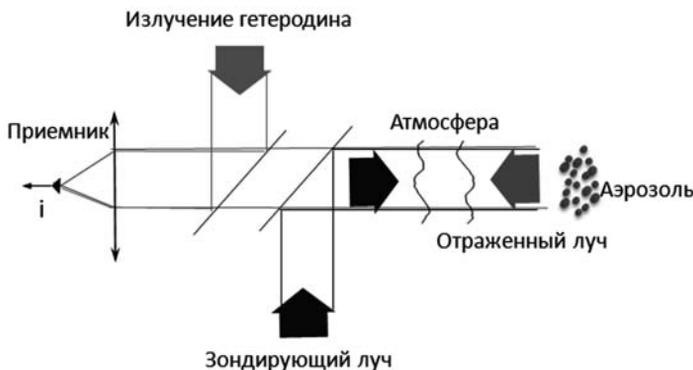


Рис. 13.2

Схема гетеродинного приема в когерентном лидаре

Взаимодействие суммарного оптического поля с материалом чувствительной площадки фотодетектора приводит к появлению в выходном токе фотодетектора, помимо других компонент, составляющей на разностной частоте.

В общем виде оптическая мощность на приемной площадке описывается следующим уравнением:

$$P_c = P_c + P_r + 2\sqrt{P_c P_r} \cos(j2\pi(f_c - f_r)t + (\phi_c - \phi_r)), \quad (13.4)$$

где P_c – мощность сигнального излучения, рассеянного атмосферой и собранного приемным телескопом, P_r – мощность гетеродина на приемнике, f и ϕ соответственно частота и фаза опорного и сигнального излучения.

Первые два слагаемых при обработке сигнала с приемника фильтруются низкочастотным фильтром. После этой фильтрации анализируется третье слагаемое:

$$P_c \approx 2\sqrt{P_c P_r} \cos(j2\pi(f_c - f_r)t + (\phi_c - \phi_r)). \quad (13.5)$$

С учетом того что разница частот гетеродина и сигнального излучения лежит в радиодиапазоне, т. е. составляет несколько десятков мегагерц, то можно применять технику с диапазоном пропускания несколько мегагерц, что позволяет повысить отношение сигнал/шум. Отношение сигнал/шум в общем виде определяется

как отношение мощности сигнального излучения к мощности шумов всех компонентов.

Даже несмотря на существенное усложнение схемной реализации гетеродинного приема по сравнению с прямым детектированием, данный метод нашел широкое практическое применение благодаря возможности выделения очень слабых оптических составляющих сигнала на фоне собственных тепловых шумов приемника путем повышения интенсивности опорного сигнала. А высокая эффективность лазерного гетеродинамирования обеспечивается изначально высокой степенью когерентности, монохроматичности и направленности источника излучения. Ширина линии генерации лазера должна составлять в этом случае менее ширины турбулентного уширения спектра доплеровского сдвига, который составляет в зависимости от условий до 2–3 МГц. Обычно ширина лазерной линии для гетеродинного приема выбирается фурье-ограниченной в случае импульсного лидара или единицы килогерц в случае непрерывного лидара.

Для детектирования ветра используется обратно рассеянное излучение на аэрозольной составляющей атмосферы, поскольку спектр рассеянного излучения в данном случае является спектром лазерного излучения, и в этом случае возможен гетеродинный прием. Как было показано выше, распределение аэрозоля изменяется в значительных пределах как по горизонтальной трассе, так и по вертикальной.

Сегодня сформировалось представление, что доплеровские лидары, предназначенные для измерения распределения скорости ветра, являются необходимым элементом оснащения различных метеорологических служб. Так, например, системы обеспечения вихревой безопасности, внедрение которых требуется согласно нормативным документам ИКАО на всех аэродромах, предполагают, наряду с бортовыми средствами, комплекс наземного лидарного оборудования.

13.2.

КОГЕРЕНТНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ ЛИДАРЫ

В настоящее время разработано и производится несколько ветровых лидаров, предназначенных для детектирования ветровых полей, сдвига ветра, вихревых следов на различных дистанциях, которые позиционируются как серийные образцы, среди них можно выделить следующие: Windcube производства Leosphere (Франция), Zephir производства Qinetiq (Англия), Galion производства SgurrEnergy (Англия) и WindTracer американской компании CTI Lockheed Martin. В последнее время появились сообщения о разработке Windicator фирмы Optical Air Data Systems, LLC (OADS).

13.2.1. ЛИДАР WINDCUBE

Windcube (рис. 13.3) является разработкой французской фирмы Leosphere и представляет собой импульсный моностатический когерентный ветровой лидар. Лидар выполнен в виде герметичного блока с вертикальным выводом зондирующего излучения. Выходное излучение фокусируется на дистанции порядка 200 метров для увеличения отношения сигнал/шум. Лазерный источник основан на волоконном эрбий-иттербиевом лазере. Мощность выходных импульсов составляет порядка 10 мкДж, длительность 200 нс, частота следования 20 кГц. Для определения скорости ветра на дистанциях от 45 до 250 метров, с пространственным разрешением 30 метров требуется усреднения 10000 импульсов.



Рис. 13.3
Внешний вид лидара Windcube

Windcube – лидар с фиксированным фокусным расстоянием, призма в составе лидара отклоняет луч от вертикали на 30° . Сканирование лучом в пространстве осуществляется по определенному закону: призма остается неподвижной в определенном положении, пока накапливается заданное количество импульсов (от 5000 до 10000), после завершения цикла накопления призма поворачивается на следующий азимутальный угол, разница между углами составляет 90° . Таким образом, осуществляется измерения в четырех угловых положениях. Полный оборот призмы и измерение полного вектора скорости занимает порядка 6 секунд.

Методика построения профиля скорости ветра построена на алгоритме DBS (Doppler Beam Steering), при этом лазерный луч направляется в пространство под одним и тем же углом места. Радиальную скорость можно описать следующим уравнением:

$$v_r = u * \cos(\theta) * \cos(\phi) + v * \sin(\theta) * \cos(\phi) + w * \sin(\phi), \quad (13.6)$$

где u , v и w – компоненты скорости ветра, а θ и ϕ – азимутальный угол, и угол места вектора скорости.

Windcube измеряет скорость в четырех точках: $\theta=0^\circ$, $\theta=90^\circ$, $\theta=180^\circ$ и $\theta=270^\circ$. Решив систему уравнений, находим параметры скорости ветра.

Сравнивая показания анемометра и показания лидаров можно использовать разные методики определения «ошибок». Традиционная линейная регрессия показаний лидара и анемометра, усредненных за определенный промежуток времени, дает производную и смещение показаний. Смещение говорит о наличии ошибок, не связанных линейно со скоростью ветра, и может в какой-то части идентифицировать, например, сдвиг ветра (рис. 13.4). Так, при сравнении экспериментов без смещения были получены коэффициенты линейной регрессии от 0.98 до 1.01.

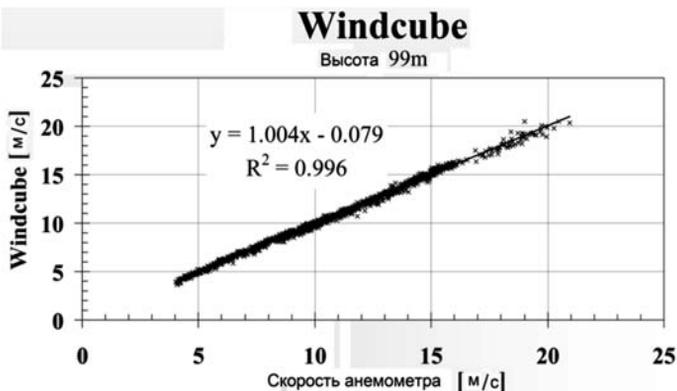


Рис. 13.4
Качество измерений лидара Windcube

13.2.2. ЛИДАР ZEPHIR

После производства и тестирования нескольких прототипов ветрового лидара, английская компания представила первый коммерческий продукт в области измерений скорости ветра в 2006 году, известный как ZephIR (рис. 13.5).

Это лидар на основе непрерывного лазера, излучающего в безопасном диапазоне для глаз на длине волны 1.57 мкм и изменяющего высоту измерения фокусировкой зондирующего луча на определенной дистанции. Могут быть выбраны пять высот измерения полного вектора скорости ветра. Сканирование по кругу на каждой высоте осуществляется в течение 3 секунд, после окончания сканирования происходит изменение фокусного расстояния в заданной последовательности.

Лазерный луч выводится в атмосферу с помощью постоянно вращающейся призмы, отклоняющей ось луча на 30° относительно вертикали. Призма вращается со скоростью 1 об/с (рис. 13.6).

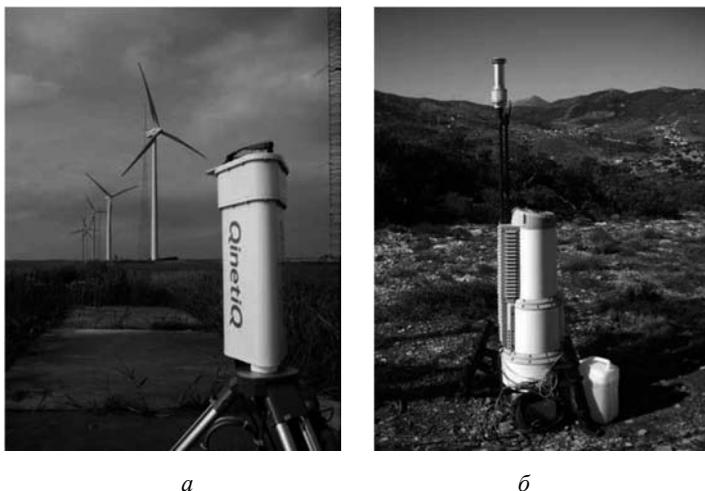


Рис. 13.5

Внешний вид лидара: *а* – прототип; *б* – коммерческий продукт

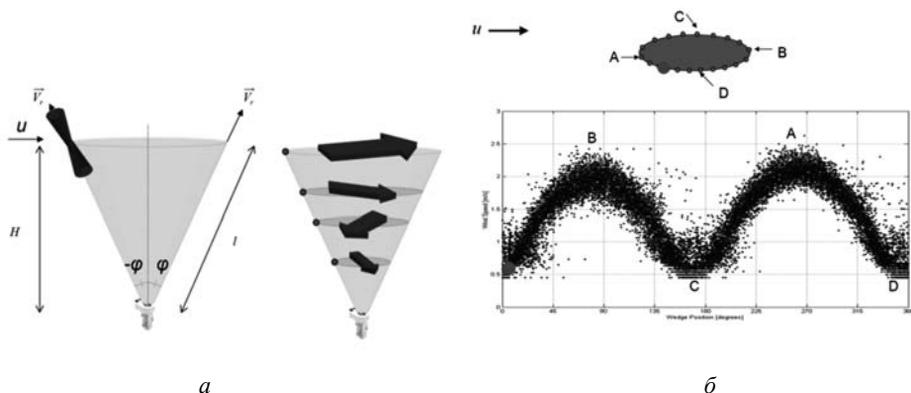


Рис. 13.6

Геометрия (*а*) и способ сканирования (*б*) лидара

Обратно рассеянное излучение смешивается с излучением локального осциллятора и оцифровывается с частотой 100 МГц. Встроенный промышленный компьютер способен в режиме реального времени трансформировать получаемую информацию в блоки по 512 отсчетов АЦП и считать FFT спектр, 4000 спектров

усредняется для получения одного безшумового спектра содержащего доплеровский сдвиг, вызванный радиальной скоростью ветра. Методом поиска центра масс вычисляется значение скорости в одной точке, таким образом формируется массив из 50 скоростей с угловым разрешением по азимутальному углу равным $360^\circ/50=7.2^\circ$.

В отличие от импульсных систем, лидары на непрерывном излучении не имеют точной информации о положении рассеивающего объема. Работа лидара основывается на предположении о равномерности распределения рассеивающих частиц по траектории луча. Тогда зону чувствительности можно с достаточной точностью описать функцией Лоренца, центр которой расположен на дистанции фокусировки (рис. 13.7).

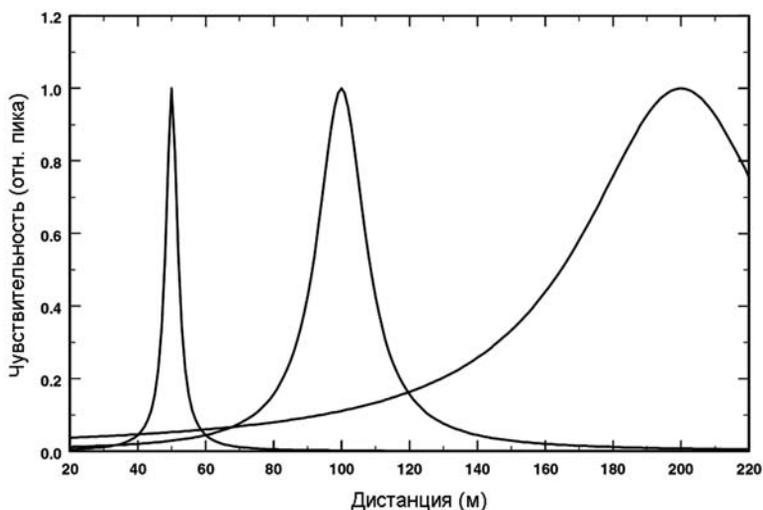


Рис. 13.7

Пространственное разрешение и нормированная интенсивность
в измеряемом объеме

Предположение о равномерности коэффициента обратного рассеяния по оси луча не всегда является выполнимым, особенно при наличии облаков ниже 1500 м. В таком случае рассеяние от облаков превышает рассеяние из фокальной области и вносит ошибки в измерения. Доплеровский спектр состоит из двух компонент – из фокальной области и обычно большей скорости – от облаков.

Для устранения возможного влияния низкой облачности на результаты измерений, лидар имеет алгоритм коррекции облачности, заключающийся в дополнительном цикле измерения на определенных высотах. На рис. 13.9 представлены результаты сравнения показания лидара относительно калиброванного чашечного анемометра с коррекцией облаков и без.

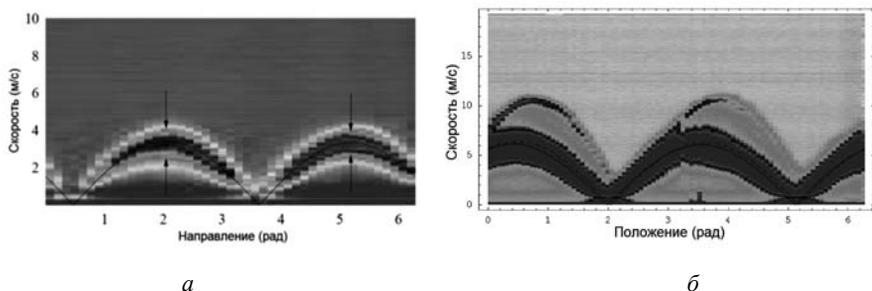


Рис. 13.8
График скоростей,
получаемый при наличии (а) и отсутствии (б) облаков в зоне над лидаром

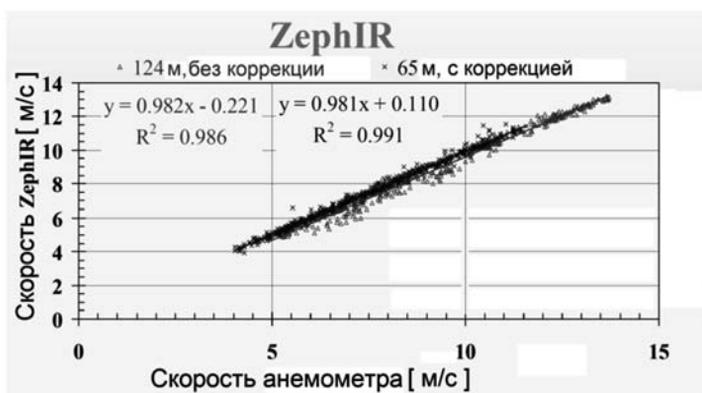


Рис. 13.9
Качество измерений лидара Zephir

Поскольку в оптической схеме лидара не предусмотрен дополнительный частотный сдвиг опорного гетеродина, то отсутствует возможность определения направления радиальной скорости, что в целом сказывается на направлении полного ветра с точностью $\pm 180^\circ$. Поэтому у лидара имеется ультразвуковой датчик направления ветра, расположенный на выносной мачте. При предположении, что направление ветра сильно меняется на высотах измерения, знак для ветра берется аналогичный измеряемому ультразвуковым флюгером.

13.2.3. ЛИДАР GALION

Недавно на рынке ветровых лидаров появился новый продукт, выпускаемый фирмой SgurrEnergy. Это импульсный лидар с двухкоординатным сканером, позволяющим производить измерения в любой точке верхней полусферы (рис. 13.10).

К сожалению, подробных данных о его устройстве и режимах работы нет, однако основные характеристики конкурентноспособны по сравнению с другими аналогами. Точность измерения скорости ветра ± 0.1 м/с, зависит от концентрации аэрозоля. Минимальная измеряемая скорость 0 м/с, а максимальная 50 м/с. Лидар передает следующую информацию: горизонтальную и вертикальную скорость ветра, направление вектора, интенсивность рассеяния, температуру, влажность, давление в месте установки лидара. Пространственное разрешение не меняется с дистанцией измерения, поскольку лидар является импульсным. Характерное разрешение по дальности порядка 20 м.

*a**б***Рис. 13.10**Лидар Galion: сканер (*a*) и внешний вид (*б*) лидара

13.2.4. ЛИДАР WINDTRACER

В начале 90-х Воздушные силы США и НАСА инициировали разработку импульсного лидара для детектирования вихревого следа. Разработанный лидар (рис. 13.11) использовал в качестве источника лазерного излучения лазер, разработанный Coherent Technologies, Inc. (CTI), и был установлен в аэропорту JFK с 1996 по 1998 года, а также, с 2000 года, в DFW. Для определения вихревых следов NASA разработало собственный алгоритм, а CTI разрабатывало альтернативный алгоритм на основе данных AirForce и NASA. Первые измерения спутного следа были осуществлены в 2000 году в аэропорту Далласа (DFW). На сегодняш-

ний день установлено более 10 лидаров в аэропортах по всему миру, в частности в Гонконге, Токио, Нью-Йорке, Париже, Франкфурте и многих других.



Рис. 13.11

Внешний вид ладара Windtracer

Импульсный лидар имеет пространственное разрешение 60 м. Частота следования импульсов лазера 750 Гц. Спектры рассчитываются в режиме реального времени для каждого пространственного окна. Спектры усредняются каждые 50 импульсов для увеличения отношения сигнал/шум. Разрешение по углу в вертикальной плоскости зависит от скорости сканирования, и может обеспечить обнаружение вихря с точностью до 3 метров. Алгоритм поиска вихря основан на пике максимальной скорости в доплеровском спектре, что позволяет определить положение вихря лучше чем, пространственное разрешение лидара.

Лидар может работать в нескольких режимах сканирования, основные из которых RHI, PPI, VAD и их различные комбинации, также существует возможность программирования нестандартного закона сканирования.

1. Range Height Indicator (RHI) – режим, при котором азимутальный угол остается постоянным, а угол места изменяется в определенном диапазоне. При сканировании в данном режиме перпендикулярно ВПП существует возможность измерения поперечного ветра, поскольку при таком сканировании строится зависимость радиальной скорости ветра от высоты, и при малых углах места это по сути – поперечный ветер.

2. Plan Position Indicator (PPI) – режим, при котором угол места остается фиксированным, как правило менее 10° , а азимутальный угол меняется либо во всем возможном диапазоне, либо в выбранном секторе.

3. Velocity Azimuth Display (VAD) – режим, при котором измерения производятся на нескольких азимутальных углах (обычно 8) при фиксированном угле

места. В результате полученный профиль вертикальной скорости над лидаром записывается в отдельный файл, для последующего анализа.

Каждый из описанных лидаров обладает своими преимуществами и недостатками. При решении задачи измерения скорости ветра и в частности сдвига ветра необходимо учитывать индивидуальные особенности аэропорта и местности. Основные параметры лидаров сведены в табл. 13.1.

Таблица 13.1

Основные параметры лидаров

Параметр	ZephIR	Windcube	Windtracer
Режим работы	Непрерывный	Импульсный	Импульсный
Длина волны, мкм	1.57	1.54	2.02 (1.6)
Дальность измерения	10 – 150	40 – 200	15000
Угол раствора конуса	30	30 (15)	любой
Количество высот измерения	5	10	120
Пространственное разрешение, м	1 @h= 20 м, 25 @h=110 м	26	60
Диапазон измеряемых скоростей, м/с	2 – 70	0 – 60	0 – 40
Направление ветра	нет	да	да
Время измерения полного вектора	3 с (на одной высоте)	6 с (на всех высотах)	Зависит от типа сканирования
Температурный режим работы, °С	-25 ... +40	-10... +40	-25 ... +40
Потребляемая мощность	100 Вт (0°С - 25 °С) 250 Вт	120 Вт	3 – 5 кВт
Габариты	1340×550 (Ф) мм (без метеомачты)	800×550×550 мм	2.3 м (ш) × 2.9м (д) × 2.4 м (в)
Вес, кг	134	45	2730

13.3.

РОССИЙСКИЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ ЛИДАРЫ

В России разрабатывалось несколько образцов лидаров на основе CO₂-лазеров, а также на основе полупроводниковых лазеров и волоконных усилителей. В течение последних лет в ООО «НПП «Лазерные системы» была разработана серия когерентных доплеровских лидаров на основе полупроводниковых лазеров и волоконных компонент, способных проводить круглосуточные измерения.

Внешний вид лидаров представлен на рис. 13.12 (вкл. ил. 9). Основные технические характеристики доплеровских лидаров приведены в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Технические характеристики ПЛВ 300 и ПЛВ 2000

Параметр	ПЛВ-300	ПЛВ2000
Дальности измерения, м	от 5 до 300	от 60 до 2000
Диапазон измерения скоростей, м/с	от 1 до 40	от 1 до 55
Диапазон измерения направления ветра, °	от 0 до 360	от 0 до 360
Длина волны лазерного излучения, нм	1550	1550
Пространственное разрешение	± 10% от дистанции фокусировки	60 м
Время обновления данных о скорости и направлении ветра, с	4	1-10
Режим сканирования	VAD	VAD, DBS, RHI, PPI, LOS
Масса, кг	70	150
Габаритные размеры, мм	450×900×1300	885×1005×1745



а
ПЛВ-300

б
ПЛВ-2000

Рис. 13.12

Ветровые лидары компании НПП «Лазерные системы» (г. Санкт-Петербург)

Принцип работы когерентных доплеровских лидаров ПЛВ300 и ПЛВ2000 основан на эффекте Доплера. Для нахождения частоты доплеровского смещения (скорости ветра) сигнал с приемника подвергается Фурье преобразованию в режиме реального времени. Для обеспечения приемлемого отношения сигнал/шум производится накопление заданного количества фурье-спектров. В полученном усредненном спектре находится пик соответствующий сигналу, рассеянному из атмосферы, и по его частоте вычисляется величина доплеровского сдвига.

ПЛВ300 и ПЛВ2000 являются когерентными доплеровскими лидарами. Основное их отличие друг от друга в режиме работы излучателя: излучение лазерного источника в ПЛВ300 непрерывное, а в ПЛВ2000 импульсное. Принципиальная схема лидара представлена на рис. 13.13, излучение задающего DFB-лазера с волоконным выходом, делится оптоволоконным делителем (1), основная часть излучения поступает в акустооптический модулятор (2), который обеспечивает сдвигку частоты от частоты локального гетеродина на величину F_i , и в зависимости от типа лидара, работает либо в непрерывном режиме (ПЛВ300), либо в импульсном (ПЛВ2000), далее излучение со смещенной частотой поступает в эрбий-иттербиевый волоконный усилитель EYDFA.

Усиленное излучение направляется с помощью циркулятора (4) в прямопередающий телескоп и далее на сканирующую систему. Другая часть излучения

задающего лазера, используется в качестве опорного излучения гетеродина. Сигнал с приемника оцифровывается высокоскоростным АЦП с частотой 100 МГц для ПЛВ300 и 320 МГц для ПЛВ2000. Оцифрованный сигнал обрабатывается на FPGA в режиме реального времени.

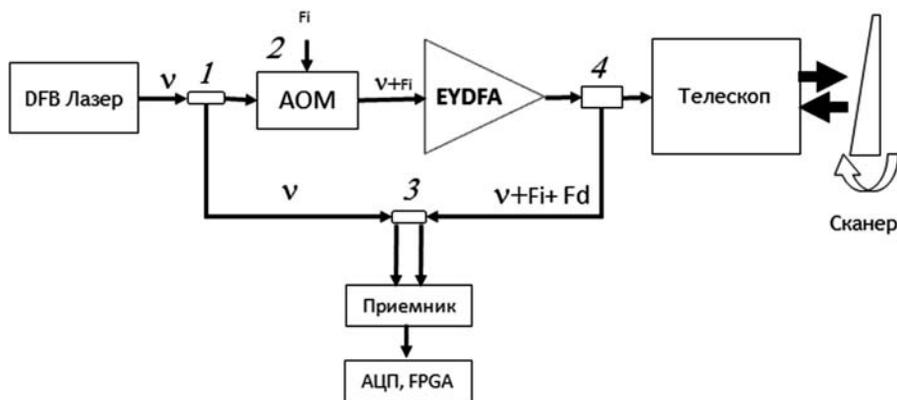


Рис. 13.13

Принципиальная схема гетеродинных доплеровских лидаров ПЛВ300 и ПЛВ2000

Максимальная дистанция детектирования доплеровского сдвига определяется величиной отношения С/Ш. Отношение С/Ш зависит от принимаемой обратно рассеянной мощности и шумовых характеристик приемной системы. Величина обратно рассеянной мощности в режиме зондирования непрерывным излучением для моностатического лидара не зависит от дальности и определяется выходной мощностью лидара и параметрами атмосферы. Мощность, детектируемая доплеровским лидаром непрерывного действия, определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{пр}} = \eta \left(\frac{\pi}{2} \right) P_0 \beta \lambda, \quad (13.7)$$

где η – эффективность приемной системы, P_0 – выходная мощность лазерного излучения, β – коэффициент обратного рассеяния атмосферы, λ – длина волны зондирующего лазера.

Для импульсных систем величина обратно рассеянного излучения определяется лидарным уравнением.

Точность измерения ветра связано с пространственным и временным разрешением. В зависимости от типа лидара, пространственное разрешение определяется либо длительностью импульса лазерного излучения (импульсные системы), либо глубиной фокуса (непрерывные системы). Глубина фокуса для гауссова пучка определяется релеевской длиной.

$$Z_r(f) = \frac{4\lambda f^2}{\pi[2\omega_0]^2}, \tag{13.8}$$

где λ – длина волны, f – дистанция фокусировки, ω_0 – радиус выходного пучка из лидара.

Для лидара непрерывного действия пространственное разрешение можно считать по полуширине функции Лоренца. Зависимость ширины от дистанции фокусировки является квадратичной. На рис. 13.14 приведена зависимость пространственного разрешения для ПЛВ300 от дистанции фокусировки.

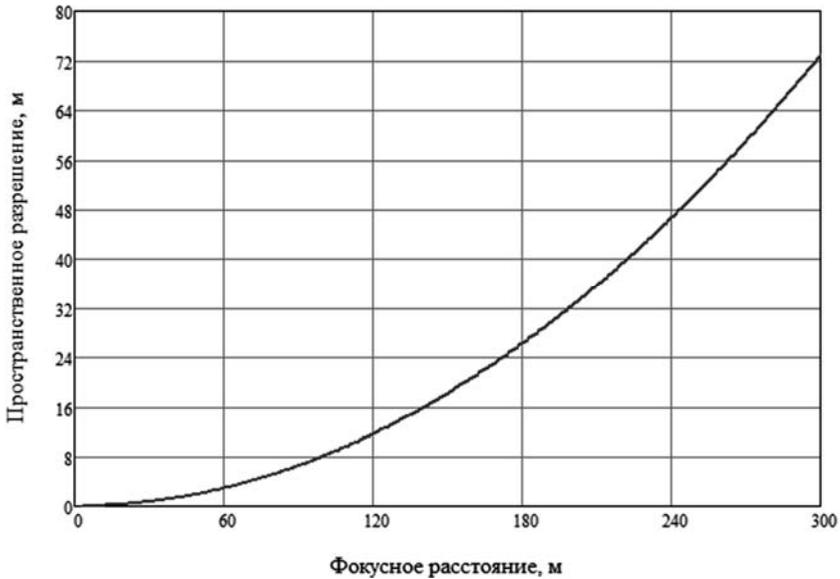


Рис. 13.14

Пространственное разрешение для лидара ПЛВ300.
Диаметр выходного пучка равен 70 мм

Более точно разрешение по дальности для непрерывного лидара определяется весовой функцией Лоренца, определяющей эффективность рассеяния из фокальной точки:

$$Fn(f, r) = \frac{1}{\pi} \frac{Z_r}{Z_r^2 + (r-f)^2}, \tag{13.9}$$

где f – дистанция фокусировки, r – дистанция по лучу, Z_r – релеевская длина перетяжки.

Пространственное разрешение ПЛВ2000 определяется длительностью импульса излучения и является постоянной на всех высотах зондирования. Длительность импульса лазера в ПЛВ2000 порядка 400 нс по полувысоте, что соответствует пространственному разрешению 60 метров. На рис. 13.15 приведены нормирован-

ные графики функции, описывающие пространственное разрешение для ПЛВ300 и ПЛВ2000 на дистанциях измерения 50, 100, 200 и 300 метров. На дистанциях измерения менее 200 метров непрерывный лидар имеет значительно лучшее пространственное разрешение, что делает ПЛВ300 незаменимым инструментом для детектирования низковысотного сдвига ветра и (или) микропорыва. В то же время при измерении на высотах более 300 метров преимущество оказывается у лидара ПЛВ2000 благодаря фиксированному пространственному разрешению.

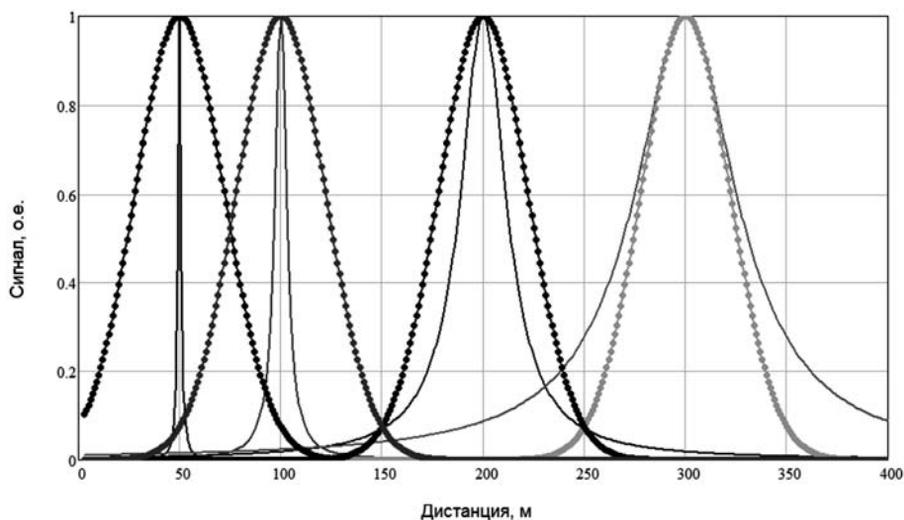


Рис. 13.15

Функции пространственного разрешения для ПЛВ300 и ПЛВ2000
(сплошная линия – ПЛВ300, линия с точками – ПЛВ2000)

Доплеровский лидар при фиксированном положении оси зондирующего пучка способен измерять лишь радиальную составляющую вектора скорости ветра, т. е. проекцию вектора на направление луча. Чтобы получить информацию о скорости и направлении ветра $V = \{V_z, V_x, V_y\}$, требуется проводить измерения как минимум при трех различных положениях зондирующего пучка в пространстве.

ПЛВ300 для получения информации о скорости ветра использует метод кругового сканирования – VAD (Velocity Azimuth Display). Угол отклонения оптической оси от вертикали составляет 22° , для изменения высоты измерения имеется возможность управления дистанцией фокусировки. Приемо-передающий телескоп фокусирует выходное излучение на заданном расстоянии, формируя в пространстве измерительный объем, где происходит измерение радиальной проекции скорости ветра.

При круговом сканировании (рис. 13.16) радиальную составляющую скорости можно записать следующим образом:

$$V_r = (u \sin \theta + v \cos \theta) \cos \varphi + w \sin \varphi, \quad (13.10)$$

где u , v и w – компоненты мгновенного вектора скорости, θ – угол азимута лазерного луча $[0; 2\pi]$, φ – угол места. При непрерывном вращении по углу азимута мы получаем переопределенную систему уравнений, которая решается методами наименьших квадратов.

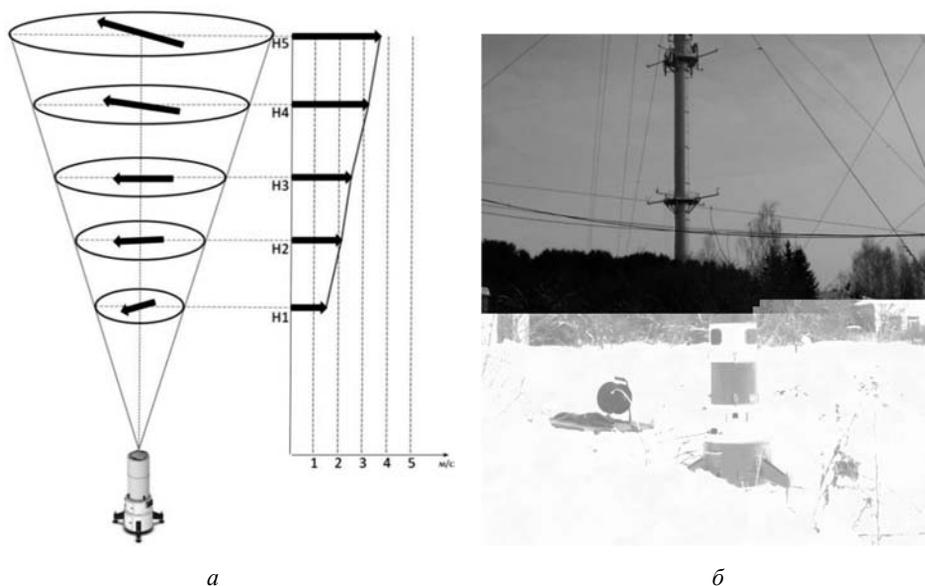


Рис. 13.16

Схема измерений (а) и внешний вид (б) лидара ПЛВ300 во время испытаний на полигоне ФГБУ «НПО «Тайфун»

ПЛВ2000 имеет двухзеркальный сканирующий модуль, позволяющий сканировать всю верхнюю полусферу, что позволяет использовать различные методы для получения 3D-картины распределения ветрового поля. В лидаре реализованы следующие основные режимы сканирования:

- круговое (секторное) сканирование (PPI);
- сканирование в вертикальной плоскости (RHI);
- режим профилометра (DBS, VAD);
- измерение в одном положении сканера (LOS).

Для проверки точности измерения скорости и направления ветра ПЛВ300 были проведены сертификационные испытания на базе измерительного комплекса ВММ-310 ФГБУ «НПО «Тайфун». Проверка осуществлялась путем сравнения данных, полученных от анемометров, установленных на рабочих уровнях мачты ВММ-310, и результатов измерений профилометра на соответствующих высотах.

Эксперименты проводились в разные времена года в широком диапазоне метеоусловий. На рис. 13.17 представлены зависимости регистрируемых значений скорости и направления ветра в течение одного из экспериментов на высоте измерения 121 м. На рис. 13.18 представлены зависимости измеренных значений скорости и направления ветра измеренными ПЛВ300 от датчика на метеомачте.

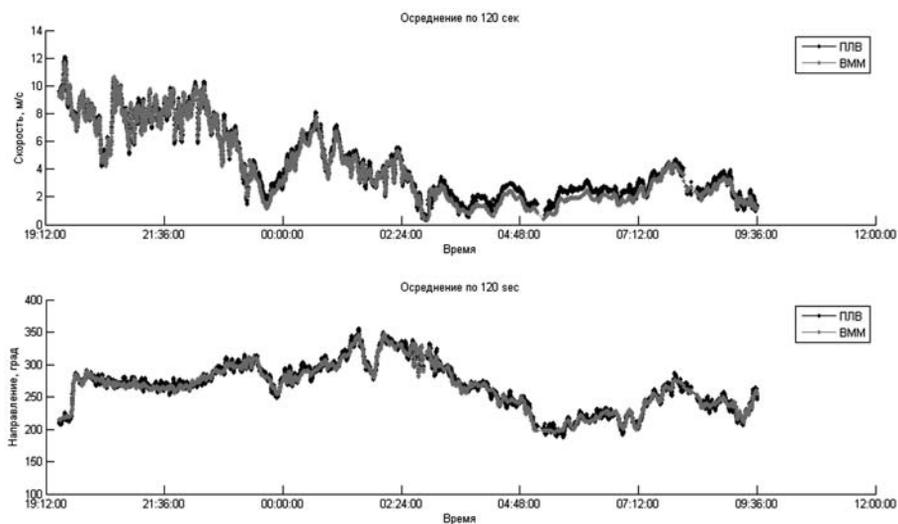


Рис. 13.17

Зависимость данных, регистрируемых ПЛВ и ВММ, от времени для высоты 121 м.

Осреднение данных: 2 минуты, начало записи 19-30 09 августа 2011 г.,
окончание записи 10-00 10 августа 2011 г.

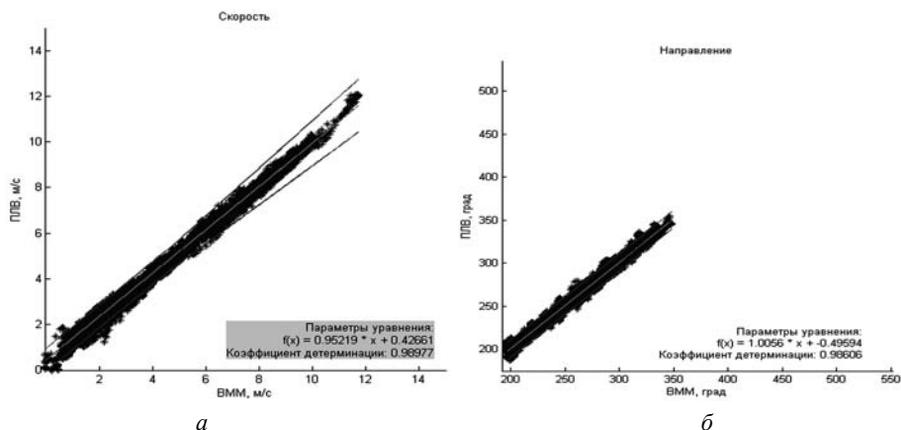


Рис. 13.18

Зависимость данных о скорости (а) и направления (б) ветра, полученных при помощи ПЛВ, от данных, полученных при помощи ВММ

На основании проведенных испытаний Комиссией МАК по сертификации аэродромов и оборудования на профилометр ПЛВ 300 выдан сертификат типа оборудования № 544.

13.4. ДОПЛЕРОВСКИЕ ЛИДАРЫ С ПРЯМЫМ ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ

В отличие от гетеродинного детектирования, прямой метод определения скорости ветра основан на рассеянии излучения молекулами воздуха, а не аэрозолем, распределение которых не так неоднородно по высоте и площади, как аэрозоль.

Возможность детектировать скорость ветра в чистом воздухе позволяет использовать данный метод для исследования ветровых полей на высотах более 5 км с земли, самолета или космоса.

Анализ показывает, что коэффициент молекулярного обратного рассеяния для длины волны 355 нм (третья гармоника Nd:YAG-лазера) на порядок больше чем для длины 532 нм и на два порядка больше 1.55 мкм. Поэтому доплеровские лидары, работающие на молекулярном рассеянии, используют в качестве источника лазеры видимого или ультрафиолетового диапазона. В случае аэрозольного рассеяния, коэффициент взаимодействия для коротковолнового излучения больше на порядок для длины волны 355 нм по сравнению с 1.5 мкм и значительно больше для 10 мкм.

Распределение длин волн при рассеянии Ми определяется спектральной шириной лазерного излучения, поскольку тепловое движение аэрозольных частиц значительно медленнее вследствие их массы и размеров. Ширина линии генерации лазера описывается в общем случае распределением Гаусса, поэтому спектральное распределение обратно рассеянного излучения при молекулярном рассеянии вызвано доплеровским уширением вследствие движения молекул и может быть описано зависимостью Гаусса:

$$W(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\lambda^2}} e^{\frac{-\lambda^2}{2\sigma_\lambda^2}}. \quad (13.11)$$

На рис. 13.19 представлены результаты расчета ширины спектральной линии обратно рассеянного излучения лазера с длиной волны 355 нм в случае молекулярного рассеяния (рассеяние Релея (M_Width)) и аэрозольного рассеяния (рассеяние Ми (A_Width)). Интенсивность нормирована на константу для читаемости графика. Доплеровский сдвиг равен нулю, условия атмосферы нормальные. Сум-

марный спектр обратного рассеяния в случае молекулярной газовой атмосферы представлен на рис. 13.20.

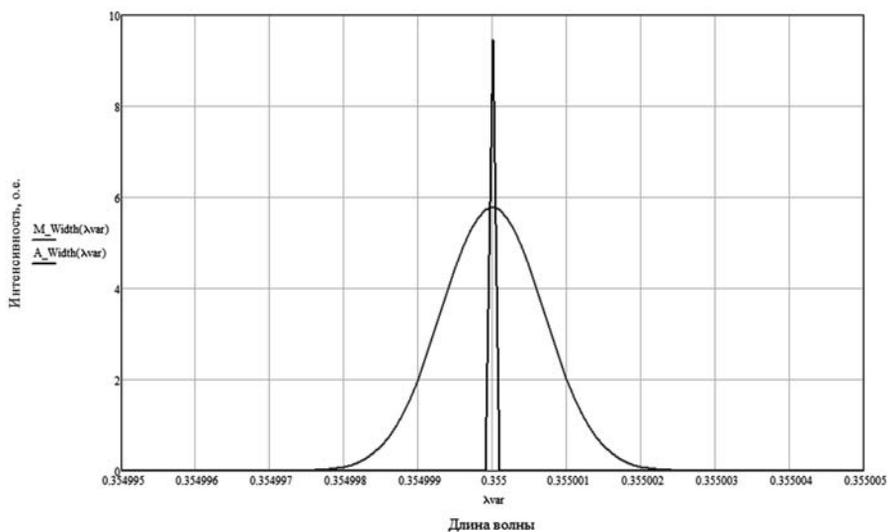


Рис. 13.19

Ширина спектральной линии для рассеяния Ми и Релея

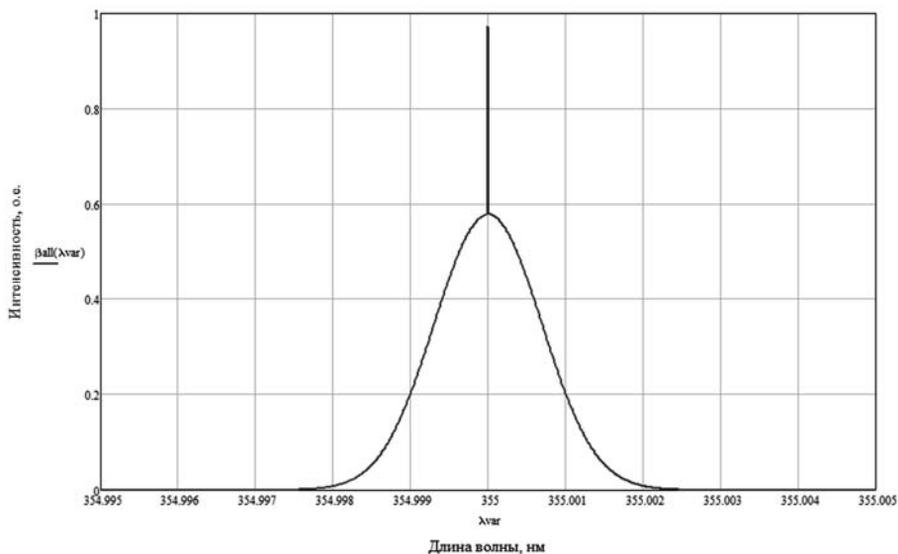


Рис. 13.20

Суммарный спектр рассеяния в атмосфере для длины волны 355 нм на уровне моря

На рис. 13.21 представлена схема для реализации прямого доплеровского лидара, обеспечивающего детектирование как молекулярного, так и аэрозольного рассеяния.

Лазерный пучок от импульсного Nd:YAG-лазера направляется в атмосферу. Собранный приемным телескопом, обратно рассеянное излучение поступает на приемники через интерференционный фильтр (ИФ) с полосой пропускания 0.5 нм. Далее излучение разделяется на два пучка 50/50 светоделителем (СД), часть идет в аэрозольный канал, часть – в молекулярный, где с помощью светоделителя, разделяется на два канала, в которых установлены эталоны Фабри–Перо.

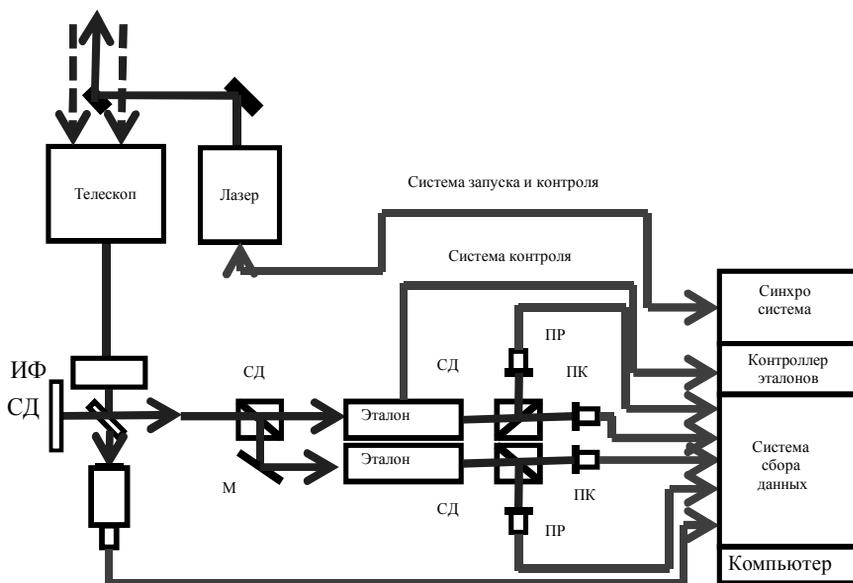


Рис. 13.21

Схема доплеровского лидара прямого детектирования

Наиболее распространены две методики измерения доплеровского сдвига при прямом детектировании – это измерение ширины полосы интерференции на многоэлементном приемнике и измерение интенсивности излучения на краях релейского рассеяния. Обе методики были апробированы в различных системах и показали высокую точность определения скорости ветра. Для измерения ширины полосы используют интерферометр Физо, а для измерения краевых интенсивностей два интерферометра Фабри–Перо.

Схема измерения доплеровского сдвига с помощью анализа изображения интерференционной картины представлена на рис. 13.22. Излучение из атмосферы, собранное приемным телескопом, направляется на оптическую систему, которая

согласует размеры апертуры входного луча с апертурой измерительной системы. В качестве приемника используется либо матрица (CCD, ACCD, ICCD и т.п.), либо линейка. Для получения изображения на матрице используют эталон Фабри–Перо, интерференционная картина которого представляет собой концентрические кольца.

При увеличении коэффициента отражения от 0.6 до 0.95 ширина инструментального контура интерференции уменьшается в 8 раз. Следовательно, во столько же раз увеличивается спектральная разрешающая сила. Величина коэффициента пропускания не влияет на разрешающую силу. Зеркала с многослойными диэлектрическими покрытиями позволили с большой эффективностью применять эталоны Фабри–Перо. Это обусловлено малыми световыми потерями в таких эталонах.

Положение интерференционной полосы зависит от длины волны принимаемого света. Определяя диаметр ($D1$), в случае колец интерференции и матричного приемника, или положение одной полосы ($X1$) на линейном приемнике, можно вычислить длину детектируемого света, а следовательно, зная длину зондирующего излучения ($D0$ и $X1$), – и соответствующий ей доплеровский сдвиг. Схематично это представлено на рис. 13.22.

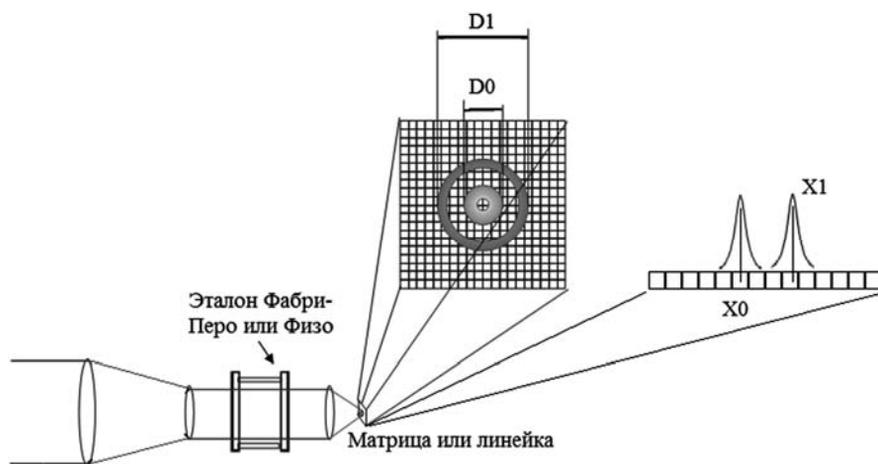


Рис. 13.22

Схема измерения скорости ветра на многоэлементном приемнике

При использовании методики измерения изображения интерференционной полосы, широкополосное релеевское рассеяние является помехой, поэтому используют эталоны с достаточно большим линейным размером для выделения аэрозольной составляющей в сигнале и фильтрации широкополосного молекулярного рассеяния.

На рис. 13.23 представлен результат моделирования спектра обратно рассеяния излучения из атмосферы с учетом молекулярного и аэрозольного рассеяния и спектра пропускания эталона высокого разрешения.

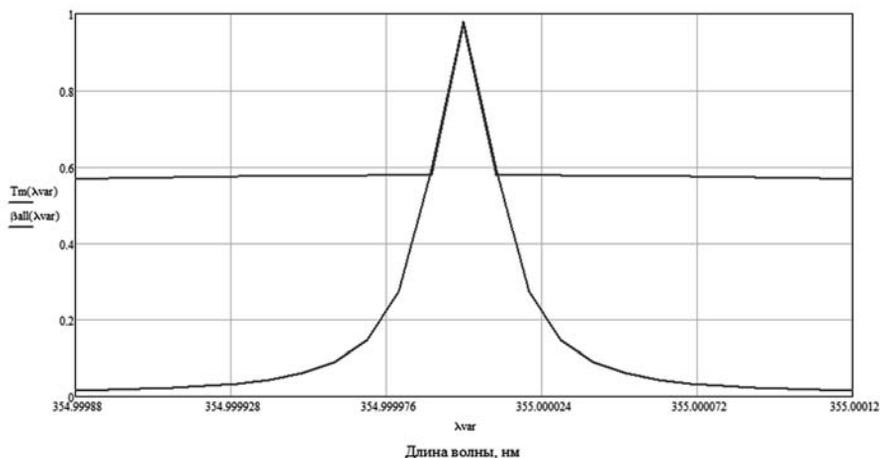


Рис. 13.23

Спектр интерференционного фильтра высокого разрешения

Сигнал, который попадает в полосу пропускания эталона, распределяется на приемной линейной матрице в соответствии с функцией пропускания эталона, при нулевом сдвиге максимум сигнала находится на центральном пикселе, при наличии доплеровского смещения в принимаемом сигнале, спектр смещается на матрице. Используя алгоритмы определения смещения спектра, основанные на методике центроида, корреляции с модельными распределениями или вероятностными методиками, можно определить скорость ветра при смещении на менее одного пикселя, что позволяет определять скорость с разрешением единицы м/с.

Для измерения молекулярного рассеяния и определения скорости ветра на высотах, где молекулярное рассеяние доминирует, используется методика двух эталонов. Суть методики заключается в использовании двух эталонов Фабри–Перо, полоса пропускания которых настраивается относительно длины волны выходного излучения таким образом, чтобы интенсивность излучения, проходящая через фильтры, была одинакова при нулевом доплеровском сдвиге.

На рис. 13.24 представлена принципиальная схема краевого двухэталонного измерения скорости ветра. В отличие от аэрозольного канала, в данной схеме используются одноэлементные приемники, что упрощает оптическую схему и систему сбора и обработки сигнала. Длина обоих эталонов стабилизируется как механическим путем, так и с помощью пьезоактуаторов или температурной перестройки.

Длина эталона Фабри–Перо 1 (ФП1) и длина эталона Фабри–Перо 2 (ФП2) отличаются на микроны, чтобы обеспечить перекрытие с полосами молекулярного рассеяния и при этом минимально оказывать влияние друг на друга.

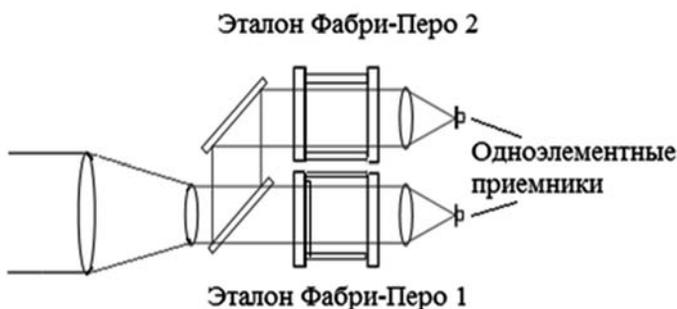


Рис. 13.24

Схеме краевого измерения скорости ветра

На рис. 13.25 представлен спектр молекулярного и аэрозольного рассеяния (β_{all}) и спектры пропускания двух эталонов (Т и Т2) при отсутствии доплеровского сдвига. Длина эталонов в этом случае составляет порядка 9 мм, разница длины второго эталона порядка 30 нм. При таких параметрах эталона ширина свободного спектра составляет 16.63 ГГц, что обеспечивает отсутствие наложения частот полос пропускания различных порядков интерференции и дает возможность точной калибровки на частоту лазерного излучения. Частотная разница между максимумами пропускания двух эталонов составляет 3.33 ГГц.

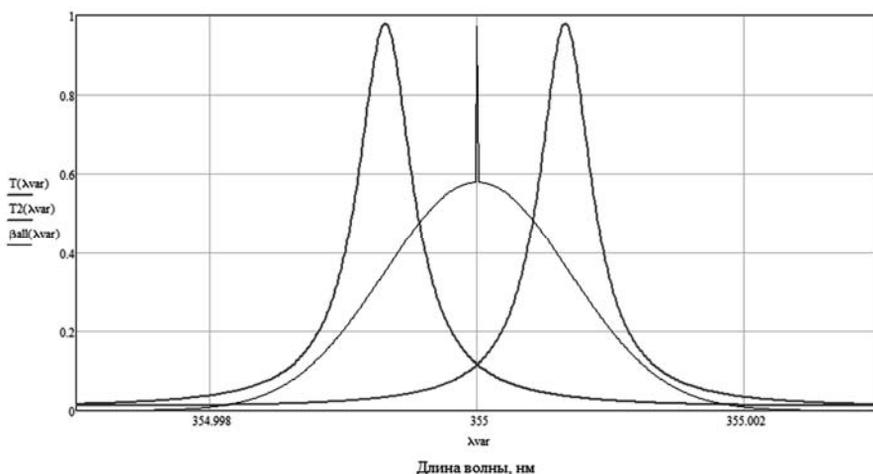


Рис. 13.25

Спектры пропускания эталонов и спектр рассеяния излучения

Доплеровский сдвиг для длины волны 355 нм, как указывалось выше, составляет порядка 5.63 МГц на 1 м/с радиальной скорости. С учетом требований по максимальной измеряемой скорости ± 50 м/с требуемый частотный диапазон составляет ± 300 МГц или 0.12 нм. Подобный частотный сдвиг вызывает смещение спектра рассеяния лазерного излучения в атмосфере как это показано на рис. 13.26. На графике представлен спектр рассеяния из атмосферы с нулевым доплеровским сдвигом β_{all} с доплеровским сдвигом β_{all_D} , соответствующим 50 м/с радиальной скорости ветра.

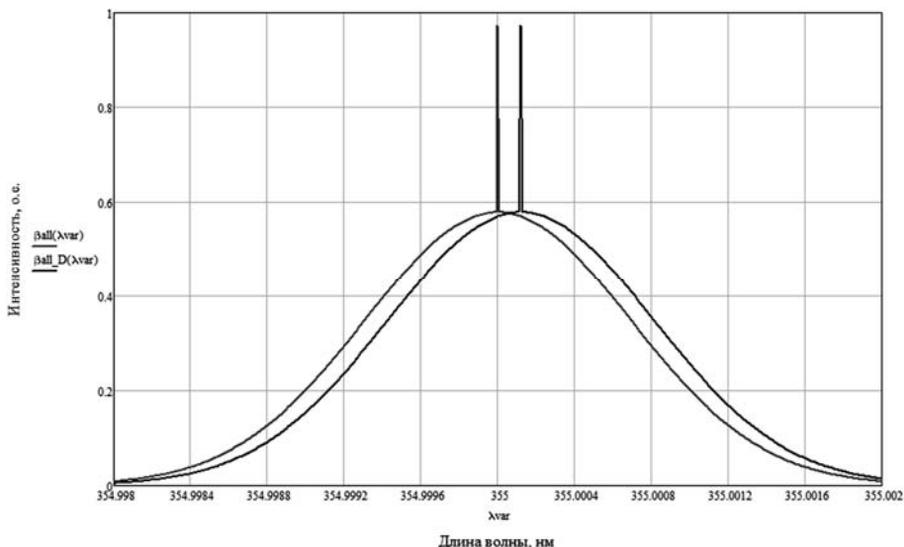


Рис. 13.26

Доплеровское смещение спектра рассеяния излучения на длине волны 355 нм из атмосферы, соответствующее 50 м/с радиальной скорости

На рис. 13.27 представлены графики спектрального распределения интенсивности рассеяния из атмосферы и полосы пропускания двух эталонов Фабри–Перо. Полуширина пропускания эталона Фабри–Перо зависит от интервала свободной дисперсии (FSR) и добротности эталона. Идеальным вариантом является расположение пиков пропускания эталона по середине FSR друг друга и симметричное расположение относительно частоты лазерного излучения, как это показано на рис. 13.25. Длины обоих эталонов привязываются к частоте зондирующего излучения системой стабилизации.

При наличии доплеровского сдвига интенсивность сигнала из атмосферы, прошедшая через эталон 1 и эталон 2, изменяется пропорционально доплеровскому сдвигу, однако общее количество фотонов не изменяется, благодаря этому возможно вычисление скорости ветра, используя молекулярное рассеяние.

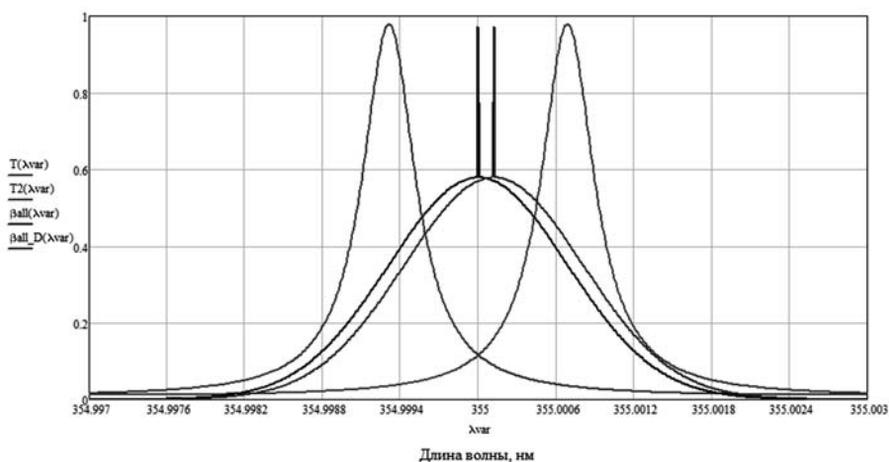


Рис. 13.27

Доплеровское смещение спектра рассеяния излучения из атмосферы и спектры пропускания эталонов

Интенсивность, детектируемая приемником, определяется спектральным распределением обратно рассеянного излучения и аппаратной функцией пропускания эталона установленного перед приемником.

На рис. 13.28 представлены результаты моделирования пропускаемой мощности в канале 1 (P1) и 2 (P2) для доплеровского сдвига соответствующего 50 м/с радиальной скорости.

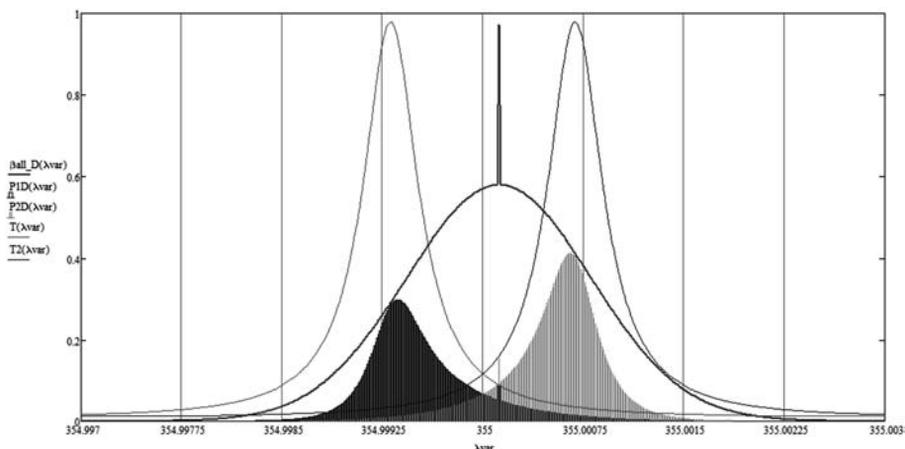


Рис. 13.28

Интенсивности, проходящие в измерительных каналах

Основные особенности схем прямого детектирования доплеровского сдвига на основе молекулярного и аэрозольного рассеяния представлены в табл. 13.3. Следует отметить, что в принципе для детектирования молекулярного рассеяния можно использовать и многоэлементные приемники.

Таблица 13.3

Сравнение методик измерения доплеровского сдвига

Двойной краевой метод	Изображение полосы интерференции
<p>Обратно рассеянный спектр детектируется в двух диапазонах относительно нулевого сдвига.</p> <p>Используется один порядок интерференции эталона.</p> <p>ЛФД или ФЭУ используется для детектирования сигнала как в аналоговом режиме, так и в режиме счета фотонов.</p> <p>Необходима априорная информация о распределении температуры и давления с высотой.</p> <p>Положение краевых фильтров относительно нулевого сдвига определяет чувствительность измерения скорости ветра</p>	<p>Обратно рассеянный спектр (как молекулярный, так и аэрозольный) разделяется на несколько каналов.</p> <p>Используются несколько порядков интерференции или один, в зависимости от типа приемника.</p> <p>Многоэлементные приемники на основе линеек или матриц используются в приемном канале.</p> <p>Не требуется информация о распределении температуры и аэрозоля в области измерений</p>

13.5.

ЛИДАР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБЛАЧНОСТИ И ДИНАМИКИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

Исследование вертикальной структуры метеорологических полей (и в первую очередь, полей температуры и ветра) с помощью средств лидарного зондирования открывает широкие возможности как для изучения климатических особенностей этой структуры, так и для решения различных прикладных задач, связанных, например, с прогнозом процессов загрязнения воздушной среды и с метеорологическим обеспечением авиации. Однако для получения этой информации необходимо знать наличие туманов, плотной дымки и низкой сплошной облачности и временной динамики этих атмосферных явлений. Измерение вертикального профиля распределения аэрозольного состава атмосферы позволя-

ет определить нижнюю границу облачности и области повышенной плотности аэрозоля, не являющиеся облаками.

В атмосфере в результате конденсации водяного пара, образуются скопления капель и кристаллов, эти скопления называют облаками. Облачные элементы, капли и кристаллы настолько малы, что они переносятся воздушными течениями. Если относительная влажность воздуха уменьшается, то облака испаряются. При определенных условиях часть облачных элементов укрупняется настолько, что выпадает из облака в виде осадков. При конденсации непосредственно у земной поверхности образующиеся скопления продуктов конденсации называют туманами. Принципиальной разницы в строении облаков и туманов нет, но они различаются по плотности и наличию четких границ.

Облака являются одним из метеорологических явлений, оказывающих сильное влияние на режим полета самолета. С облаками связаны многие явления, опасные для самолета и усложняющие работу пилота во время полета. Среди них стоит отметить: турбулентность, вызывающая болтанку самолета, вертикальные порывы ветра, вызывающие сильные броски самолета, грозовые явления, шквалы, обледенение, град, ливневые осадки и т. д., а также низкая облачность, значительно усложняющая посадку.

Облака являются характерным метеорологическим элементом, информация о которых позволяет пилоту правильно оценить метеорологическую обстановку в воздухе, составить представление о состоянии атмосферы и сделать заключение об ожидаемой погоде на ближайшее время.

Эффективным средством получения информации о распределении оптических и микрофизических характеристиках атмосферного аэрозоля и облаков, находящихся на различных высотах являются лазерные локаторы (лидары). Высокое пространственное разрешение импульсной лазерной локации позволяет изучать структуру и динамику пространственных неоднородностей аэрозольных образований в атмосфере.

Для получения информации о распределении аэрозольных образований и их характеристиках, наличия облачности, определения нижней границы облачности и количества слоев облаков в зависимости от высоты используют вертикально направленные стационарные лидары, которые называют облакомерами.

Соотношение аэрозольного рассеяния и ослабления связны через так называемый коэффициент лидарного отношения. Отношение коэффициентов обратного рассеяния и ослабления зависит от распределения частиц аэрозоля по размерам, их показателя преломления, а также от состава и формы частиц. Обычные значения лидарного отношения $g_1 = \beta_1 / \alpha_1$ лежат в пределах $0.01 - 0.10 \text{ sr}^{-1}$. Для длины волны 1.5 мкм это отношение составляет порядка 0.03 , но может варьироваться в зависимости от влажности атмосферы.

Предполагая лидарное отношение, равное 0.03 ср^{-1} для указанных пределов МДВ, получаем значение коэффициента обратного рассеяния $\beta = 0.0006 \dots 0.0006 \text{ 1/(м}\cdot\text{ср)} = 0.6 \dots 6 \text{ 1/(км}\cdot\text{ср)}$.

Поскольку осадки или туман также обладают низкими значениями МДВ, то для достоверного детектирования облака необходимо провести дополнительный анализ распределения β . Это анализ заключается в дифференцировании распределения и определения экстремумов распределения и скорости нарастания коэффициента обратного рассеяния. Графически это представлено на рис. 13.29.

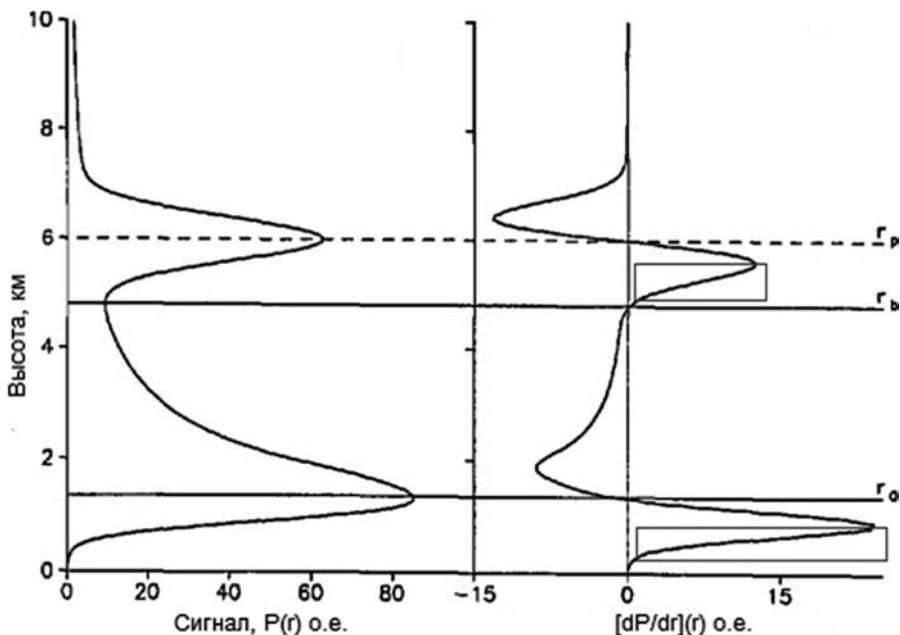


Рис. 13.29

Обработка лидарного сигнала в режиме облакомера

Измерение и прогнозирование погодных условий, в том числе облачности вблизи аэропортов является важным вопросом для обеспечения безопасности воздушного движения. Наличие сильной облачности, особенно на низких высотах могут оказать негативное и опасное влияние на взлет и посадку самолета. Поэтому, разработка систем для дистанционного обнаружения опасных образований в приземном слое находятся в центре внимания исследовательских программ, финансируемых в Европе и США. На рис. 13.30 (ил. 10) представлена текущая сеть датчиков расположенных в Европе, которая используется для мониторинга текущей ситуации и характеристик приземного слоя для прогнозирования погодных условий, в том числе и для обеспечения аэронавигации.

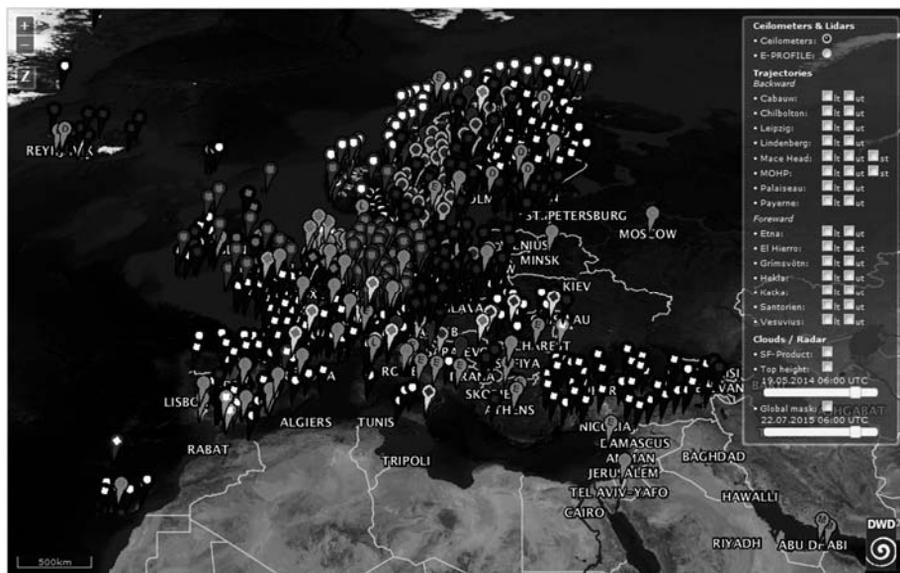


Рис. 13.30

Распределение лазерных средств диагностики приземного слоя в Европе

В настоящее время за рубежом разработано и производится несколько лазерных датчиков, предназначенных для детектирования облачности и мониторинга приземного слоя, которые позиционируются как серийные образцы; среди них можно выделить следующие:

- CL31 производства VAISALA (Финляндия);
- CHM15K “NIMBUS” производства JENOPTIK (Германия);
- CS135 производства CAMPBELL SCIENTIFIC (Великобритания);
- Model 8339 производства AllWeather Inc (США);
- ALC30 производства DEGREAN HORIZON (Франция).

Из российских разработок можно отметить дальномер, разработанный в ООО «НПП «Лазерные системы» и ДОЛ-2 ЛОМО Россия.

Каждый из перечисленных выше лазерных комплексов обладает своими преимуществами и недостатками. При решении задачи мониторинга приземного слоя необходимо учитывать индивидуальные особенности местности для последующего прогнозирования. Основные параметры систем сведены в табл. 13.4. Внешний вид лазерного комплекса обнаружения облаков и мониторинга приземного слоя показан на рис. 13.31.

Таблица 13.4

Основные параметры лазерных комплексов диагностики приземного слоя

Технические характеристики	«НПП «Лазерные системы»	VAISALA (Финляндия) CL31	ЛОМО (Россия) ДОЛ-2	DEGREAN HORIZON (Франция) ALC30	AIHweather Inc (США) Model 8339	JENOPTIK (Германия) CHM15K "NIMBUS"	CAMPBELL SCIENTIFIC (Великобритания) CS135
Длина волны, нм	1535	910	910	1535	905±10	1064	905
Класс безопасности	Class 1	Class 1M		Class 1		Class 1M	Class 1M
Диапазон измерений, м	0...7500	0...7500	10...2000	15...7500	0...7500	10...15000	5...10000
Период выдачи измерений, сек	2...120	2...120	15	15	30,60,120	2...60 мин	2...120
Точность измерения, м	±5	±5	±10(10÷100м) ±(0,05Н+5) (100÷2000м)	±7,5	±6	±5	±0.25%±4,6
Электропитание	~187÷264В, 50Гц	~110/115/ 230В±10%	~187÷242В, 50Гц	~230±10%В, 45-65Гц	~95÷240В, 47-64Гц	~230±10%В, 5-65Гц	~110/115/ 230В±10%, 50-Гц
Потребляемая мощность, Вт	80	15	100		100		
без обогрева							
с обогревом	380	310	500	450		250(станд.) 800(макс.)	470
Условия эксплуатации, °С	-50...+50	-40...+60	-50...+50	-0°С...+60 40°С...+70	-40°С+60 50°С...+70	-40...+55	-40...+60
Габаритные размеры, мм	Ø530x860	335x325 x1190	370x380 x960 (УПП)	663x360 x1462	410x510 x690	500x500 x1550	450x450 x1200



Рис. 13.31

VAISALACL31: *а* – внешний вид; *б* – расположение в аэропорту Пулково

В CL31 используется InGaAs/MOCVD (Indium Gallium Arsenide/Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) – импульсный лазерный диод, излучающий на длине волны 905 ± 10 нм.

Выходная энергия в импульсе $1.2 \text{ мкДж} \pm 20\%$. Частота следования импульсов 8.192 кГц, длительность импульса 110 нс. Оптическая схема CL31 построена на основе моностатической схемы с единой передающей и приемной линзой. Реализация подобной схемы позволяет производить измерения с мертвой зоной до 10 метров.

Программный интерфейс позволяет определять границу приземного слоя и аэрозольных образований по линии зондирования и следить за динамикой. На рис. 13.32 представлены примеры детектирования границы приземного слоя в течение суток, а также определение границы облачности.

Основные технические характеристики и особенности системы:

Диапазон измерений, м.....	0–7500
Интервал измерений, с	2–120
Длина волны лазера, нм.....	910
Ширина импульса, нс.....	100
Частота импульсов, кГц.....	8
Разрешающая способность, м.....	5
Точность измерений (тверд. цель), м.....	± 5
Одновременное распознавание до 3-х слоев облаков.	
Возможность отклонения	
от вертикали, °.....	до 12

Среди наиболее распространенных лазерных датчиков подобного типа стоит отметить модель CHM15K немецкой компании JENOPTIK. Это система, построенная на основе бистатической схемы, где два телескопа: один передающий – используется для формирования зондирующего лазерного пучка, второй для приема обратно-рассеянного излучения из атмосферы. Внешний вид системы представлен на рис. 13.33.

В качестве излучателя используется твердотельный Nd:YAG-лазер, излучающий на длине волны 1064 нм.

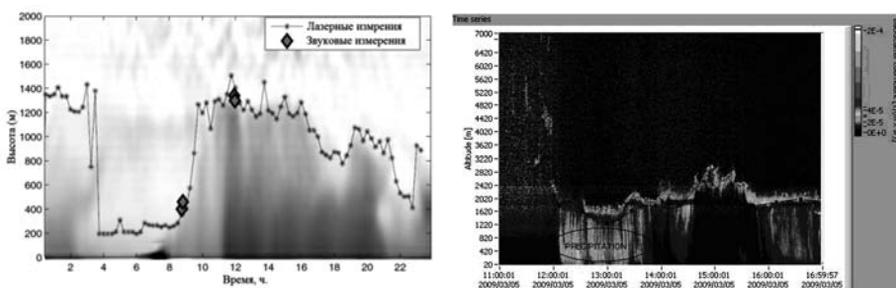


Рис.13.32

Примеры программного интерфейса CL31



Рис. 13.33

Внешний вид системы CHM15K

Благодаря относительно высокой выходной энергии в импульсе, высота детектирования увеличена до 15 км. Основные характеристики и особенности приведены ниже:

Диапазон измерений, м.....	10–15000
Интервал измерений.....	от 2 с до 60 мин
Длина волны лазера, нм.....	1064
Ширина импульса, нс.....	1–5
Частота импульсов, кГц.....	5–7
Мощность импульса, мкДж.....	8
Разрешающая способность, м.....	5
Точность измерений (тверд. цель 10 км), м... ±5	
Одновременное распознавание до 5 слоев облаков	
Двойной корпус	
Модульная конструкция, доступ	
Самодиагностика, система очистки стекла	

Пример сигнала, получаемого с помощью СНМ15К, приведен на рис. 13.34. анализируя данные сигнал можно получить следующую информацию:

- границу облачности от 3 до 9 уровней;
- глубину облака (если возможно);
- общее состояние облаков;
- вертикальную дальность видимости;
- высоту приземного слоя;
- профиль распределения аэрозоля.

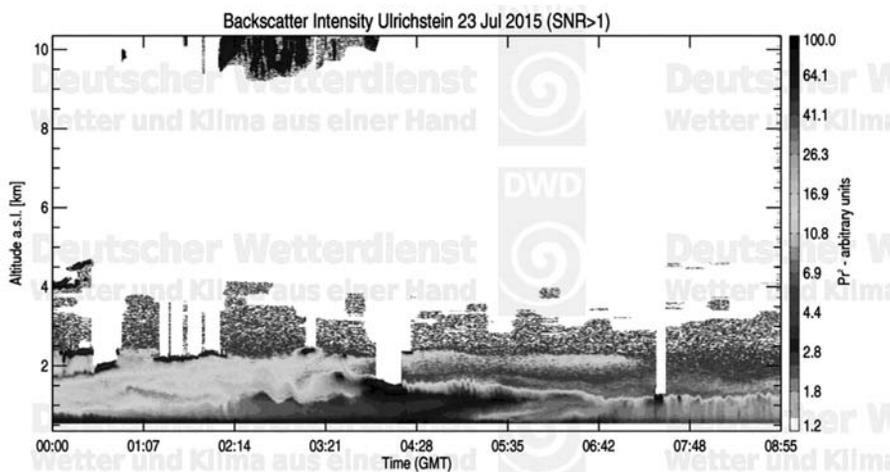


Рис. 13.34

Пример сигнала СНМ15К

Одной из отличительных особенностей системы ALC30 французской фирмы DEGREAN HORIZON является использование твердотельного лазера на длине волны 1535 нм. Оптическая схема выполнена по бистатической схеме.

Внешний вид системы представлен на рис. 13.35. Основные особенности системы представлены ниже:

- Диапазон измерений, м.....15–7500
- Интервал измерений, с.....от 15
- Длина волны лазера, нм.....1535
- Мощность импульса, мкДж.....6
- Разрешающая способность, м.....15м
- Точность измерений, м..... ±7.5
- Одновременное распознавание до 3-х слоев облаков
- Самодиагностика
- Возможность отклонения от вертикали до 90°.
- Система очистки стекла



Рис. 13.35
Внешний вид системы ALC30

Из российских производителей известен только опытный образец системы ДОЛ-2 фирмы ЛОМО. Основные характеристики системы представлены ниже:

- Диапазон измерений, м.....10–2000
- Интервал измерений, с.....15
- Длина волны лазера, нм.....910
- Разрешающая способность, м.....7.5
- Абсолютная погрешность измерений, м
 - от 10 до 100 м±10
 - от 100 до 2000 м±(0.05H+5)

Возможность отклонения от вертикали. Система очистки стекла

К сожалению, никакой информации о типе данных и результатов экспериментов по данной системе в открытом доступе нет.

В ООО «НПП «Лазерные системы» был разработан облакомер, предназначенный для мониторинга параметров атмосферы в приземном слое в целях метеорологического обеспечения аэронавигации на основе безопасного инфракрасного лазерного излучения на длине волны 1.5 мкм. Внешний вид облакомера представлен на рис. 13.36.

Основные характеристики облакомера представлены в табл. 13.4.

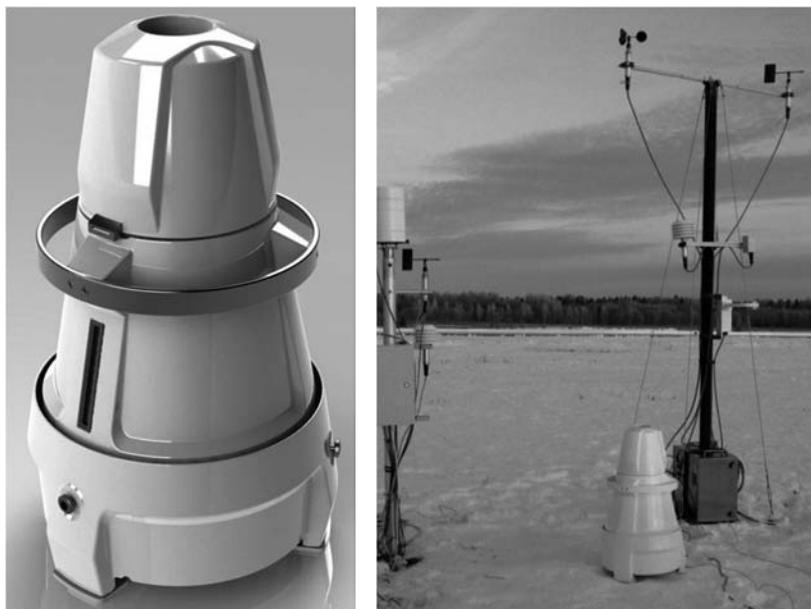


Рис. 13.36

Внешний вид облакомера, разработанного ООО «НПП «Лазерные системы»

Таким образом, использование подобных оптоэлектронных комплексов измерения и мониторинга параметров атмосферы в приземном слое для метеорологического обеспечения аэронавигации в структуре народного хозяйства позволяет иметь оперативную круглосуточную информацию, необходимую для прогнозирования и предотвращения последствий опасных погодных явлений, своевременного принятия мер по предупреждению критических ситуаций, связанных с погодой и влияющих на безопасность полетов.

В подобной информации могут быть заинтересованы службы городского и коммунального хозяйства, строительные и дорожные службы, сельское хозяйство, железнодорожный, воздушный и автомобильный транспорт, службы обеспечения полетов, МЧС и т. д.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 13

13.1. Измерение и прогнозирование ветра вблизи аэропортов является важным вопросом для обеспечения безопасности воздушного движения. Наличие больших градиентов скорости движения воздуха, таких как сдвиг ветра, вихревой след или турбулентность, могут иметь опасные последствия для взлета и посадки самолетов. Поэтому разработка систем для дистанционного обнаружения этих явлений на основе лидарных систем является актуальной задачей. Определение вертикального профиля аэрозолей с помощью облакомеров наряду с профилем ветра повышает безопасность полетов воздушных судов и точность прогнозов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 13

- 13.1. Чему равен доплеровский сдвиг частоты для радиальной скорости 1 м/с при зондировании на длине волны 1.5 мкм?
- 13.2. В чем отличия доплеровского лидара прямого и гетеродинного детектирования?
- 13.3. По каким основным признакам облакомер определяет границу облака?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 13

- 13.1. Трищенко М.А. Фотоприёмные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. – М., Радио и Связь, 1992 г. – 400 с.
- 13.2. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерное гетеродинирование / под ред. Н.Д. Устинова. – М.: Наука. 1985 г. – 288 с.

ЧАСТЬ V

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

Н. Ю. Малькова, А. В. Морозов

ВВЕДЕНИЕ К ЧАСТИ V

Благодаря своим уникальным свойствам, лазеры нашли разнообразное применение в диагностике, а также терапевтической и хирургической медицине. Лазерное излучение можно легко контролировать, управлять, целенаправленно и удобно доставлять с помощью волоконной оптики. Возможность изменения мощности лазера или плотности энергии в большом диапазоне длин волн, охватывающих широкий спектр от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного. Это означает, что метод лечения при помощи лазера можно оптимально выбрать, исходя из уровня поглощения излучения тканью человеческого организма, а также назначенного лечения. Следовательно, лазеры могут быть использованы для диагностики и лечения многих заболеваний.

В медицине обычно используют полупроводниковые, газовые, твердотельные и эксимерные лазеры, а также лазеры на красителях. В практической медицине сегодня сложно найти такую специальность, где бы лазер не применялся для хирургических или физиотерапевтических целей. Это офтальмология и стоматология, гинекология и урология, отоларингология и кардиология, неврология и дерматология, косметология, наркология и прочее.

В настоящем разделе рассмотрены некоторые механизмы взаимодействия света и биологических тканей, а также представлены основные виды лазерных устройств и оборудования, используемых для медицинских целей и ключевые преимущества использования лазеров по сравнению с альтернативными методами лечения.

ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТА НА БИОТКАНИ

14.1.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Воздействие света на биологические ткани может сопровождаться разнообразными физическими процессами, включая поглощение, люминесценцию, в том числе флуоресценцию и фосфоресценцию, упругое и неупругое рассеяние, а также некоторые другие.

В процессе поглощения света в тканях могут наблюдаться безызлучательные переходы, флуоресценция и фосфоресценция. Мультифотонное поглощение также возможно, если плотность излучения достаточно высока. Например, если энергия перехода равна 1.0 эВ, то в процессе поглощения могут участвовать два фотона, обладающие энергией 0.5 эВ каждый.

Люминесценция – это излучение фотонов из возбужденных электронных состояний и включает в себя процессы флуоресценции и фосфоресценции.

Флуоресценция представляет собой процесс излучательного электронного перехода с самого нижнего возбужденного уровня в основное состояние, разрешенный правилом сохранения спина. Время жизни такого возбужденного состояния имеет порядок, измеряемый в наносекундах. Переходы флуоресценции могут происходить с различных колебательных уровней, связанных с основным состоянием, поэтому спектр излучения флуоресценции имеет несколько пиков.

В то время как поглощение происходит в результате перехода из основного состояния на любой из колебательных уровней, находящихся в возбужденном состоянии, флуоресценция происходит в результате перехода с возбужденного уровня на любой из колебательных уровней, связанных с основным состоянием. При флуоресценции фотон имеющий малую длину волны (высокоэнергетический фотон) поглощается и практически сразу испускает фотон с большей длиной волны (низкоэнергетический фотон).

В случае *фосфоресценции* общий спин электронной пары в возбужденном состоянии отличается от спина в основном состоянии. Эти возбужденные состояния являются результатом рекомбинации спина возбужденного электрона в процессе безызлучательных переходов. Фосфоресценция возникает между возбуж-

денными состояниями в результате подобных переходов (интеркомбинационная конверсия).

Такие возбужденные состояния называются триплетными. Переход из возбужденного состояния в основное состояние запрещен, и поэтому время жизни триплетного состояния может быть очень длинным (порядка микросекунд). Это важно с точки зрения медицинской диагностики, поскольку позволяет в естественных условиях измерить концентрацию кислорода в ткани.

На рис. 14.1 показана обобщенная схема процессов поглощения, флуоресценции и фосфоресценции с указанием трех типов процессов и различных вариантов возможных переходов (диаграмма Яблонского). Различные состояния расположены вертикально по энергетическим уровням и сгруппированы по горизонтали в зависимости от мультиплетности (величины, характеризующей спин молекулы).

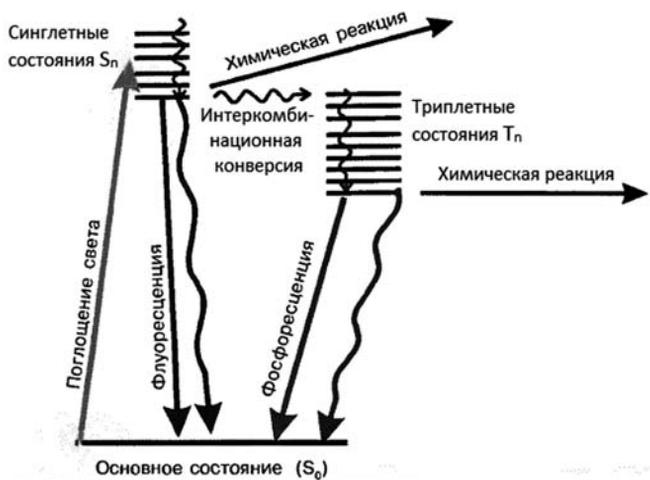


Рис. 14.1

Схема энергетических уровней и переходы органических молекул

Излучательные переходы включают переходы поглощения и излучения. *Безызлучательные* переходы происходят в ходе различных процессов. К ним относятся переходы с участием релаксации возбужденного состояния до самого низкого колебательного уровня в силу способности молекул рассеивать энергию в окружающем пространстве. Второй тип безызлучательного перехода это внутренняя конверсия, суть которой состоит в переходе с участием перехода из одного колебательного возбужденного состояния в другое, более низкое возбужденное состояние. Третий тип безызлучательного перехода – интеркомбинационная конверсия. В этом случае происходит переход между состояниями различной мультиплетности.

Существует два основных механизма рассеяния: *упругое* рассеяние и *неупругое* рассеяние. В случае упругого рассеяния частота рассеянного излучения совпадает с частотой вызвавшего его излучения. В случае неупругого рассеяния частота рассеянного излучения отличается от падающего излучения.

Происхождение упругого рассеяния лежит в ускорении электронов в ткани, вызванном силами, оказываемыми падающим электромагнитным излучением. Рассеянное излучение в этом случае имеет ту же частоту, что и падающее излучение. Основными формами упругого рассеяния являются рэлеевское рассеяние, которое возникает, когда размер частиц много меньше длины волны, и рассеяния Ми, которое возникает в случае, если размер частиц почти такой же, как длина волны.

В однородной среде наблюдается только падающее излучение. В случае среды, где коэффициент преломления изменяется в зависимости от места, возникает рассеянное излучение. У ткани показатель преломления изменяется в диапазоне, зависящем от размеров структур, сквозь которые проходит излучение, то есть от клеточных органелл субмикронного масштаба, до многоклеточных организмов, размер которых лежит в миллиметровом диапазоне.

Неупругое рассеяние возникает либо если частицы находятся в движении, либо если при падении электромагнитное излучение возбуждает молекулярные колебания. В случае рассеяния от движущейся частицы, рассеянное излучение имеет частоту, отличающуюся от частоты падающего (эффект Доплера), на величину, называемую доплеровским сдвигом. Для группы движущихся частиц результатом эффекта Доплера будет спектр излучения, связанный с распределением скоростей частиц. Одним из самых распространенных медицинских применений этого механизма рассеяния является измерение кровотока в тканях.

Неупругое рассеяние, возникающее вследствие молекулярных колебаний, может быть двух типов: *стоксовое комбинационное* рассеяние и *антистоксовое комбинационное* рассеяние (подробнее см. в книге «Лазеры: устройство и действие», гл.11.3). На них основано применение рамановской спектроскопии, которая используется для обнаружения и идентификации даже отдельных бактерий и грибковых клеток благодаря своей уникальной способности различать индивидуальные особенности, и вследствие этого позволяет обнаруживать и идентифицировать биохимические компоненты с высокой степенью селективности. При этом важную роль играет выбор длины волны возбуждающего излучения.

Различные длины волн возбуждающего излучения позволяют воздействовать лазерным лучом на различные внутриклеточные молекулярные компоненты. Излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазона, действуя на однородные клеточные компоненты, позволяет получить фенотипическую характеристику объекта исследований, УФ-излучение вызывает активацию ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), РНК (рибонуклеиновой кислоты) и ароматических аминокислот.

кислот. Комбинационный (рамановский) спектр суммирует все комбинационные спектры компонент активных клеток и, следовательно, благодаря этому появляется возможность исследовать метаболический статус клетки.

Спектроскопия рамановского рассеяния позволяет анализировать изменение клеточного метаболизма. Эти данные могут быть использованы, чтобы диагностировать рак и другие патологические аномалии.

14.2. ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЕТА НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ

Биоткань, наполненную кровью, можно рассматривать как двухкомпонентную среду, вторым компонентом которой является кровь. В крови также имеется большое число макромолекул, обладающих значительным сечением поглощения в видимом диапазоне. К ним относятся гемоглобин, все эндогенные порфирины, каротин, металлосодержащие ферменты, циклические нуклеотиды, ферменты и коферменты окислительно-восстановительных реакций. Биоткани являются оптически-неоднородными поглощающими и рассеивающими излучение средами с показателем преломления больше единицы.

Большинство органических молекул интенсивно поглощают излучение УФ-диапазона. Оксигенированный гемоглобин интенсивно поглощает излучение, начиная с УФ и до желтой области спектра ($\lambda \sim 0.6$ мкм). Меланин поглощает во всей видимой части спектра (рис. 14.2).

При прохождении лазерного излучения из воздуха в биоткань часть излучения отражается от границы раздела в соответствии с законом Френеля, а остальная часть проникает в биоткань, рассеивается и поглощается.

На рис. 14.3 (ил. 11) показана глубина проникновения лазерного излучения в различных биологических тканях в зависимости от длины волны.

Отражение происходит от поверхностного слоя эпидермиса, который состоит, в основном, из кератина. В самом глубоком слое эпидермиса содержится пигмент меланин – один из основных хромофоров, интенсивно поглощающих свет в широком спектральном диапазоне. За эпидермисом располагается дерма, представляющая собой плотную ткань волокнистого строения. Дерма содержит коллагены, на которых происходит сильное рассеяние света. Поскольку в дерме имеется богатая сеть кровеносных сосудов, центрами поглощения света являются также молекулы гемоглобина Hb, оксигемоглобина HbO₂ и оксимииоглобина MbO₂. За счёт многократного рассеяния в дерме лазерный пучок уширятся и затухает.

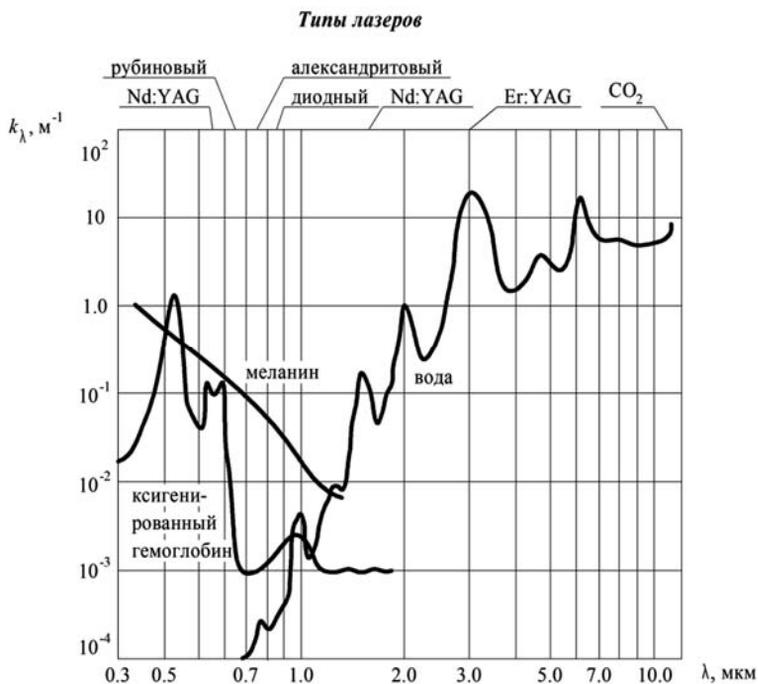


Рис. 14.2

Поглощения лазерного излучения основными хромофорами биоткани

Для многих биотканей основное рассеивание происходит на клеточных оргanelлах, таких, например, как митохондрии. Поглощающие излучение биомолекулы называются хромофорами. Энергия поглощённого излучения расходуется на фотохимические реакции, переизлучается флуоресценцией, а оставшаяся часть диссипирует в тепло.

Распространение света в биотканях в основном зависит от длины волны и коэффициентов поглощения и рассеяния ткани. Коэффициент поглощения может изменяться на несколько порядков, в зависимости от типа материала и места измерения. В отличие от него, коэффициент рассеяния медленно уменьшается, в зависимости от длины волны. Коэффициент рассеяния незначительно влияет на распределение плотности энергии в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах длин волн, однако его влияние становится более значимым в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Распространение света в биотканях играет важную роль в прогнозировании распределения плотности мощности во время лечебных процедур, интерпретации результатов диагностических измерений и построения моделей оптимизации диагностического, терапевтического и хирургического применения.

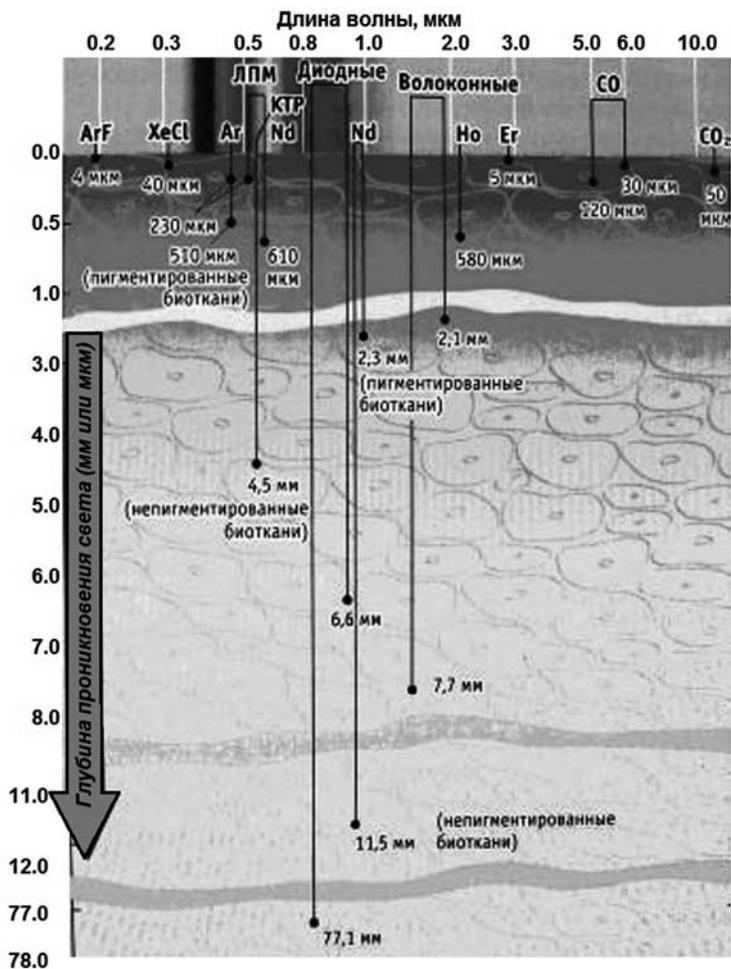


Рис. 14.3

Проникновение лазерного излучения в биоткани

В то же время эффективность лазерного воздействия определяется как биологическими структурами, которыми являются органеллы, клетки, ткани или органы, так и характеристиками излучения (длиной волны, непрерывной мощностью, энергией импульса, длительностью импульса и другими).

Можно выделить три вида фотобиологических эффектов (рис. 14.4):

1) *Невозмущающее воздействие*, когда биосубстанция не меняет своих свойств в процессе взаимодействия со светом. Это такие эффекты, как рассеяние, отражение и проникновение. Этот вид воздействия используют для лазерной диагностики.

2) *Фотофизические и фотохимическое воздействие*, при котором поглощенный биотканями свет возбуждает в них атомы и молекулы, вызывает фотохимические и фотофизические реакции. Это воздействие используется как терапевтическое.

3) *Фотодеструктивное воздействие*, при котором тепловой, гидродинамический, фотохимический эффекты света вызывают деструкцию тканей. Этот вид воздействия используется в лазерной хирургии.



Рис. 14.4

Виды воздействия лазерного излучения на биоматериалы

Если при диагностике биологических объектов для получения объективной картины важно обеспечить минимальное воздействие излучения на исследуемые образцы, то лечебное применение начинается, когда под воздействием лазерного излучения в биотканях начинаются заметные изменения. Механизм воздействия лазерного излучения может быть фотохимическим, фототермическим (тепловым) или фотомеханическим (гидродинамическим).

14.3.

ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОСТРУКТУРЫ

В зависимости от характеристик излучения реакция тканей на облучение будет различна.

Фотостимуляция. Для фотостимуляции используются низкоинтенсивные терапевтические лазеры. Терапевтический лазер по энергетическим параметрам оказывает действие, не повреждающее биосистему, но в то же время этой энергии

достаточно для активации процессов жизнедеятельности организма, например ускорения заживления ран.

Фотодинамическая реакция. В основе принципа – воздействие светом определенной длины волны на фотосенсибилизатор (естественный или искусственно введенный), обеспечивающее цитотоксический эффект на патологическую ткань. В дерматологии фотодинамическое воздействие используется для лечения вульгарных угрей, псориаза, красного плоского лишая, витилиго, пигментной крапивницы и др.

Фототермолиз и фотомеханические реакции. При поглощении излучения происходит преобразование энергии лазерного луча в тепло на том участке кожи, который содержит хромофор. При достаточной мощности лазерного излучения это приводит к тепловому разрушению мишени. Селективный фототермолиз можно применить для удаления пороков развития поверхностно расположенных сосудов, некоторых пигментных образований кожи, волос, татуировок.

Воздействие лазерного излучения на биологические структуры можно рассматривать с точки зрения трех параметров: механизм взаимодействия, биологическая структура и время воздействия. На рис. 14.5 схема воздействия лазерного излучения на биоструктуры представлена в виде куба.

По оси *X* отложены механизм взаимодействия (химический, термический и механический), ось *Y* – это биологической структуры, на которые осуществляется воздействие и *Z* – ось времени. Время здесь означает любой физический эффект или изменение в биологическом ответе с течением времени.

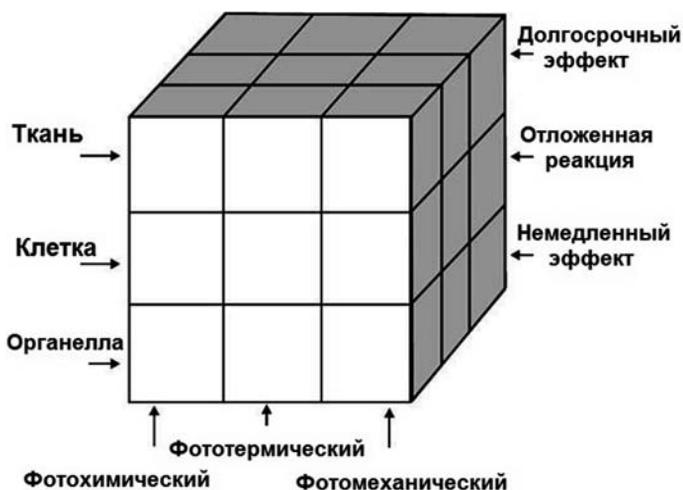


Рис. 14. 5

Схема воздействия лазерного излучения на биоструктуры

14.3.1. ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Фотохимические реакции широко распространены в природе. Один из примеров – фотохимическая реакция, возникающая в процессе поглощения солнечного света хлорофиллом в растениях, приводящая в конечном счете к связыванию воды и углекислого газа с образованием сахаров. Фотохимические эффекты составляют основу лечения различных заболеваний в разных направлениях медицины, в том числе в онкологии, дерматологии и офтальмологии.

Для возбуждения фотохимических реакций с участием электронных уровней подходит лазерное излучение ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной области спектра. Излучение среднего и дальнего инфракрасного диапазона используют для фотохимических реакций с участием колебательных и вращательных энергетических уровней молекул. Скорость фотохимической реакции прямо пропорциональна интенсивности облучения, коэффициенту поглощения фоточувствительной молекулы и квантовой эффективности процесса.

14.3.2. ФОТОТЕРМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Фототермические эффекты, вызываемые поглощением тканью энергии лазерного излучения, лежат в основе широкого спектра лечебных применений. Лечение отслоения сетчатки путём коагуляции тканей является наиболее распространённым примером. Лазерная коагуляция также является эффективным инструментом для лечения опухолей.

Характер поведения материала при подводе тепла определяется его коэффициентом температуропроводности χ , имеющим размерность $[m^2/s]$.

С помощью этого коэффициента можно определить, за какое время сможет прогреться слой вещества толщиной δ [м]:

$$t_{\text{прогр}} = \delta^2 / \chi. \quad (14.1)$$

Можно решить и обратную задачу: на какую глубину проникает тепло при импульсном нагреве поверхности с длительностью импульса $\tau_{\text{имп}}$.

$$\delta = \sqrt{\chi \cdot \tau_{\text{имп}}}. \quad (14.2)$$

Величина χ определяется плотностью материала ρ [кг/м³], изобарной удельной теплоемкостью c_p [кДж/(кг·К)] и теплопроводностью материала a [кВт/(м·К)]:

$$\chi = a / (c_p \cdot \rho). \quad (14.3)$$

Значения коэффициента температуропроводности χ и другие теплофизические и оптические свойства некоторых биологических материалов приведены на рис. 14.2, 14.3 и в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Теплофизические свойства некоторых биоматериалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоёмкость c_p , кДж/(кг·К)	Теплопроводность a , кВт/(м·К)	Температуропроводность χ , м ² /с
Биологическая ткань человека	1.2...1.6 × 10 ³	0.36...0.37	0.21...0.27	-
Эпидермис	1.0...1.2 × 10 ³	0.32...0.38	0.45...0.53	-
Кожа	-	0.29...0.34	0.45...0.5	0.8...1.0 × 10 ⁻⁶
Кровь	1.02...1.06 × 10 ³	0.36...0.39	0.53...0.55	-
Жировая ткань	1.74 × 10 ³	0.22...0.23	0.2	-
Мозг	-	0.33	0.401	-
Миокард	-	0.37	-	-
Мягкие ткани и мышцы	-	0.34	0.5	-
Печень, почка	-	-	0.43	-

При непрерывном воздействии лазерного излучения или при длительности импульса ($\tau_{\text{имп}}$), удовлетворяющему соотношению $\tau_{\text{имп}} \gg t_{\text{прогр}}$, происходит обычный нагрев, и оценить воздействие лазерного излучения можно в рамках классической теории теплопроводности при граничных условиях второго рода.

Ущерб, причиненный ткани в результате температурного воздействия, имеет очень большое значение при использовании фототермического эффекта для лечебного применения. Целью лечебного применения лазеров является своего рода контролируемое повреждение ткани.

Прогнозирование термического повреждения ткани за счет лазерного излучения включает в себя моделирование процессов распространения света и его распределение в тканях, тем самым оценивается результат термического повреждения, нанесенного тогда, когда ткань подвергается воздействию высокой температуры в течение длительного периода времени. Если температура меньше определенного порогового значения, называемого критической температурой, скорость

накопления повреждений незначительна. В диагностике и фотохимической терапии, температура поддерживается на уровне ниже критической.

Как только температура ткани превышает критическую, то наступает первая форма наблюдаемого теплового повреждения ткани, называемая *коагуляцией* (свёртыванием). В первую очередь она возникает из-за денатурации (потери химических свойств, вследствие нарушения молекулярной пространственной структуры) клеточных и тканевых белков. Денатурация увеличивает коэффициент рассеяния, в результате рассеянный в ткани свет выглядит белым. Ткани, богатые коллагеном, такие как сухожилия и кожа, становятся прозрачными при коагуляции за счет уменьшения коэффициента рассеяния.

Свёртываемость значительно падает, если режим нагрева не подразумевает достижение абляции. Если же продолжать повышать температуру и выходить за пределы диапазона коагуляции, то результатом этого станет *испарение*. Большинство тканей содержит большое количество воды. Вода испаряется при 100°C, и если плотность мощности по-прежнему высока, то вырабатывается такое количество пара, которое невозможно уменьшить путём диффузии. Избыток пара попадает в ловушку, образованную слоями ткани, и впоследствии перегреваясь, образует пузырьки пара или расширяющиеся тканевые полости (вакуоли). В дальнейшем это приводит к разрыву стенок тканевых полостей и образованию отверстий в ткани.

Коагуляции применяется для лечения отслоения сетчатки и небольших опухолей, фототермический эффект – в дерматологии.

14.3.3. ФОТОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

При импульсных режимах воздействия, когда $\tau_{\text{имп}} < t_{\text{прогрева}}$, могут возникать фотомеханические эффекты, включающие термоупругое расширение, кавитацию, испарение и плазмообразование.

Термоупругая деформация возникает в результате роста температуры, вызванного накоплением тепловой энергии. Деформация создает напряжение или давление, которое при умеренных интенсивностях непрерывного излучения поглощается окружающими тканями. В случае импульсного воздействия давление может распространяться в ткани со скоростью звука. Индуцированные лазером волны давления подходят не для любого лечебного применения, однако они важны, поскольку служат основой кавитации.

Кавитация является результатом напряжения, вызванного термоупругой деформацией, превышающей определенный предел. Когда предел превышен, ткань разрывается. В случае твердых веществ, это приводит к образованию пустот, которые впоследствии, как правило, увеличиваются вдоль плоскости трещи-

ны; этот процесс называется отслаиванием. В жидкостях это приводит к появлению и последующему росту пузырей. Кавитация применяется для удаления тонких слоев ткани, не вызывая при этом значительного термического повреждения или модификации поверхности биоматериала.

Испарение воды в ткани это другой эффект, возникающий из-за повышения температуры. Процесс испарения может принимать три формы: *поверхностного испарения, взрывного подповерхностного испарения и взрывного испарения перегретой жидкости.*

Поверхностное испарение происходит, когда пар образуется на поверхности. Это явление используется для обезвоживания поверхностных слоев ткани.

В случае *подповерхностного взрывного испарения* пар образуется под поверхностью. Объем пара в этом случае ограничен, и при дальнейшем повышении температуры, давление пара растёт. Когда давление пара преодолевает структурные силы, связывающие ткань, она разрушается и пар вырывается наружу, разрывая ткань.

Взрывное испарение перегретой жидкости происходит, когда температуры значительно превышает значение, необходимое для начала процесса парообразования. В этом случае вода в ткани выбрасывается взрывом. Этот процесс используется для удаления крупных опухолей, таких как обструкции лёгких или опухоли головного мозга. Способ особенно хорошо подходит для удаления труднодоступных опухолей.

При очень коротких импульсах ($\tau_{\text{имп}} \ll t_{\text{прогрева}}$), когда плотность лазерного излучения на поверхности ткани превышает примерно 10^{10}Вт/м^2 , происходит взрывное формирование парогазового (пароплазменного) облака, движущегося нормально к облучаемой поверхности. Это явление получило название *фотоабляции* или лазерной абляции. Если излучение подводится к внутренним областям тканей, то формируется пузырь, который расширяется до своего максимального диаметра, а затем разрушается, создавая экстремальное давление, разрывающее ткань. Одним из распространенных применений плазмообразования является постхирургическое вмешательство после лечения катаракты глаза. Лазер фокусируют вблизи имплантированного искусственного хрусталика, чтобы удалить непрозрачную плёнку, мешающую нормальному зрению. Этот механизм также используется для дробления больших камней в почках.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 14

14.1. Фундаментальные механизмы взаимодействия света и ткани включают поглощение, люминесценцию (в том числе флуоресценцию и фосфоресценцию) и рассеяние (в том числе упругое и неупругое).

14.2. Различные длины волн возбуждения позволяют воздействовать лазерным лучом на различные внутриклеточные молекулярные компоненты:

– излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазона, действуя на однородные клеточные компоненты, позволяет получить фенотипическую характеристику объекта исследований;

– УФ-излучение вызывает активацию ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), РНК (рибонуклеиновой кислоты) и ароматических аминокислот.

14.3. Комбинационный (рамановский) спектр суммирует все комбинационные спектры компонент активных клеток и, следовательно, благодаря этому появляется возможность исследовать метаболический статус клетки.

14.4. Эффективность лазерного воздействия определяется как биологическими структурами, которыми являются органеллы, клетки, ткани или органы, так и характеристиками излучения (длиной волны, непрерывной мощностью, энергией импульса, длительностью импульса и другими).

14.5. С точки зрения лечебного применения, характер взаимодействия света ткани может быть фотохимическим либо фототермическим, либо фотомеханическим.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 14

14.1. Какие основные физические процессы сопровождают взаимодействие света и биологических тканей?

14.2. Какие два основных механизма выделяют при изучении рассеяния света. Каковы основные формы упругого рассеяния и условия, при которых оно возникает. Когда возникает неупругое рассеяние?

14.3. Какие основные эффекты выделяют при анализе воздействия лазерного излучения на биоструктуры? В каких областях они применяются?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 14

14.1. Тучин В.В. Оптическая биомедицинская диагностика. Под ред. В.В.Тучина. В 2 т. М.: Физматлит, 2007. 368 с. – 560 с.

14.2. Александров М.Т. Лазерная клиническая биофотометри (теория, эксперимент, практика). – М., 2008. – 584 с.

14.3. Бочкарев Н.Н. и др. Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов с биологическим веществом. – Томск, 2007. – 122 с.

14.4. Рубникович С.П., Фомин Н.Ф. Лазерно-оптические методы диагностики и терапии в стоматологии. – Минск: ИТМО НАН Белоруси, 2010. – 361 с.

14.5. Шахно Е.А. Физические основы применения лазеров в медицине. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 129 с.

ГЛАВА 15

ЛАЗЕРНАЯ МЕДИЦИНСКАЯ ДИАГНОСТИКА

15.1.

ДИАГНОСТИКА *IN VIVO* И *IN VITRO*

Лазерные методы диагностики основаны на том факте, что оптические свойства биологических мягких тканей зависят от физиологического, функционального и патологического состояния тканей и органов. Различные спектральные оптические свойства, такие как коэффициент поглощения, отражения, флуоресценции и рассеяния тканей, жидкостей и крови, различны для функциональных и патологических случаев. Это позволяет, зная клиническое состояние органов или тканей, получить параметры измерений *in situ* (в месте измерения).

Хотя лазерная диагностика обычно зависит от взаимодействия излучения с эндогенными (находящимися внутри организма) составляющими, она также может быть выполнена путем введения экзогенного агента.

Существует две широких категории методов диагностики: *in vivo* (в естественных условиях или непосредственно на биологическом объекте) и *in vitro* (в пробирке или путём исследования взятого образца в лабораторных условиях).

Примерами диагностики *in vivo* являются: визуализация рентгеновских изображений, магнитно-резонансная томография (МРТ) и компьютерная томография (КТ), методы мониторинга, такие как электрокардиография (ЭКГ) и электроэнцефалография (ЭЭГ).

Диагностические методы *in vitro* включают в себя взятие проб крови, слюны и биопсии ткани из живого организма для экспертизы в контролируемой среде лаборатории. Существуют относительно простые и недорогие комплекты диагностического оборудования *in vitro* диагностики. В дополнение к тестовым элементам (реагентам), диагностика *in vitro* также включает оборудование, используемое для анализа результатов.

В любом *in vivo* оптическом диагностическом процессе в живом организме, область ткани освещается световым потоком низкой интенсивности. Световой

поток взаимодействует с тканью, а обратно рассеянный световой поток регистрируется фотодетектором. Взаимодействие света и тканей представляет собой сложное явление и приводит ко многим линейным и нелинейным физическим процессам, таким как поглощение, рассеяние, флуоресценция и доплеровский сдвиг частоты. Спектральное и пространственное распределение регистрируемого излучения несет в себе много информации о биохимическом и структурном составе объекта. Пространственное разрешение лазерных и вообще оптических методов диагностики несравнимо лучше, чем достижимое разрешение, полученное с помощью любых других *in vivo* диагностических методик. Это связано с длиной волны оптического излучения, имеющей тот же порядок, что и размер исследуемых клеточных структур.

Абсорбционная спектроскопия используется для определения содержания воды, липидов и меланина в ткани. Спектроскопия упругого рассеяния используется для получения информации о морфологической структуре ткани. Зависимость отражательной способности ткани от насыщенности ее кислородом используется для оценки уровня оксигенации (насыщения кислородом) гемоглобина крови. Доплеровская флоуметрия используется для измерения динамики кровотока.

15.2.

ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Чувствительность молекулярной структуры биологических тканей к оптическому излучению в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, а также тот факт, что оптические свойства тканей являются показателем физиологического, функционального и патологического состояния тканей, является ещё одной особенностью оптической диагностики.

Пространственное разрешение лазерных и вообще оптических методов диагностики несравнимо лучше, чем достижимое разрешение, полученное с помощью любых других *in vivo* диагностических методик. Это связано с длиной волны оптического излучения, имеющей тот же порядок, что и размер исследуемых клеточных структур.

Другой характерной чертой лазерной диагностики является возможность использовать оптическую маркировку, чтобы обеспечить возможность получения дополнительной молекулярной, физиологической или генетической информации, которую трудно получить с помощью других методов. Например, можно соединить флуоресцентные красители с антителами или фрагментами ДНК с последующей флуоресцентной визуализацией, так как они, как биологически активные агенты, связывают себя с исследуемыми клеточными структурами. Оптическая

маркировка будет играть все более важную роль в адаптации лечения в зависимости от индивидуальных особенностей пациентов для получения точной информации о молекулярной или генетической причине заболевания.

Еще одним важным преимуществом лазерной диагностики является её совместимость, а значит, и возможность одновременного использования с другими диагностическими методами.

15.3.

МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ *IN VIVO*

В естественных условиях все оптические методы диагностики используют один или несколько типов взаимодействия, которые происходят, когда оптическое излучение падает на исследуемую область ткани. После взаимодействия фотоны выходят из ткани в виде либо пропущенного, либо отраженного излучения. Именно этот свет несет диагностическую информацию. Выходное излучение измеряется с помощью системы детекторов, которая может варьироваться от одного фотодетектора до очень сложных комплексов визуализации наряду с соответствующей оптикой. Выходное излучение должно быть всесторонне проанализировано, чтобы извлечь необходимую диагностическую информацию. Так как существует несколько различных механизмов взаимодействия, это привело к введению нескольких методов визуализации *in vivo* (в естественных условиях) одного или более механизмов взаимодействия, применяющихся в зависимости от клинических задач.

Наиболее распространёнными методами диагностики являются: визуализация в белом диапазоне, диффузная оптическая спектроскопия, спектроскопия упругого рассеяния в оптической когерентной томографии, рамановская спектроскопия, конфокальная визуализация и флуоресцентная спектроскопия. В дополнение к этому, в стадии развития находятся следующие оптические методы клинической диагностики: акустооптическая спектроскопия, фототермическая спектроскопия, корреляционная флуоресцирующая спектроскопия, спекл-интерферометрия, а также измерение кровотока методом лазерной доплерографии.

15.3.1.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Наиболее распространена визуализация в белом свете, при которой диагноз основывается на спектральном и пространственном внешнем виде ткани в видимом диапазоне. Оптические методы диагностики ранее зависели в большой степени от интерпретации врача, его знаний и опыта. В настоящее время способность глаз доктора расширена, благодаря применению оптических приборов, расширя-

ющих спектральный диапазон и чувствительность, а также обеспечивших доступ к внутренним структурам, ранее скрытым от глаза человека.

Экспертиза сетчатки с помощью широкопольного ретиноскопа является одним из таких примеров. Типичный портативный офтальмоскоп изображен на рис. 15.1, *а*. Прибор предназначен для офтальмоскопического исследования глазного дна, исследования переднего отдела глаза, диафоноскопического исследования глазного яблока.

На рис. 15.1, *б* приведена фотография сетчатки с необратимыми повреждениями, изображения которых получены визуализацией в белом свете.

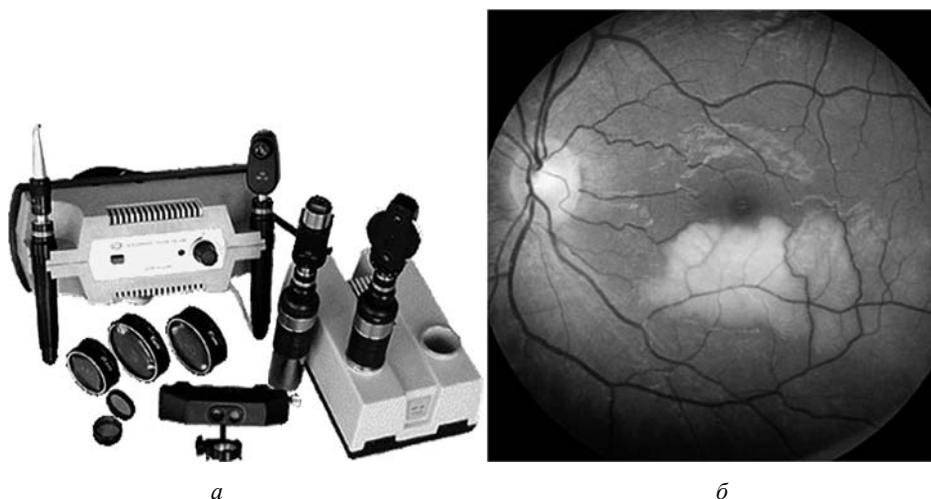


Рис. 15.1

а – офтальмоскоп ручной ОР-3Б-08 (Загорский оптико-механический завод, РФ);
б – сетчатка глаза с необратимыми повреждениями (разрыв сетчатки)

Эндоскопия в белом свете используется для диагностики внутренней оболочки желудочно-кишечного тракта, мочевого пузыря, шейки матки или бронхов. В настоящее время эндоскопия с источником белого света претерпела значительные изменения в плане как приборов, так и связанных с ними возможностей. Полюс трубки с соответствующими линзами и другие оптические элементы, а также внешние камеры, были заменены средствами волоконно-оптической доставки и миниатюрными цветными камерами, расположенными на конце того, что сегодня называется оптоволоконным эндоскопом. На рис. 15.2 показан оптоволоконный эндоскоп, содержащий источник белого света, волоконно-оптический кабель и цветную камеру, установленную на конце зонда. Это позволило принимать и обрабатывать изображение с высоким разрешением, получая информацию в электронном виде.

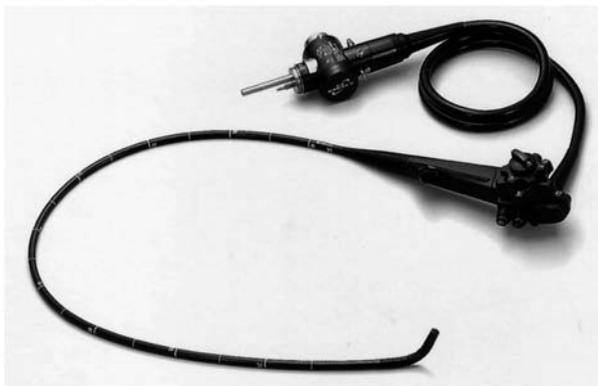


Рис. 15.2
Оптоволоконный эндоскоп

Использование контрастных веществ, например поглощающих красителей, улучшает изображение патологических структур. Эта особенность в сочетании с возможностью большого увеличения может быть использована в эндоскопии, чтобы увидеть мелкие особенности поверхности ткани.

Новой тенденцией для *in vivo* оптической диагностики является использование изображений на разных длинах волн для повышения качества диагностики патологий.



Рис. 15.3

ИК-портреты с условной раскраской областей, соответствующих разным температурам
(слева портрет здорового человека;
справа – человека с повышенной температурой из-за острого респираторного заболевания)

Инфракрасное излучение невидимо для глаза человека, поэтому для его наблюдения используются тепловизоры (термографы), позволяющие улавливать это излучение, измерять его и превращать его в видимую для глаза картину. В них излучение преобразуется в электрический сигнал, который подвергается усилению и автоматической обработке, и восстанавливается как видимое изображение теплового поля объекта для его визуальной и количественной оценки.

Так на рис. 15.3 (ил. 12) приведены изображения, полученные с помощью тепловизора в инфракрасном диапазоне длин волн 3–5 микрон с температурной чувствительностью около 0.02°C .

15.3.2. ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ

В последние два десятилетия достигнуты значительные успехи в области оптической когерентной томографии (ОКТ), обеспечивающей наиболее высокое пространственное разрешение (до единиц микрометров) при восстановлении внутренней микроструктуры неоднородных объектов и сред со значительным диффузным рассеянием, таких как биоткани. Методы ОКТ позволяют построить трехмерные распределения плотности (показателя преломления) в исследуемых средах. При взаимодействии света с тканями, происходит его обратное рассеяние, что на микроуровне связано с локальным изменением показателя преломления на границах раздела. На этом основана оптическая когерентная томография (ОКТ), которая позволяет получать изображения с высоким разрешением до глубины в несколько миллиметров. Методика ОКТ похожа на УЗИ высокого разрешения, только в ОКТ для пространственной локализации глубинного распределения микронеоднородностей применяют двулучевой интерферометр Майкельсона, а не эхолокацию звуковых волн, как в УЗИ. На рис. 15.4 показан принцип работы ОКТ.

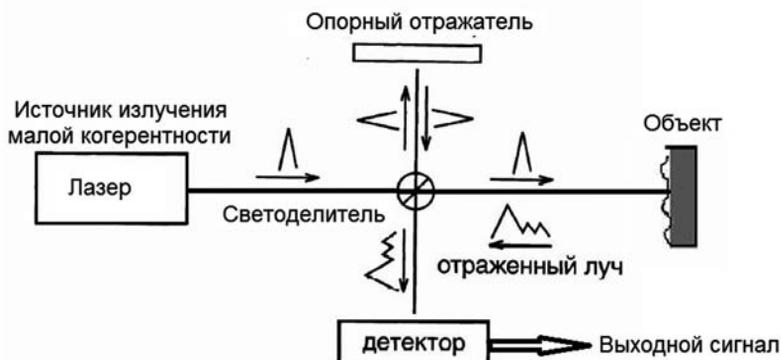


Рис.15.4

Принцип спектральной оптической когерентной томографии

В ОКТ определяют степень отражения зондирующего лазерного излучения по глубине исследуемой среды при освещении объекта излучением с ограниченной когерентностью. Интерференция такого излучения может происходить лишь при наложении волн в пределах длины когерентности. Именно это обстоятельство и позволяет определить глубину, на которой произошло текущее отражение зондирующего излучения.

Примерами подобных источников излучения являются суперлюминесцентные диодные лазеры, излучающие в диапазоне 800–1500 нм, и Ti-сапфировые лазеры, излучающие на длине волны приблизительно 800 нм. Активно развивающиеся на сегодняшний день источники света включают волоконные фотонно-кристаллические и волоконные суперлюминесцентные лазеры.

Лазерное излучение в интерферометре разделяется на измерительную (предметную) волну, освещающую объект, и опорную волну, оптическая длина пути которой может изменяться при управляемом перемещении опорного отражателя. При освещении объекта оптическое излучение проникает в среду на глубину до нескольких миллиметров, и для получения информации о внутренней микроструктуре среды необходимо определить степень отражения от каждого отдельного слоя.

Интерференционные полосы малой когерентности наблюдаются при равенстве оптических длин пути измерительной и опорной волн в пределах длины когерентности излучения. Положение опорного отражателя, при котором достигается максимум видности полос, характеризует расстояние до текущей отражающей поверхности или границы внутреннего отражающего слоя среды. При отличной от нуля фиксированной оптической разности хода измерительной и опорной волн интенсивность света на выходе интерферометра зависит от значения длины волны в пределах длины когерентности, т.е. от числа длин волн, укладывающихся в этой разности. При изменении длины волны в пределах спектрального диапазона излучения наблюдаются полосы равного хроматического порядка, частота которых пропорциональна оптической разности хода. В случае объемного отражения от неоднородной среды спектры для слоев среды суммируются, и результирующий спектр содержит информацию о неоднородности, т.е. распределении степени отражения излучения по глубине. Особенность метода спектральной интерферометрии состоит в том, что информация о степени отражения излучения по всей глубине среды содержится в результирующем спектре в виде периодических составляющих, частота каждой из которых соответствует глубине расположения слоя в среде. При этом информация обо всем объекте регистрируется одновременно, поскольку не требуется операция селекции слоев по глубине за счет перемещения опорного отражателя интерферометра.

На рис. 15.5 показано двумерное изображение биоткани по глубине, иллюстрирующее возможности отображения внутренней структуры среды методом ОКТ для целей медицинской диагностики.

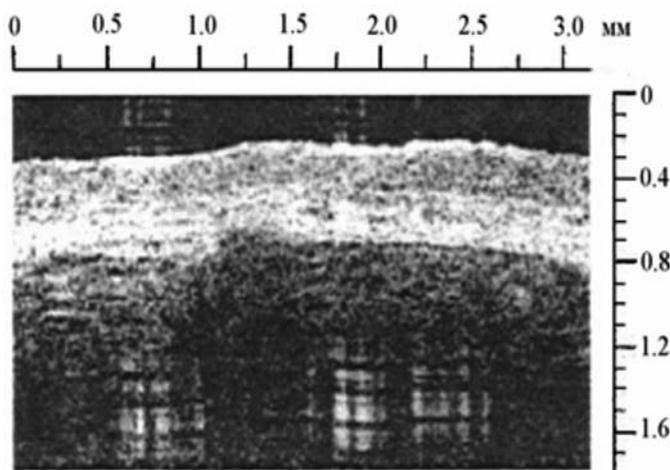


Рис. 15.5

Изображение сечения слизистой оболочки рта, полученное с помощью ОКТ

При сканировании в боковом направлении также по второй координате восстанавливаются трехмерные изображения структуры объектов. Рисунок также иллюстрирует характерные геометрические масштабы объектов и их отдельных областей, исследуемых методами ОКТ.

В настоящее время ОКТ используется в трех различных вариантах: макроскопическая визуализация структур при слабом увеличении; получение микроскопических изображений с помощью очень большого увеличения и эндоскопическая визуализация, использующая низкие и средние значения увеличения.

Офтальмология является одной из важнейших областей применения ОКТ в связи с прозрачностью глазных сред. Использование длин волн ближнего инфракрасного диапазона сделало возможным применение инфракрасной техники для сильно рассеивающих молекул. Оптическая *in vivo* биопсия – одна из наиболее сложных новых задач, стоящих перед ОКТ. Высокое разрешение и большая глубина проникновения с соответствующей возможностью функциональной визуализации позволяют осуществить высококачественную оптическую биопсию, что поможет на месте оценить состояние, функциональность и морфологию ткани и клеток. На рис. 15.6, *а* показана возрастная макулярная дегенерация, в то время как на рис. 15.6, *б* изображена сетчатка нормального глаза.

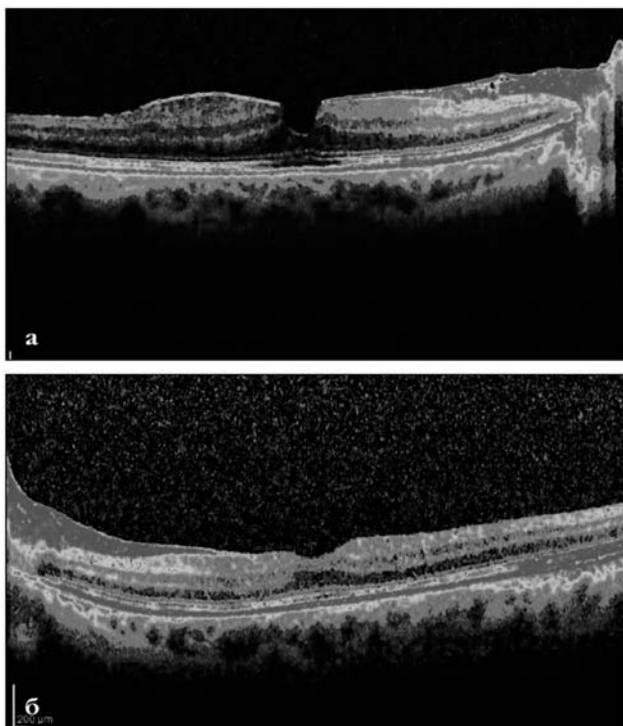


Рис. 15.6

Изображения сетчатки глаз, полученные с помощью ОКТ:
a – имеет место возрастная макулярная дегенерация; *б* – нормальный глаз

15.3.3. КОНФОКАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Конфокальная микроскопия и созданные на ее основе конфокальные лазерные сканирующие микроскопы – принципиально новое направление в световой микроскопии. С возникновением методов конфокальной сканирующей микроскопии появилась возможность путем послойного сканирования просматривать детали объемного препарата на некоторой его глубине, что не позволяет делать обычный, даже самый совершенный микроскоп из-за рассеяния и преломления света на оптически неоднородных фрагментах.

Развитие и совершенствование конфокальной микроскопии в настоящее время дает возможность использовать ее в неинвазивной диагностике многих патологий, в проктологии, в дерматологии, а также в офтальмологии, где основной проблемой всегда являлась невозможность микроскопирования в реальном времени с дозируемой освещенностью исследуемых тканей.

Как и оптическая когерентная томография, конфокальная визуализация используется для получения изображений подповерхностных структур ткани с высоким разрешением.

Рис. 15.7 иллюстрирует основной принцип конфокального метода визуализации.

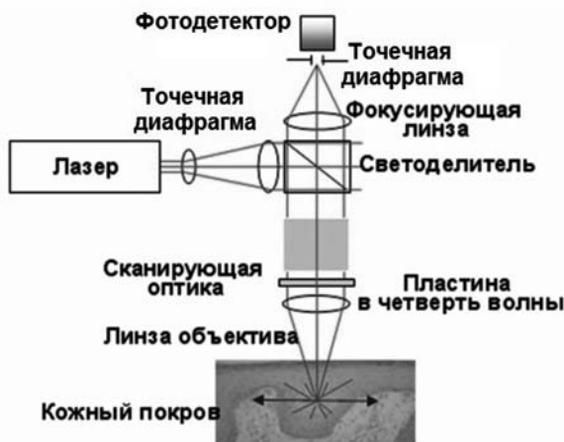


Рис. 15.7
Конфокальный метод визуализации

Точечный источник света создается при прохождении луча лазера через микроотверстие в точечной диафрагме. После этого расширенный луч света проходит через светоделиТЕЛЬ и фокусируется на точке внутри ткани. Отраженный свет следует тем же путем, и после отражения от противоположной поверхности светоделиТЕЛЯ, направляется на фотодетектор через второе микроотверстие. В качестве детектора, как правило, применяется фотоэлектронный умножитель для обеспечения высокой чувствительности. Два микроотверстия, определяющие точечный источник и детектор, сопряжены друг с другом. Это означает, что обратно отраженный внефокусный свет имеет чрезвычайно низкую вероятность обнаружения. Только сигнал, собранный из дифракционно-ограниченной точки под тканью, имеет высокую вероятность обнаружения. Лазерный луч может быть отсканирован в фокальной плоскости для создания 2D X-Y-изображения. 3D-изображение также может быть создано путем последовательного сканирования Z-плоскости. Конфокальная визуализация обычно используется *in vivo*. Одним из таких применений является визуализация опухоли кожи во время проведения хирургической резекции.

Еще одно распространенное применение конфокальной микроскопии – построение изображения глаза в высоком разрешении. Обычно такое применение носит название конфокальной лазерной сканирующей офтальмоскопии.

На рис. 15.8 изображена схема расположения узлов лазерного сканирующего офтальмоскопа. Также конфокальная визуализация применяется в эндоскопической конфокальной визуализации – развивающемся сегодня новом методе эндоскопии.

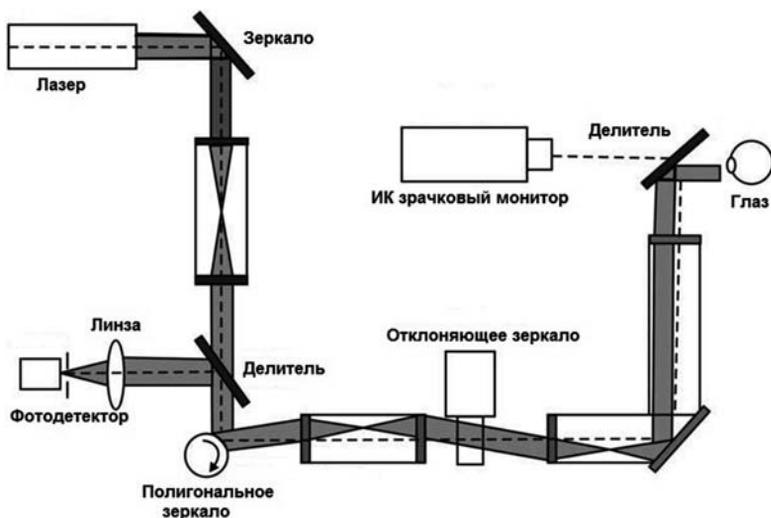


Рис.15.8

Схема расположения узлов лазерного сканирующего офтальмоскопа

15.3.4.

ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Диагностика на основе флуоресцентной спектроскопии и визуализации основана на флуоресценции хромофоров в ткани при их возбуждении коротковолновым излучением в синем или ультрафиолетовом диапазонах. Флуоресценция же происходит в более длинноволновой области (500–800 нм). Диагностика на базе флуоресценции может быть реализована двумя способами:

- автофлуоресценция, когда возбуждаются непосредственно молекулы, входящие в состав ткани;
- экзогенная флуоресценция, когда нужные молекулы флуорофора специально вводятся в организм (перорально или внутривенно либо, в случаях поражения кожи, местно).

При автофлуоресценции флуоресцирующие молекулы представляют из себя структурные белки, такие как коллаген, эластин и различные метаболические соединения. Начавшееся заболевание изменяет концентрацию или пространственное распределение этих естественных флуорофоров. В случае введения лекарственного препарата диагностическая информация зависит от поглощения или сохранения экзогенных флуорофоров в аномальных тканях.

На рис. 15.9 приведена схема установки для флуоресцентной спектроскопии.

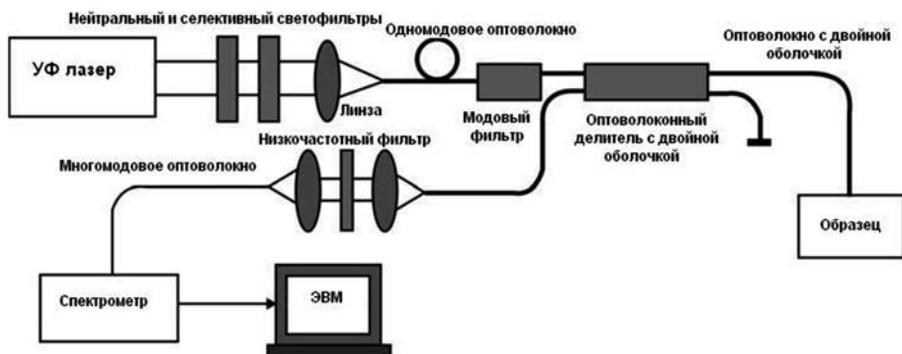


Рис. 15.9

Схема установки для флуоресцентной спектроскопии

Выходное излучение с требуемой длиной волны подаётся от источника через выходную оптику (обычно содержащую комбинацию фильтров и фокусирующей линзы) и одномодового волокна в делитель и далее в оптоволокно с двойной оболочкой и далее по его сердцевине к исследуемому образцу. Фильтры с нейтральной плотностью используются для регулировки интенсивности подвода лазерного излучения к цели. Фильтр, настроенный на длину волны лазерного излучения, используется, чтобы устранить фоновый шум. Внутренняя оболочка двойного оптоволокна используется для сбора флуоресцентного излучения и подачи его на делитель, откуда по многомодовому волокну излучение поступает в спектрометр. Низкочастотный фильтр используется для блокирования основной длины волны возбуждения упругого обратного рассеяния от образца.

Наиболее интересно совмещение флуоресцентной спектроскопии с визуализацией с помощью конфокальной микроскопии, позволяющей получать более точные представления о пространственном распределении флуорофора.

На рис. 15.10 приведены флуоресцентные микрофотографии клеток человека, полученные с помощью традиционной и конфокальной микроскопии.

Диагностическая методика, базирующаяся на явлении флуоресценции, хорошо подходит для исследований *in vivo* биохимических, физиологических и структурных профилей поверхностных слоев тканей, таких как оболочка полых органов, включая легкие, желудочно-кишечный тракт, мочевой пузырь, полость рта и шейку матки. Это важно, так как данные органы занимают ведущее место для ранней диагностики рака и предраковых изменений в тканях. В дополнение к использованию флуоресцентной спектроскопии для обнаружения рака на ранней стадии, это также используется, чтобы ассистировать во время хирургических операций для точного определения краёв опухоли. Другая возможная область применения – проведение внутрисосудистых операций, таких как ангиопластика, очистка заблокированных артерий.

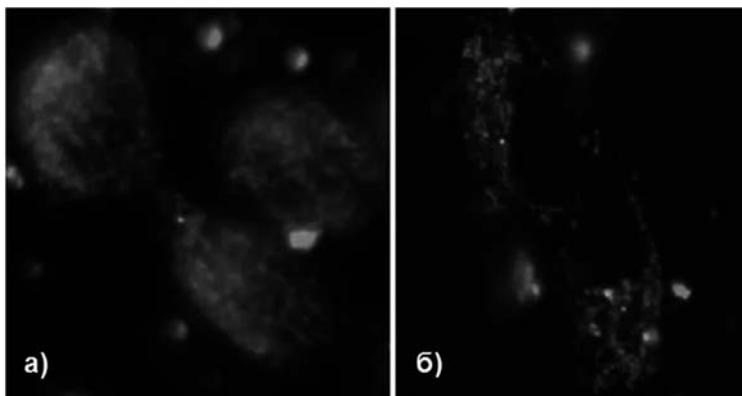


Рис. 15.10

Флуоресцентная визуализация клеток:

a – обычная микросъемка, *б* – конфокальная микроскопия

На рис. 15.10 приведена фотография лазерной электронно-спектральной установки ЛЭСА-01, позволяющей *in vivo* определять степень накопления фотосенсибилизатора в любых органах пациента, доступных для волоконно-оптического зонда.

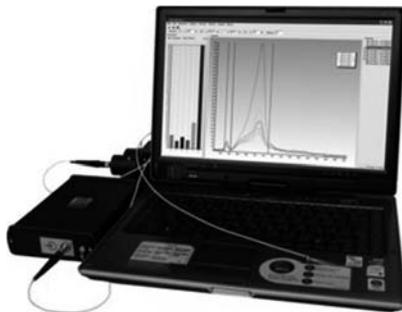


Рис. 15.11

Установка лазерная электронно-спектральная ЛЭСА-01 (ЗАО «Биоспек», РФ)

15.3.5.

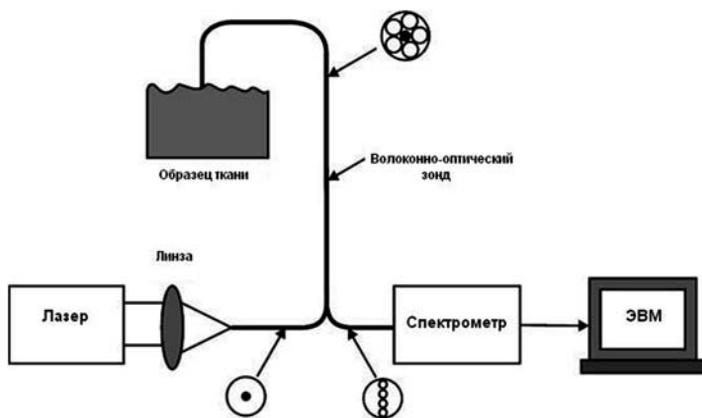
РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Методика спектроскопии комбинационного рассеяния света (рамановская спектроскопия) в медицинской диагностике зависит от рассеяния, происходящего в результате взаимодействия света и тканей. Это взаимодействие вызывает соответствующее изменение в колебательных и вращательных состояниях молекул. Различные механизмы рассеяния, включая упругое рассеяние и два типа неупругого рассеяния, упоминались в разд. 15.1 (подробнее см. в книге «Лазеры: устройство и действие», гл.11.3). Сигнал при стоксовом рассеянии относительно силь-

нее, чем при антистоксовом, даже несмотря на наличие фоновой флуоресценции (это явление как раз используют для диагностики). Рамановский сигнал (в случае комбинационного рассеяния) является характеристикой молекул и тем самым обеспечивает возможность их распознавания.

По сравнению с автофлуоресцентной спектроскопией, рamanовский сигнал очень слаб. Эта часто препятствует практическому применению спектроскопии комбинационного рассеяния в качестве метода визуализации для *in vivo* диагностики, но вполне удобно для изучения тканей и клеток.

На рис. 15.12 показана оптическая схема рamanовского спектрометра и фотография установки.



а



б

Рис. 15.12

Рамановский спектрометр:

а – конструктивная схема, б – спектрометр Raman-LS (НПП "Лазерные системы", РФ)

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 15

15.1. Лазерная диагностика или оптическая диагностика основаны на изменениях одной или более измеренных характеристик света в ультрафиолетовой, видимой или ближней инфракрасной полосах спектрального диапазона в процессе его прохождения сквозь ткань или отражения от ткани в результате взаимодействия фотонов с тканевыми структурами и молекулами.

15.2. Есть две основные категории методов диагностики – в естественных условиях (*in vivo*), и в пробирке (*in vitro*). Диагностика *in vivo* бывает либо неинвазивной, либо минимально инвазивной и выполняется на живом организме. Диагностика *in vitro* применяют вне живого организма в контролируемой среде.

15.3. Визуализация в белом свете является одним из видов диагностики, при котором диагноз основывается на спектральном и пространственном изучении изображения ткани в видимом диапазоне.

15.4. Спектроскопия диффузно-рассеянного света – неинвазивный оптический метод диагностики, который помогает количественно определить коэффициенты поглощения и рассеяния тканей. Механизмы упругого рассеяния и поглощения являются основой взаимодействия излучения и ткани. На них основано большинство диагностических методов. При взаимодействии света с тканями, происходит его обратное рассеяние, связанное с локальным изменением показателя преломления на границах раздела. На этом основана оптическая когерентная томография (ОКТ), которая позволяет получить изображения тканевых структур с высоким разрешением. Конфокальная микроскопия, так же как ОКТ, используется для получения изображений тканевых структур с высоким разрешением.

15.5. Флуоресцентная спектроскопия и визуализация основаны на флуоресценции определённых хромофоров в ткани при возбуждении короткими длинами волн, как правило, синего или ультрафиолетового диапазона.

15.6. Диагностика с помощью метода рамановской спектроскопии зависит от нелинейных оптических эффектов, сопровождающих взаимодействие излучения и ткани.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 15

15.1. На какие две широких категории разделяют методы диагностики? В чем их особенности?

15.2. Каковы особенности и преимущества оптической и лазерной диагностики?

15.3. В чем состоит метод визуализация в белом свете? Как его используют?

15.4. На чем основана оптическая когерентная томография (ОКТ)? Где ее используют?

15.5. В чем основная особенность схемы конфокальной визуализации? Как она используется?

15.6. Каковы принципы и схемы флуоресцентной спектроскопии и визуализации. Где они применяются?

15.7. На чем основана рамановская спектроскопия?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 15

15.1. Тучин В.В. Оптическая биомедицинская диагностика / Под ред. В.В. Тучина. В 2 т. – М.: Физматлит, 2007. 368 с. – 560 с.

15.2. Александров М.Т. Лазерная клиническая биофотометрия (теория, эксперимент, практика). – М., 2008. – 584 с.

15.3. Серебряков М.А. Лазерные технологии в медицине. – СПб., ГУИТМО, 2009. – 266 с.

15.4. Рубникович С.П., Фомин Н.А. Лазерно-оптические методы диагностики и терапии в стоматологии. – Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2010. – 361 с.

15.5. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови / Под ред. А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова: Руководство для врачей. – М.: «Медицина». – 2005 – 256 с.

ЛАЗЕРНЫЕ ЛЕЧЕБНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**16.1.****ФИЗИОТЕРАПИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНЫМ
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Низкоинтенсивная лазерная терапия – один из методов физиотерапии, лечебное применение излучения оптического диапазона, источником которого является лазер, особенностью такого светового потока является наличие одной фиксированной длины волны (*монохроматичный свет*). Мощность излучения физиотерапевтических лазеров, работающих в непрерывном или модулированном режимах, чаще всего находятся в пределах 1–100 мВт. Импульсная (пиковая) мощность импульсных лазеров находится в пределах 5–100 Вт при длительности световых импульсов 100–130 нс ($\sim 10^{-7}$ с), соответственно, в диапазоне частот от 80 Гц (минимальная частота) до 10000 Гц (максимальная частота для такой длительности импульсов) средняя мощность составит от 0.04 до 100 мВт.

Изучение влияния низкоинтенсивного лазерного излучения на различные биологические объекты началось практически сразу после появления самих лазеров, т. е. в начале 60-х годов XX века.

На современном этапе развития лазерной терапии в оптимизации методик лазерного воздействия важнейшую роль играет расширение диапазона используемых длин волн. Диодные лазеры находятся вне конкуренции, они имеют такие преимущества, как малые габариты и масса, выпускаются с различной длиной волны в очень широком диапазоне: от ультрафиолетовой (365 нм) до дальней инфракрасной (3000 нм) областей спектра. Также некоторые диодные лазеры (с длиной волны 904 и 635 нм) могут работать в импульсном режиме, что обеспечивает их лечебную эффективность и универсальность.

Механизмы терапевтического действия низкоинтенсивного лазерного излучения на биологические ткани обсуждаются в научной среде последние 30–35 лет.

Однако единой общей теории терапевтического действия лазерного излучения пока не существует.

Биологический эффект вызывает лишь излучение такой длины волны, при которой оно поглощается молекулами или фоторецепторами тех или иных структурных компонентов клеток. Поиски фоторецепторов и фотоакцепторов ведутся давно. Данные современной физиологии не подтверждают наличие на коже животных и человека специфических фоторецепторов. Однако некоторыми исследователями их наличие принимается возможным.

В отношении акцепторов электромагнитного излучения оптического диапазона мнения ученых разделились: одни считают, что существуют специфические акцепторы строго определенных длин волн излучения, другие считают, что поглощение излучения идет неспецифическими фотоакцепторами. Эти неспецифические фотоакцепторы могут быть разделены на две большие группы:

- биополимеры (белки, ферменты, биологические мембраны, пигменты и др.);
- биологические жидкости (лимфа, кровь, плазма, внутриклеточная вода).

Кожа человека, через которую обычно действует лазерное излучение, по-разному пропускает электромагнитные волны светового диапазона. В диапазоне от 0.6 до 1.2 мкм наблюдается так называемая оптическая прозрачность биологических тканей, в ближней ИК-области свет может проникать фактически на несколько сантиметров в глубину ткани.

В механизме лечебного действия можно рассмотреть несколько стадий. Первая стадия – поглощение лазерного излучения. На этой стадии происходящие процессы могут быть описаны как физические. При поглощении веществом кванта света один из электронов молекулы переходит на верхний энергетический уровень, при этом молекула переходит в возбужденное состояние. Дальнейшее преобразование энергии может происходить как ряд физико-химических процессов в организме.

Несмотря на то, что показания к применению низкоинтенсивной лазерной терапии определены еще далеко не окончательно, а механизмы, лежащие в основе терапевтических эффектов, остаются неясными, накопленные данные свидетельствуют о необходимости дальнейшего развития экспериментальных и клинических исследований в этом направлении.

В клинической практике используются следующие способы доставки излучения к тканям организма при проведении сеансов лазеротерапии:

- экстракорпоральное или внутривенное лазерное воздействие на кровь;
- подведение излучения к патологическому очагу с помощью эндоскопа;
- чрезкожное воздействие на болевую точку или проекцию органа;
- воздействие на рефлекторные точки акупунктуры.

На рис. 16.1 приведены фотографии терапевтических лазерных приборов последнего поколения.

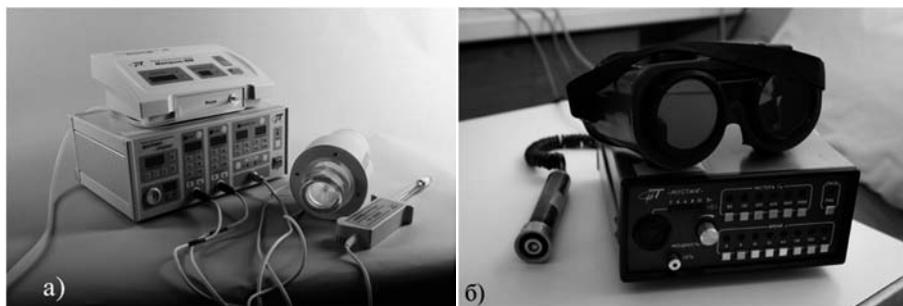


Рис. 16.1

Лазерные физиотерапевтические аппараты: а – «Матрикс-уролог» (ЗАО «НПО Космического приборостроения»), б – «Мустанг» (компания «Техника-Про»)

16.2.

ФОТОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕРАПИЯ

Фотодинамическая терапия (ФДТ) включает использование препаратов фотосенсибилизатора, который, при активации светом соответствующей длины волны и интенсивности, производит фотопродукт, разрушающий больные клетки и ткани в присутствии кислорода. Препараты, как правило, вводят внутривенно. В случае кожных заболеваний используют препарат местного применения. Фотосенсибилизатор накапливается в ткани-мишени в течение определенного периода времени, который может варьироваться от нескольких минут до нескольких дней. Затем, лазерное излучение направляется на ткань-мишень и приводит к активации фотосенсибилизатора, который после образования фотопродуктов разрушает целевые клетки или ткани. Клинически одобренными фотосенсибилизаторами являются препараты, которые в настоящее время используются для лечения крупных опухолей, опухолей полых органов, предраковых состояний ткани, дегенераций желтого пятна и некоторых видов повреждения кожи. Эти препараты включают фотофрин, аминолевулиновую кислоту и протопорфирина. Для большинства фотосенсибилизаторов агентов в клинической практике или находящихся в разработке, активным фотопродуктом является молекулярный кислород в возбужденном синглетном состоянии ($^1\text{O}_2$).

16.2.1.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФДТ

Эффективность ФДТ зависит от многих факторов, в том числе свойств фотосенсибилизатора, характеристик источника излучения механизма его доставки, фотобиологического ответа клеток и тканей, способов оптического мониторинга лечения. Что касается источника, к важным моментам относятся интенсивность

излучения и его длина волны, а также пространственный профиль. В то время как интенсивность и длина волны должны вызвать эффективную активацию фотосенсибилизатора за приемлемое время обработки, пространственный профиль должен соответствовать геометрии ткани. Различные типы источников света, которые используются в настоящее время, включают в себя лампы высокой яркости, оснащённые соответствующими фильтрами, светодиодные матрицы, непрерывные и импульсные лазеры с высокой частотой повторения. В этом ряду лазеры имеют ряд преимуществ, поскольку их излучение может быть эффективно доставлено волоконно-оптическим кабелем. Волоконно-оптические средства доставки значительно облегчают ввод излучения в организм. Для этого используют либо эндоскоп, либо прямой метод ввода оптоволоконного кабеля в ткань при помощи иглы. Диапазон длин волн лазерного выходного излучения составляет 630–800 нм. Уровень выходной мощности 1–5 Вт.

Важным требованием к системе доставки является её эффективность транспортировки света в ткани-мишени и его распределение в соответствии с 2D- или 3D-геометрией ткани. Многомодовое волокно, как правило, используется с простым объективом, закрепленным на оконечности волокна для достижения желаемого пространственного профиля. Сканирование лазерного луча используют в случае ФДТ сетчатки.

Еще одним важным требованием является мониторинг процесса ФДТ.

16.2.2. ПРИМЕНЕНИЕ ФДТ

Фотодинамическая терапия в основном использует фотохимический эффект и находит многочисленные применения в онкологии. Например, в лечении небольших опухолей в стенках полых органов, предраковых изменений в полых органах, локализованных опухолей в твердых органах, опухолей кожи и, как вспомогательное средство, при хирургических операциях по ликвидации остаточных проявлений.

ФДТ – это метод лечения локализованных опухолей при помощи предварительного введения фотосенсибилизатора в присутствии кислорода. Одной из ключевых особенностей этого лечения является то, что соединительные элементы ткани, такие как коллаген и эластин, значительно не влияют на процесс, что гарантирует механическую целостность полого органа. Кроме того, подвергшиеся процедуре ФДТ ткани хорошо регенерируют и, соответственно, оставляют меньше рубцов. ФДТ считается локальной процедурой и может считаться безопасной, несмотря на то, что в случае внутривенного введения фотосенсибилизатор достигает каждой части тела. Однако по отдельности ни фотосенсибилизатор, ни свет не производят никакого эффекта. Это позволяет определить границы ткани, которая будет подвергнута лечению, с надлежащей степенью селективности.

В настоящее время ФДТ используется для лечения опухолей полых органов, в том числе областей предраковых изменений, и опухолей в твердых органах, включая опухоли кожи. ФДТ особенно подходит для лечения локализованного рака полых органов, который не распространяется за стенки органа. Например, локализованный рак полости рта можно эффективно лечить при помощи ФДТ с порфиринером натрия.

ФДТ подходит пациентам, которые в силу каких-то причин не могут быть подвергнуты хирургическому вмешательству. Поскольку нормальные кости обладают высокой устойчивостью к ФДТ, лечение рака полости рта, который вторгся в верхнюю или нижнюю челюсть, также возможно без ущерба для нормальной кости.

ФДТ также является альтернативой хирургической операции для пациентов, страдающих от локализованных онкологических заболеваний желудочно-кишечного тракта и основных дыхательных путей, в случаях, если они признаны неоперабельными.

Поверхностные опухоли кожи, такие как базальная карцинома, можно эффективно лечить с помощью фотосенсибилизатора ALA (альфа-аминопропионовая кислота). ALA является веществом естественного происхождения, которое приводит к генерации фотосенсибилизатора протопорфирина. Он преобразуется в «гем» – небелковую составляющую гемоглобина, являющуюся важным веществом в клеточных ядрах. ALA может быть введена перорально. Она производит клинически полезные уровни в течение 3–6 часов и выводится из организма за 24 часа.

Хотя ФДТ более предназначена для лечения полых органов и рака кожи, также она может быть использована для лечения поражений твердых органов. В связи с тем, что соединительные ткани не оказывают значительного влияния на ФДТ, данный вид терапии может применяться для лечения некоторых распространенных видов рака, таких как рак легких, поджелудочной железы и простаты. Гибкий эндоскоп может быть использован для доставки излучения в случае небольших опухолей широких дыхательных путей. Где дыхательные пути слишком малы для эндоскопического доступа, применяется лечение интерстициальным ФДТ. В этом случае волокно вводится через кожу до пораженного участка, с использованием телеметрии.

Опухоли простаты и поджелудочной железы обрабатываются с помощью фотосенсибилизатора. Также ФДТ используют в качестве дополнительной терапии при обычной хирургии, чтобы уничтожить небольшие метастазы, которые могут быть труднодоступными для хирурга или те, которые связаны с жизненно важными органами и не могут быть удалены.

Рисунки 16.2 и 16.3 иллюстрируют эффективность применения фотодинамической терапии при различных видах рака.

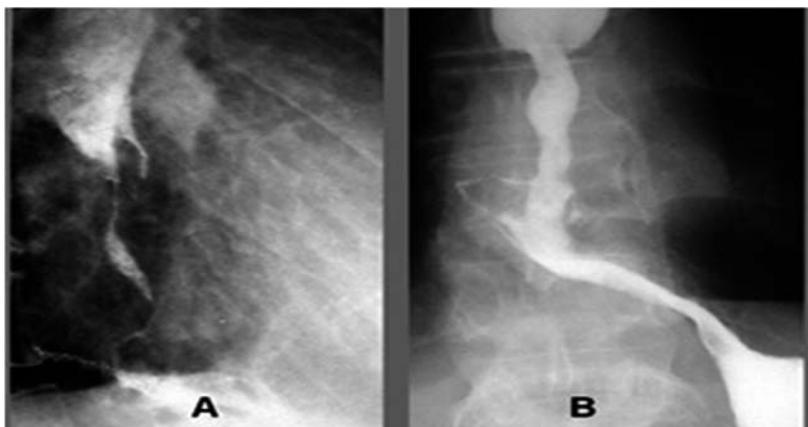


Рис. 16.2

ФДТ рецидива рака пищевода: (А) – до лечения нитевидный просвет пищевода протяженность стеноза 12 см. Больной не может принимать даже жидкую пищу. (В) – после курса лечения методом ФДТ. Восстановление просвета пищевода, нормализация пассажа пищи

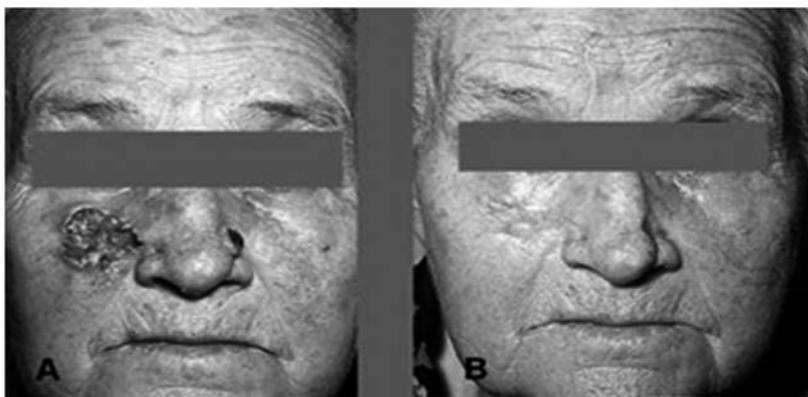


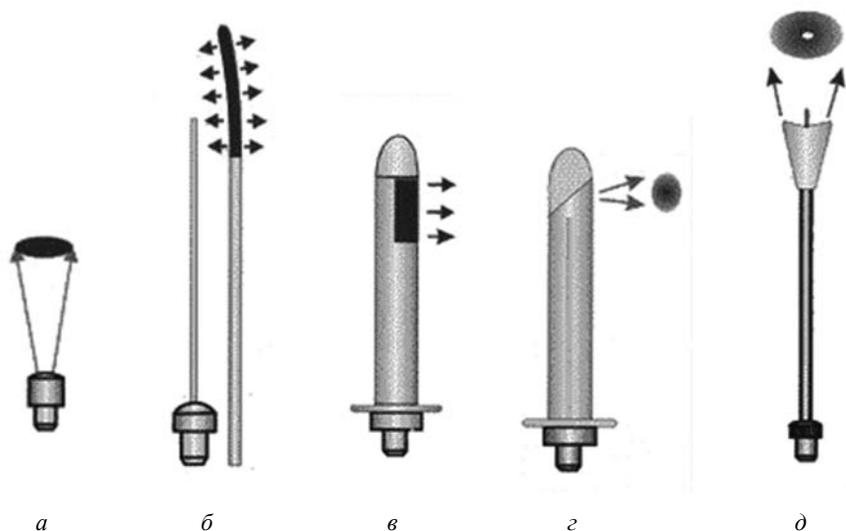
Рис. 16.3

Лечение местно распространенного базально-клеточной рака кожи лица методом ФДТ:
 (А) – до лечения. Обширная опухоль кожи щеки с изъязвлением.
 (В) – после курса лечения методом ФДТ

16.2.3.

ИНСТРУМЕНТЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

Существует широкий ассортимент световодных насадок для различных вариантов проведения фотодинамической терапии (рис. 16.4). Применение насадок различного типа позволяет проводить наружное и внутритриполостное облучение зараженных тканей. Присоединение насадок к источнику лазерного излучения производится с помощью оптоволоконного кабеля.

**Рис. 16.4**

Оптические насадки для наружной и внутриполостной фотодинамической терапии: *a* – световодная насадка для наружного облучения тканей; *б* – световодная насадка ФУ-4 с гибкими сменными стерильными наконечниками ФСУ-4 диффузионного типа: длина 150 мм, диаметр 2 мм, выход излучения - цилиндрический, длина 9 мм; *в* – световодная насадка ФР-2 для внутриполостного облучения: диаметр 14 мм, длина 105 мм, выход излучения - полуцилиндрический, длина 20 мм; *г* – световодная насадка ФР-1 для внутриполостного облучения: диаметр 14 мм, длина 105 мм, выход излучения – боковой под углом 90° ; *д* – световодная насадка ФГ-1 для внутриполостного облучения: диаметр 20 мм, длина 160 мм, выход излучения – прямой рассеянный

16.3.

ОБЩАЯ И СОСУДИСТАЯ ХИРУРГИЯ

16.3.1.

ХИРУРГИЯ ЖКТ, ОСТАНОВКА КРОВОТЕЧЕНИЙ

Фототермические эффекты, вызванные поглощением тепловой энергии, широко используют в хирургии с целью лечения доброкачественных и злокачественных опухолей. Конечный эффект воздействия зависит от количества тепловой энергии, доставляемой в ткани-мишени, продолжительности времени воздействия и объема ткани, в котором эта энергия поглощается. В дополнение к лечению опухолей, еще одним распространенным применением фототермических эффектов является профилактика кровотечения краёв хирургических разрезов.

Эффективность теплового воздействия зависит от величины тепловой энергии, доставляемой в ткани-мишени, времени, в течение которого она поступает, и объема ткани, в которой энергия поглощается.

Тепловое воздействие находит широкое применение в общей хирургии для бескровного рассечения тканей, лечения язвенных кровотечений и рака желудочно-кишечного тракта, легких и пищевода. Оно также используется для лечения поражений наружных половых органов. Для этого используют CO₂-лазеры, Nd:YAG-лазеры и диодные лазеры, излучающие на 10,6 мкм, 1,064 мкм и 630–900 нм, соответственно. Nd:YAG-лазеры и диодные лазеры используются в сочетании с волоконно-оптическими средствами доставки излучения в зону воздействия.

Тепловая коагуляция наиболее широко используется для эндоскопической остановки кровотечения. Возможны два варианта реализации – контактный и бесконтактный. В контактном варианте используют тепловой зонд или электрокоагуляцию. Бесконтактный вариант основан на применении лазера.

Лазерно-индуцированная коагуляция основана на поглощении лазерного излучения тканевыми белками, что приводит к быстрому нагреву. Лазер весьма эффективен для прямой коагуляции артерий диаметром 0,25 мм, однако становится менее эффективным для артерий большего диаметра. Лазерное излучение фокусируется на кровоточащей области, чтобы вызвать быстрый нагрев тканей, что приводит к свертыванию крови и некрозу тканей.

16.3.2.

ЛАЗЕРНОЕ ЛЕЧЕНИЕ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Лазерная эндоскопия является простой процедурой, помогающей избавиться больного от излишней боли и страданий. Для этого используют Nd:YAG-лазер. Эндоскопический Nd:YAG-лазер используется для образования каналов при раке пищевода в комках опухолей, чтобы уменьшить их массу особенно в труднодоступных местах. Также он может быть использован для испарения выступающих частей опухоли или коагуляции мелких узелков. Глубокое проникновение лазерного излучения предотвращает кровотечение из прилежащих тканей. Лучевая терапия может быть использована для продления паллиативного периода.

Nd:YAG лазерная терапия играет полезную роль для продления паллиативного периода у пациентов, страдающих от рака легких с опухолями, затрагивающими основные дыхательные пути, особенно когда хирургическое вмешательство невозможно. В случае лазерной терапии рака легких гибкий эндоскоп вводится через жесткий эндоскоп. Как и в случае рака пищевода, лучевая терапия при раке лёгких может быть использована в качестве послеоперационного наблюдения за реканализацией крупных дыхательных путей и продления паллиативного периода.

CO₂- и Nd:YAG-лазеры также эффективно используются для лечения пораженных наружных половых органов, таких как бородавки и поверхностный рак полового члена. Эндоскопия также используется для лечения опухолей мочевого пузыря. Как лазерная коагуляция, электрокоагуляция также применяется при заболеваниях такого рода, хотя лазерная терапия обладает более высокой точностью и лучшим контролем.

16.3.3. ЭНДОВАЗАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ КОАГУЛЯЦИЯ (ЭВЛК)

Альтернативой традиционным хирургическим методам и самым современным и эффективным способом лечения варикозного расширения вен является технология с использованием высокоэнергетических лазеров. Операция ЭВЛК настолько проста для врача и безболезненна для пациента, что часто в литературе ее относят к терапевтическим методам, поскольку в большинстве случаев с помощью лазера удается излечить варикозную болезнь без разрезов.

Суть метода лазерной терапии варикозного расширения вен заключается в том, что лазер оказывает на стенку сосуда термическое воздействие. Происходит прижигание стенки вены, асептическое воспаление, в результате чего просвет вены легко зарастает.

Использование радиального световода обеспечивает равномерное «запаивание» вены любого диаметра без каких-либо побочных эффектов. На конце световода имеется рассеивающая лазерную энергию микролинза, укрытая колпачком. Лазерная энергия на выходе из световода рассеивается кольцом вокруг световода на 360 градусов. Это обеспечивает не точечное воздействие на вену, как при использовании обычного торцевого волокна, а равномерное распределение лазерной энергии по стенкам обрабатываемой вены (рис. 16.5, а).

Лечение варикоза при такой технологии становится упрощенной процедурой, результат которой достигается при небольших уровнях мощности излучения, меньшими оказываются болевой синдром и вероятность побочных явлений, связанных с перфорацией стенки вены и ожогами прилежащих тканей.

Сам световод вводится в вену под контролем доплерографии. По этому световоду и подаётся лазерное излучение. Лазерная коагуляция хорошо переносится и может выполняться на обеих ногах одновременно. Лазер позволяет устранять патологические венозные сбросы без операции. Он эффективней склеротерапии для лечения венозных трофических язв.

Одними из лучших для реализации технологии ЭВЛК являются лазерные двухдлинноволновые скальпели ЛСП производимые компанией "ИРЭ-Полус" (РФ), использующие излучение с длиной волны 1.56 мкм и 0.97 мкм хорошо поглощаемое водой, содержащейся в крови и стенке вены (рис. 16.5, б).

**Рис. 16.5**

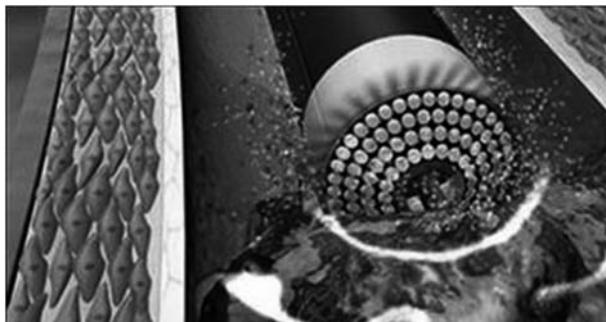
Эндоваскулярная лазерная коагуляция (ЭВЛК):
настройка лазерного скальпеля (а); ЛСП-0.97/30 - 1.56/15"ИРЭ-Полус" (б)

16.3.4. ЛАЗЕРНАЯ АНГИОПЛАСТИКА

Лазерная ангиопластика – это процедура, посредством которой закупоренная артерия открывается при помощи лазерной энергии, доставленной посредством оптоволоконного зонда. Лазерная ангиопластика предлагает альтернативу чистки закупоренных артерий с необычайной точностью.

В отличие от традиционного лечения, где закупорившие артерию бляшки либо прижимаются к стенке сосуда, либо перемещаются из-за воздушного баллона, лазерная ангиопластика полностью удаляет налет. Это позволяет проводить успешное лечение ранее неизлечимых поражений, а также значительно снижает частоту рестеноза т.е. повторного сужения сосуда, возникшее в том месте, где ранее хирургическим путем стеноз был устранен. Во время процедуры лазерной ангиопластики оптоволоконный катетер проводится через всю длину коронарного кровообращения и испаряет все атеросклеротические бляшки вдоль артериальной стенки.

Лазерная ангиопластика похожа на баллонную ангиопластику, однако воздушный баллон на конце катетера заменен на лазерный наконечник. Гибкий катетер вводится в артерию в паховой области. Направление катетера контролируется при помощи рентгенографии. Катетер проходит в заблокированную коронарную артерию. Лазерное излучение попадает в катетер через несколько волоконно-оптических кабелей. Бляшки испаряются при короткоимпульсном воздействии излучения эксимерного лазера. Использование ультрафиолетового излучения уменьшает риск повреждения окружающих тканей. На рис. 16.б показано использование лазера в ангиопластике.

**Рис.16.6**

Разрушение закупорки сосуда с помощью эксимерного ArF-лазера

У некоторых больных с ишемической болезнью сердца после проведения ангиопластики спустя несколько лет могут возникнуть новые сужения коронарных сосудов. Повторная ангиопластика может быть связана с несколько повышенным риском и в таких случаях помогает прямое воздействие лазером на сердечную мышцу (рис. 16.7). В результате такой операции, получившей название трансмиокардиальной лазерной ревазуляризации (ТМРЛ), при помощи эксимерного ХеСl-лазера импульсами излучения с пиковой мощностью до 1 кВт, синхронизированными с сердечным ритмом, в сердце создают 15–40 трансмиокардиальных каналов диаметром 1 мм, вокруг которых впоследствии формируется микрососудистая сеть.

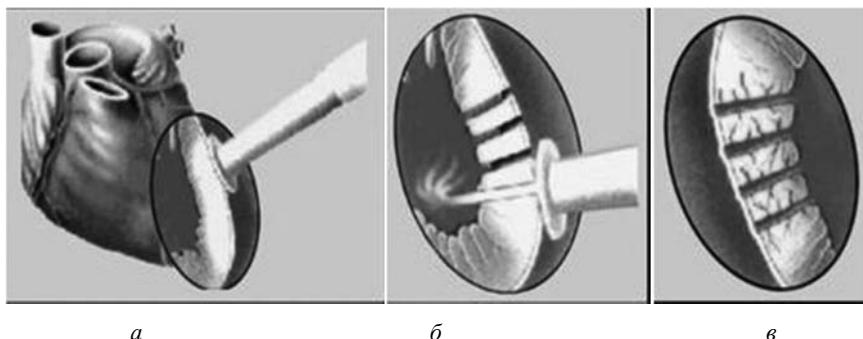
*а**б**в***Рис. 16.7**

Схема трансмиокардиальной лазерной ревазуляризации (ТМРЛ):
а – операционное поле; *б* – создание каналов; *в* – после операции

Точный механизм позитивного эффекта трансмиокардиальной лазерной ревазуляризации еще не до конца изучен, но у большинства пациентов проходит боль в сердце и возрастает терпимость к физической нагрузке. В результате после операции улучшается качество жизни.

16.4. ДЕРМАТОЛОГИЯ

Методы лазерной хирургии применяются для манипуляций на коже намного чаще, чем на любых других тканях. Это объясняется, во-первых, исключительным разнообразием и распространенностью кожной патологии и различных косметических дефектов, а во-вторых, относительной простотой выполнения лазерных процедур, что связано с поверхностным расположением объектов, требующих лечения.

Фототермический механизм взаимодействия света и тканей особенно важен в дерматологии. Большинство клинических процедур в дерматологии основаны на фототермолизе. При соответствующем выборе длины волны лазерного излучения, длительности импульса и мощности фототермолиз позволяет выборочно разрушать биологические ткани. Это используется при лечении поражений сосудов кожи (флебология), удалении пигментных образований и татуировок, удалении нежелательных волос.

Когда лазерная энергия поглощается тканью, это вызывает повышение температуры. В свою очередь, нагрев ткани вызывает изменения в молекулярной структуре, в частности в белках, ДНК и РНК. В дальнейшем структурные изменения могут привести к функциональным – денатурации ткани или грубому структурному нарушению, которое называют коагуляцией. Коагуляция вызывает некроз и испарение, что дальше ведет к абляции и обугливанию тканей. Плотность энергии лазерного излучения, длина волны и продолжительность воздействия являются ключевыми параметрами, которые определяют фототермический эффект, полученный в ткани. Он в свою очередь формирует основу селективного фототермолиза.

Селективный фототермолиз позволяет использовать соответствующую длину волны, продолжительность и плотность энергии для точного термического воздействия на нужные биологические структуры без ущерба для соседних тканей. Соответствующий выбор длительности импульса может быть использован для ограничения уровня тепловой энергии в целевой ткани и поддержания ее на уровне, меньшем, чем тепловая постоянная времени целевой ткани. Именно эта точность в значительной степени предопределила широкое использование лазеров в дерматологии. Лазерная хирургия в дерматологии включает лазерное лечение кожных сосудистых поражений, таких как винные пятна, лечение пигментных поражений, удаление татуировок и волос.

16.4.1. «ВИННОЕ» ПЯТНО

«Винное» пятно – это сосудистый невус – кожное проявление, обычно на лице, напоминающее своим цветом рубиново-красное вино. Винное пятно является одним из видов сосудистых патологий вследствие ненормальной агрегации капилляров.

Лечение винных пятен с помощью лазера основано на принципе селективного фототермолиза и направлено на сокращение количества и размера эритроцитов в капиллярах, что приводит к уменьшению пятна. Лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 577$ нм селективно поглощается гемоглобином, в отличие от других тканевых структур. Излучение проникает в кожные капилляры. В зависимости от длительности лазерного импульса и времени тепловой релаксации, может возникнуть неселективное термическое повреждение соединительной ткани, приводящее к образованию рубцов. Для достижения баланса необходимо использовать достаточно короткую длительность импульса, чтобы обеспечить селективное поглощение, но в то же время, импульс должен быть достаточно длительным для того, чтобы вызвать постоянное повреждение кровеносных сосудов с последующим осветлением пятна.

В случае пациентов с темным цветом кожи необходимо использовать более высокую мощность излучения, поскольку его часть поглощается пигментированным эпидермисом, и в результате меньшая часть энергии достигает кровеносных сосудов, вызывая рост нежелательных воспалительных изменений. Этот недостаток частично устраняется путем интенсивного охлаждения эпидермиса. На рис. 16.8 показана фотографии девочки до и после процедуры лазерного воздействия на винное пятно на лице. Как видно из фотографий, пятно почти исчезло, что говорит об эффективности лечения.



Рис. 16.8
Лазерное лечение винного пятна

16.4.2. ПИГМЕНТНЫЕ ПЯТНА И ТАТУИРОВКИ

Использование лазеров для лечения пигментных поражений и удаления татуировок является еще одним распространенным применением лазерного лечения в дерматологии. В случае пигментных поражений целевой хромофор – меланин, присутствует в клетках в форме меланосомы, а в татуировках целью являются внутрикожные, внутриклеточные нерастворимые частицы краски.

Процедура лечения также основана на принципе селективного фототермолиза. Длительность лазерного импульса выбирается так, чтобы быть меньше, чем тепловое время релаксации меланосом, которое находится в диапазоне от 100 нс до 1 мкс.

Хотя меланосомы сильно поглощают излучение в широком спектральном диапазоне 200–1200 нм, рабочую длину волны лазера выбирают в более длинноволновой части спектра (630–1100 нм). Это уменьшает поглощение такими хромофорами как гемоглобин в видимом спектре и межклеточной жидкостью в инфракрасном. Кроме того, длинноволновое излучение глубже проникает в ткани. Длительность импульса для селективного фототермолиза меланосом выбирают меньше 1 мкс. Повреждение возникает как за счет тепловых эффектов, так и за счет ударных волн вследствие быстрого термического расширения ткани. Для лечения пигментных образований и удаления татуировок используют Nd:YAG-лазеры. На рис. 16.9 показаны фотографии, демонстрирующие эффективность применения лазера для удаления татуировок. Тем не менее, различные чернила татуировки могут поглощать лазерную энергию по-разному, из-за чего лазер не всегда может полностью удалить татуировку.



Рис. 16.9
Удаление татуировки с помощью лазера

16.4.3. ЛАЗЕРНАЯ ЭПИЛЯЦИЯ

Лазерная эпиляция, или удаление волос при помощи лазера, основано на принципе селективного фототермолиза, при котором целевым хромофором является меланин, присутствующий в волосяных фолликулах. Поскольку подлежащие удалению фолликулы расположены на 2–7 мм ниже поверхности кожи, для их удаления используют длины волн красной и инфракрасной части спектра.

Этому критерию соответствуют диодные лазеры с длиной волны около 800 нм и Nd:YAG-лазеры, излучающие на 1064 нм. Поскольку время тепловой релаксации волосяного фолликула находится в диапазоне от нескольких миллисекунд до 100 мс, длительность импульса обычно выбирают в диапазоне от 1 до 50 мс. Важным фактором при селективном фототермолизе волосяных фолликулов является то, что эпидермис также содержит меланин.

Одним из подходов к лечению может быть использование разницы содержания меланина – высокого в волосяных фолликулах тёмных волос и низкого в бледной коже. Другой подход состоит в соответствующем выборе длительности импульса с учётом разницы времён тепловой релаксации – у волосяных фолликулов до 100 мс, эпидермиса до 50 мс. На рис. 16.10 проиллюстрирована эффективность лазерного лечения для удаления нежелательных волос.

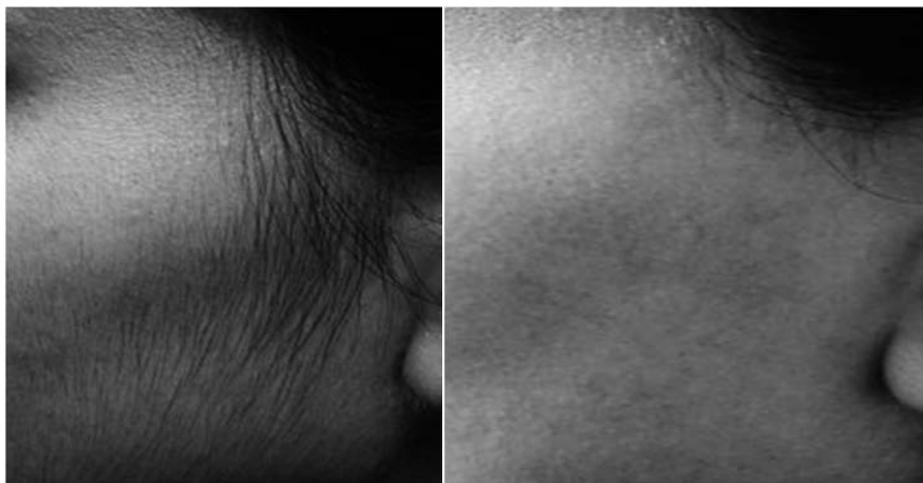


Рис.16.10

Удаление нежелательных волос с помощью лазера

16.4.4. ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ДЕРМАТОЛОГИИ

В дерматологии применяют CO₂-, Nd:YAG-, Er:YAG-лазеры на александрите, диодные и аргоновые лазеры.

Излучение CO₂-лазера (10.6 мкм) хорошо поглощается водой, и поэтому оно может использоваться как в сфокусированном режиме, так и в расфокусированном. Сфокусированный режим используется для лечения шрамов от угревой сыпи и ветряной оспы и морщин, в том числе вызванных солнечным светом. Расфокусированный режим предназначен для удаления папиллом, бородавчатого дерматоза, бородавок, синингоцистом, родинок, себорейного кератоза, угрей и сальной гиперплазии. Примером современного хирургического CO₂-лазера может служить «ЛМед-1» – компактный настольный лазерный аппарат, предназначенный для бескровного рассечения, коагуляции, вапоризации тканей (рис. 16.11, а).

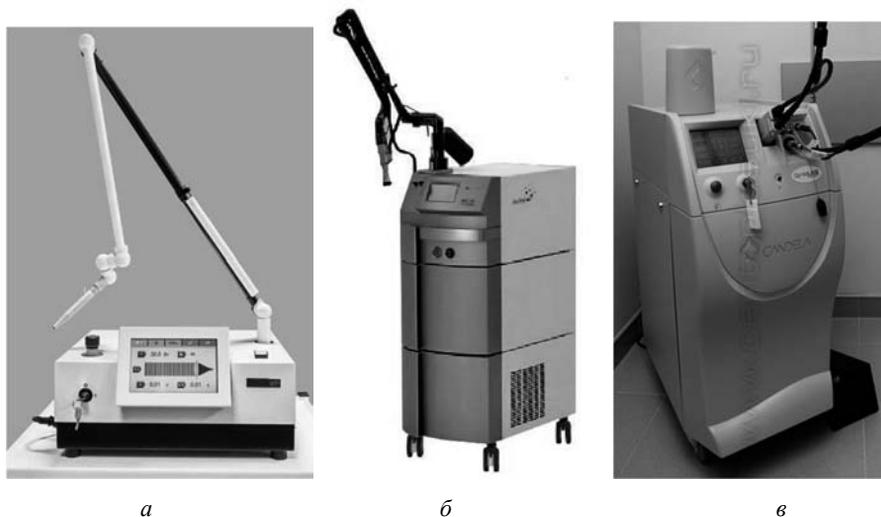


Рис. 16.11

а – CO₂ лазер «ЛМед-1» (ООО «Русский инженерный клуб», РФ);
б – MCL 30 – эрбиевый лазер последнего поколения (Asclepion, Германия);
в – александритовый лазер CANDELA (CandelaGentleLASE, США)

Nd:YAG-лазеры с модулируемой добротностью используются для удаления синих и глубоких татуировок, кожных пигментных образований. Nd:YAG-лазеры с удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм) используются для удаления поверхностных следов от ожогов, лентиги, веснушек и красных (оранжевых) татуировок.

Er:YAG-лазеры, излучающие на 2940 нм, используются для лечения морщин, шрамов от угревой сыпи и предраковых поражений (рис. 16.11, б). Лазеры

на александрите с рабочей длиной волны 755 нм используются для удаления татуировок и доброкачественных новообразований. Длинноимпульсные александритовые лазеры используются для удаления волос (рис. 16.11, в).

Диодные лазеры, как правило, предпочтительны для удаления коричневых и черных волос. Диодные GaAlAs-лазеры, излучающие на 810 нм, очень эффективны на темной коже. В настоящее время появляются диодные лазеры, излучающие в других спектральных диапазонах (рис. 16.12).

Аргонные лазеры с длиной волны 488 и 514 нм из-за хорошего поглощения излучения такими пигментами, как гемоглобин и меланин, используют для лечения артериовенозных пороков развития, гемангиом, мелких вен, паутинных невов и розовых угрей.

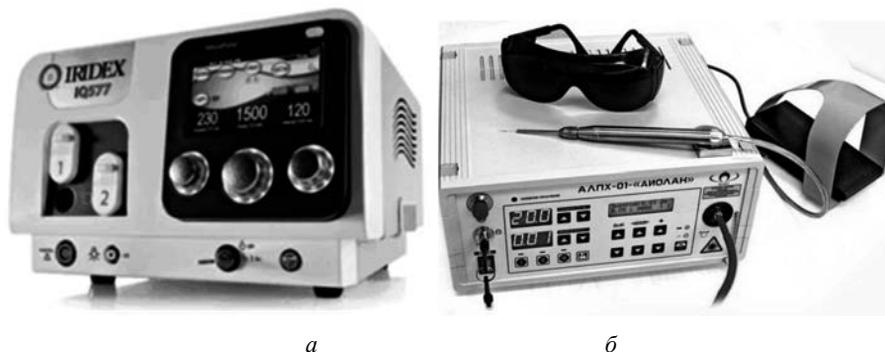


Рис. 16.12

Диодные лазеры: *а* – IQ 577 с длиной волны излучения 577 нм (Iridex, США);
б – АЛПХ-01 с длиной волны излучения 810, 940, 980 нм (НПП ВОЛО, РФ)

16.5.

ОФТАЛЬМОЛОГИЯ

Наиболее распространенное применение лазеров в медицине это, безусловно, офтальмология, в которой они используются для лечения различных глазных заболеваний. Когерентность лазерного излучения позволяет доставить его в определенное место без отрицательного влияния на смежные области. А тот факт, что многие среды глаза являются прозрачными для света видимой части спектра, делает лазер отличным инструментом для офтальмолога.

Некоторые из наиболее широко используемых клинических процедур в офтальмологии, не имеющих никаких других альтернатив, включают фотокоагуляцию сетчатки, фотоабляцию и фотодеструкцию мембран после хирургического

удаления катаракты и фотодинамическую терапию при возрастной макулярной дегенерации. Фоторефрактивная лазерная хирургия роговицы глаза используется для коррекции аномалий рефракции, таких как близорукость, дальнозоркость и астигматизм, и является еще одной клинической процедурой, регулярно выполняемой в офтальмологических центрах.

В *фотокоагуляции*, используемой преимущественно для лечения опухолей, лазерное излучение видимой зелёной длины волны селективно поглощается гемоглобином, пигментом в эритроцитах, для остановки кровотечения из поврежденных сосудов. Фотокоагуляция находит разнообразные применения в офтальмологии для лечения отслоения сетчатки, уничтожения аномальных кровеносных сосудов в сетчатке и в лечении опухолей.

Фотоабляция – испарение ткани лазерным УФ-излучением. Фотоабляция используется для LASIK (Laser-Assisted in Situ Keratomileusis) – «лазерный кератомилёз» – профилирующей хирургии глаза для коррекции зрения, при которой лазер изменяет форму поверхности роговицы, из которой лазер удаляет ткань путём испарения вследствие передачи энергии в целевую область. Профилирование роговицы необходимо для коррекции преломляющей способности глаза.

Фотодеструкция – это разрушение тканей с помощью индуцированной лазерным излучением быстрой ионизации молекул. Применяется для постоперационного удаления плёнок при хирургии катаракты.

16.5.1. РЕФРАКЦИОННАЯ ХИРУРГИЯ

Рефракционные дефекты в глазах человека вызывают ухудшение зрения, называемое близорукостью, дальнозоркостью или астигматизмом. Свет, который попадает в нормальный глаз, фокусируется на сетчатке для формирования изображения, которое передается в мозг. В случае глаза, страдающего от рефракционных дефектов, четкое изображение на сетчатке не формируется, что приводит к ухудшению зрения.

Есть три типа дефектов рефракции: близорукость, дальнозоркость и астигматизм. При близорукости глаза изображение формируется перед сетчаткой, как показано на рис. 16.13, *а*, в результате чего видение удаленных предметов размыто. В случае дальнозоркости изображение формируется за сетчаткой, как показано на рис. 16.13, *б*, вызывая размытость зрения вблизи и со временем также и дальнего видения. В случае астигматизма, как показано на рис. 16.13, *в*, видение как близких, так и дальних изображений искажено. Для нормального зрения изображение должно быть сформировано на сетчатке, а это может быть достигнуто при помощи соответствующих очков, контактных линз или рефракционной хирургии.

Рефракционная хирургия – это наиболее распространенное использование лазеров в офтальмологии. Основной целью лечения является достижение правиль-

ного отношения между длиной глазного яблока и преломляющей силой его оптических сред (рис. 16.14). Для рефракционного хирургического вмешательства обычно используется ArF-эксимерный лазер ($\lambda = 193$ нм). Импульсное лазерное излучение с длительностью импульса 10–20 нс проникает в роговицу на глубину 1 мкм, что приводит к фотоабляции ткани.

На рис. 16.15 приведена фотография эксимер-лазерной офтальмологической установки для проведения операций по коррекции всех видов аномалий рефракции: миопии, гиперметропии, астигматизма.

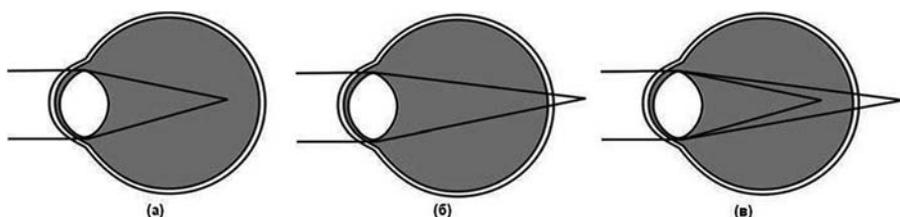


Рис.16.13

Дефекты рефракции:

a – миопия (близорукость), *б* – пресбиопия (дальнозоркость), *в* – астигматизм

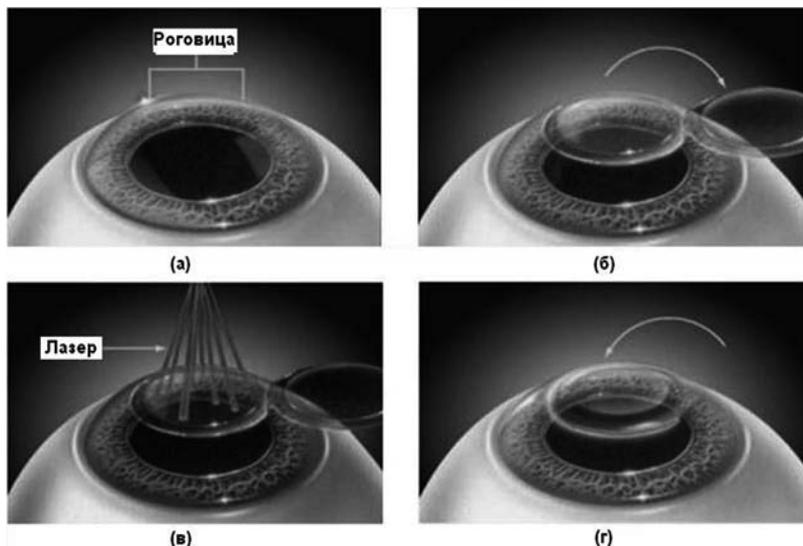


Рис.16.14

Этапы рефракционной хирургии методом LASIK:
a – глаз до процедуры, *б* – разрез лоскута роговицы,
в – воздействие лазером, *г* – установка лоскута роговицы

**Рис 16.15**

Эксимер-лазерная офтальмологическая установка МикроСкан (ООО «Оптосистемы»)

16.5.2. ЛЕЧЕНИЕ ГЛАУКОМЫ

Глаукома является болезнью глаз, при которой повреждается зрительный нерв. Причиной глаукомы является повышение внутриглазного давления, которое вызывает атрофию зрительного нерва и приводит к снижению поля зрения. При неконтролируемом развитии глаукома может привести к необратимой слепоте пациента. Ранняя диагностика и лечение этого заболевания очень важны, чтобы избежать серьезного ущерба зрению.

Глаукома также подразделяется на открытоугольную глаукому и закрытоугольную глаукому. Прогрессирование заболевания и связанная с этим потеря зрения происходит гораздо медленнее в случае открытоугольной глаукомы, в то время как симптомы болезни проявляются достаточно быстро в случае закрытоугольной.

Селективная лазерная трабекулопластика (SLT – selective laser trabeculoplasty) является эффективным (и одним из самых новых) методов лечения глаукомы. Это один из вариантов операции с помощью лазера, который используется для снижения внутриглазного давления у пациентов, страдающих открытоугольной глаукомой. При SLT применяется Nd:YAG-лазер с удвоением частоты и модулируемой добротностью. Импульсное излучение с $\lambda = 532$ нм сильно поглощается меланином и может селективно воздействовать на пигментные клетки трабекулярной ячеистой структуры, не вызывая деструкции или коагуляции окружающих тканей (рис. 16.16, а).

Вторым способом лазерного воздействия при глаукоме является трабекулопластика непрерывным аргоновым лазером с длиной волны $\lambda = 488\text{--}512$ нм (ALT – argon laser trabeculoplasty). Этот способ ориентирован на коррекцию дренажа глазной жидкости. При открытоугольной глаукоме местный дренаж глаза

не функционирует нормально, и диафрагма окружена трабекулярной ячеистой структурой. Таким образом, происходит увеличение давления в связи с недостаточным дренажом. Во время ALT процедуры луч лазера направляется на трабекулярную ячеистую структуру, тем самым повышая эффективность дренажа жидкости. В то время как процедуру SLT можно повторить в той же области глаза, процедура ALT может осуществляться только один раз на данном участке.

Лазерная иридотомия (рассечение радужной оболочки) – еще одна процедура, использующаяся для снижения внутриглазного давления. Она выполняется путем высверливания отверстия в радужной оболочке с помощью лазера для того, чтобы улучшить отток жидкости (рис. 16.16, б).

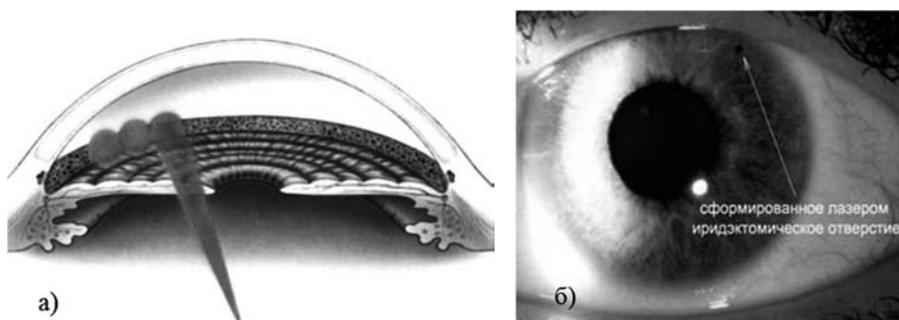


Рис. 16.16

Лечение глаукомы:

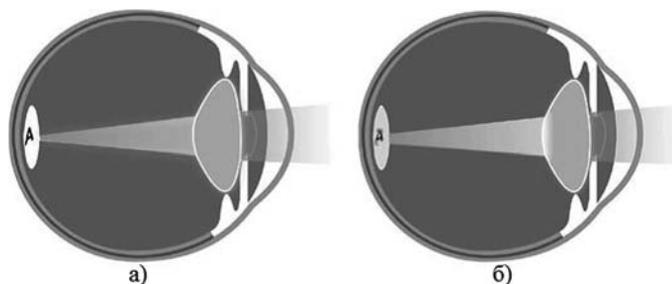
a – избирательная лазерная трабекулопластика (SLT); *б* – лазерная иридотомия

16.5.3. ХИРУРГИЯ КАТАРАКТЫ

Катаракта является одной из наиболее частых причин потери зрения, которая происходит в связи с непрозрачностью хрусталика глаза, как показано на рис. 16.17.

Самый популярный метод хирургического лечения катаракты – факэмульсификация. Это процесс, при котором ядро хрусталика дробят до состояния эмульсии (эмульгирование), а потом, используя специальную систему дренажа, выводят с ирригационным раствором. Факэмульсификация подразделяется на экстракапсулярную экстракцию катаракты (ЕССЕ – extra-capsular cataract extraction) и интракапсулярную экстракцию катаракты (ИССЕ – intro-capsular cataract extraction).

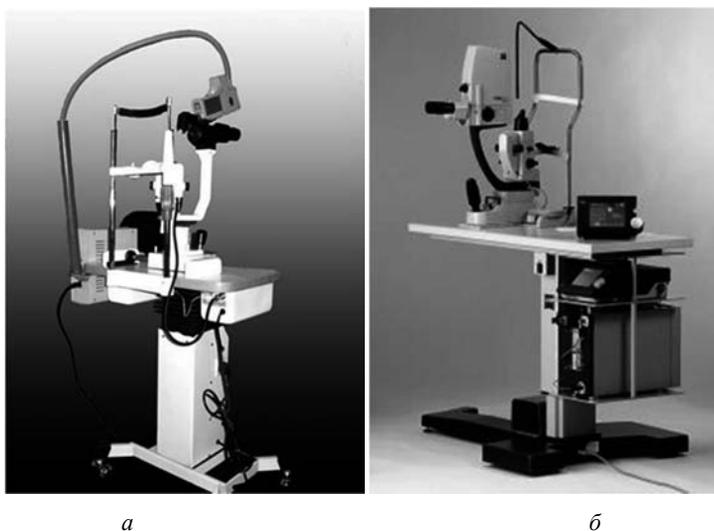
При ЕССЕ удаляют только ядро и хрусталиковые массы, а в глазу остается задняя капсула хрусталика и эластичная линза для последующей имплантации интраокулярной линзы. Этот метод используется, когда катаракта достигла зрелой стадии. При процедуре ИССЕ хрусталик и окружающая капсула удаляются. После удаления хрусталика производится имплантация искусственной пластиковой интраокулярной линзы.

**Рис. 16.17**

Механизм потери зрения при катаракте:

а – нормальный глаз; *б* – глаз, пораженный катарактой

Лазерная хирургия является одним из самых популярных методов лечения катаракты, доступных сегодня. Лазерный луч применяется для разрушения катаракты. Эмульсификация хрусталика с помощью Er:YAG-лазера является очень эффективным способом выполнения небольшого разреза глазного яблока с мягкой или средней мягкости ядром. Маленькие зоны абляции, созданные во время процедуры, помогают предотвратить повреждение окружающих глазных структур. Er:YAG-лазер вызывает низкоэнергетическую абляцию и не приводит к термической травме. Nd:YAG-лазер с модулируемой добротностью и длительностью импульса несколько наносекунд и выходной мощностью порядка миллиджоуля используется для удаления оставшихся послеоперационных плёнок.

**Рис. 16.18**

Офтальмологический аппараты: *а* – «Оптимум» (Ульяновский электроламповый завод); *б* – Visulas YAG III Combi (Carl Zeiss)

Примером универсального фотодеструктора, предназначенного для проведения микрохирургических операций на переднем отделе глаза и капсуле хрусталика сфокусированным лучом импульсного неодимового лазера, работающего в режиме модуляции добротности, может служить лазерный офтальмологический аппарат «Оптимум» (рис. 16.18). С помощью аппарата «Оптимум» может производиться хирургическое лечение открытоугольных, закрытоугольных и смешанных глауком, а также различных видов катаракты.

16.5.4.

ЛЕЧЕНИЕ ОТСЛОЕНИЯ СЕТЧАТКИ (РЕТИНОПЕКСИЯ)

Сетчатка, тонкая светочувствительная плёнка, покрывающая внутреннюю часть глаза, прикреплена к внутренней поверхности глазного яблока. Роговица и хрусталик фокусируют свет, попадающий в глаз, на сетчатке, которая преобразует его в визуальное впечатление и передает в мозг через оптический нерв. Сетчатка получает питание от сосудистой оболочки – слоя, расположенного позади сетчатки. В случае отслоения сетчатки плёнка отделяется от сосудистой оболочки и начинает плавать в стекловидном теле, расположенном в центре глаза. Частичное или полное отслоение сетчатки приводит к потере зрения и в результате заканчивается полной слепотой.

Для лечения отслоения сетчатки используют ряд хирургических процедур. К ним относятся лазерная фотокоагуляция, криопексия, стяжка склеры (наружной оболочки глаза), пневморетинопексия и витрэктомия (хирургическая операция, цель которой – удаление измененного стекловидного тела и рубцовой ткани из полости стекловидного тела и с поверхности сетчатки для устранения ее натяжения и отслоения).

Во время лазерной фотокоагуляции сетчатки лазерный луч фокусируется на сетчатку. Излучение, поглощённое меланином пигментного эпителия сетчатки и сосудистой оболочкой, используется для контролируемого повреждения, в результате которого образуется шрам во время процесса заживления. Он формирует механическую связь между нервами сетчатки и сосудистой оболочкой для предотвращения отрыва сетчатки. Для лечения обычно используют эксимерный ArF-лазер, излучающий на длине волны $\lambda = 193$ нм с выходной мощностью в диапазоне 100–400 мВт и диаметром пятна на сетчатке около 0.5 мм. Фотокоагуляционное воздействие, как правило, применяется в нескольких местах.

16.5.5.

ЛЕЧЕНИЕ ПРОЛИФЕРАТИВНОЙ ДИАБЕТИЧЕСКОЙ РЕТИНОПАТИИ

Лазерная коагуляция также широко используется для лечения пролиферативной диабетической ретинопатии. Диабетическая ретинопатия является заболеванием сетчатки, вызванным диабетом. Причиной заболевания является поврежде-

ние мелких кровеносных сосудов в задней части глаза. Когда болезнь вступает в пролиферативную стадию, начинается рост новообразованных кровеносных сосудов (неососудов). При отсутствии лечения эти неососуды могут лопаться и приводить к кровоизлияниям, затемняющим область зрения и, в конце концов, приводящим к полному отслоению сетчатки и слепоте.

Для лечения пролиферативной стадии диабетической ретинопатии используется панретинальная фотокоагуляция (включает в себя лазерную фотокоагуляцию средней периферии сетчатки в сочетании с непосредственным прижиганием неососудов, которые находятся в «неопасных» местах и прилежат к сетчатке). В отличие от ретинопексии, в этом методе используется гораздо большее число лазерных пятен (1000–2000), занимающих 20–30% области сетчатки в средней и внешней периферии. На рис. 16.19 приведены фотографии, иллюстрирующие лазерную фотокоагуляцию в ретинопексии и диабетической ретинопатии.

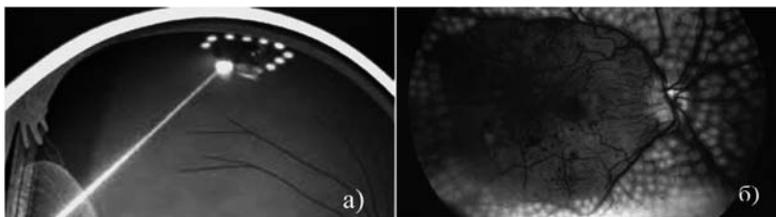


Рис. 16.19

Лазерная фотокоагуляция сетчатки:

а – при отслоении сетчатки; *б* – при диабетической ретинопатии

Для коагуляции ткани используются приборы, представленные на рис. 16.20. В них используют термическое воздействие лазерного излучения второй гармоники Nd:YAG-лазера ($\lambda = 532$ мкм), которое дает особенно выраженный эффект при сосудистой патологии глаза.



Рис. 16.20

Лазерные приборы для коагуляции:

а – Oculight GL/GLx (Iridex); *б* – АЛЮД-01 «Изумруд» («Алком Медика»)

16.6.

ЛАЗЕРНАЯ СТОМАТОЛОГИЯ

Лазерная стоматология позволила сделать ряд болезненных и неудобных стоматологических процедур намного менее болезненными. В стоматологии лазеры используются для профилактики кариеса, препарирования кариозной полости, подготовки корневого канала и дезинфекции (эндодонтии), удаления зубного камня (пародонтология), различных применений в хирургии мягких тканей и стерилизации, которая убивает бактерии без чрезмерного ущерба для ткани.

Также в стоматологии лазер используется для эндодонтии с участием корневого канала, включая подготовку и дезинфекцию, пародонтологии, включая удаление камней, дезинфекционной терапии имплантатов, а также различных видов хирургии мягких тканей. Лазеры позволяют использовать селективную абляцию для удаления кариеса в труднодоступных местах, не затрагивая окружающие ткани.

16.6.1.

ЛЕЧЕНИЕ КАРИЕСА

Процесс лечения кариеса включает в себя удаление пораженной ткани и её замену на искусственный материал. При лечении кариеса с помощью лазера чрезвычайно узкий сфокусированный поток энергии аккуратно и точно удаляет поврежденную ткань так же, как сверло, но без шума, вибрации, излишнего нагрева зубной ткани и даже анестезии (в большинстве случаев). Однако, чтобы сделать процедуру лазерного лечения как можно менее болезненной, тепловые и механические эффекты должны быть сведены к минимуму. Для этого поглощение лазерного излучения тканью должно быть достаточно высоким, чтобы ограничить нагрев лишь поверхностью ткани. Плотность мощности лазерного излучения также должна быть выше, чем порог микровзрывной абляции при приемлемой скорости абляции, и ниже величины, при которой возникают ударные волны и интерференционные помехи.

Лазерная энергия, как правило, применяется в сочетании с распылением холодной воды, чтобы аккуратно удалить зубные ткани без теплового нагрева, вибрации или ударов. На рис. 16.21 показана работа лазерной стоматологической установки с системой доставки луча и водяной струи к месту операции.

Удаление кариеса при помощи лазера открывает возможность лечения в труднодоступных местах полости рта (рис. 16.22). Для этого применяют эффект внутренней селективной абляции, когда порог абляции кариеса ниже, чем у окружающих здоровых тканей.

**Рис. 16.21**

Совмещение доставки лазерного луча и водяной струи

**Рис. 16.22**

Пример выполнения стоматологического лечения с помощью лазера

16.6.2. ЛАЗЕРЫ ДЛЯ СТОМАТОЛОГИИ

В стоматологии в основном используют Er:YAG-лазер (2.94 мкм), Er:YSGG-лазер (2.97 мкм), Er,Cr:YSGG-лазер ($\lambda = 2.78$ мкм), Ho:YAG-лазер (2.1 мкм), CO₂-лазер (9.6 мкм) и эксимерный лазер (193 нм).

Применение Er:YAG-лазера обусловлено тем, что длина волны его излучения в точности совпадает с пиком поглощения молекул воды. В связи с этим, используют Er:YAG-лазер в режиме свободной генерации с продолжительностью импульса 0.3 мс и энергией импульса порядка 100 мДж. Целью применения является термомеханическая абляция – процесс оставляет шероховатости стенок в полости,

не влияя на дентин, лежащий в основе эмали. Это связано с его относительно большой прочностью и уменьшением содержания воды в дентине.

Er:YSGG-лазер также дает похожие результаты.

CO₂-лазер, работающий на $\lambda = 9.6$ мкм, также подходит для удаления кариеса благодаря совпадению этой длины волны с усреднённой составляющей инфракрасного спектра поглощения неорганических микрокристаллов, в основном гидроксиапатита. Гидроксиапатит определяет устойчивость и прочность твердых тканей – костей, дентина и эмали.

Гидроксиапатит и вода определяют характеристики поглощения ткани. Экцимерный ArF-лазер, излучающий на длине волны 193 нм, является еще одним потенциальным кандидатом для использования в стоматологии, поскольку излучение его длины волны хорошо поглощается гидроксиапатитом. Пикосекундные и фемтосекундные лазеры – это перспективные для стоматологического использования лазеры.

На рис. 16.23 представлены современные лазерные стоматологические установки.

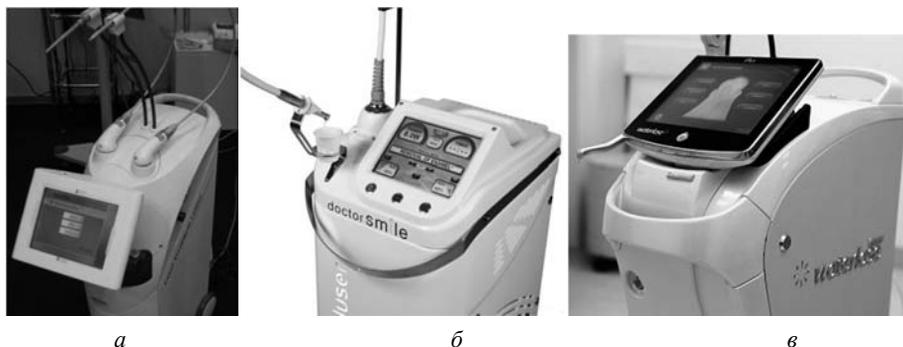


Рис. 16.23

Современные лазерные стоматологические установки:

- а* – OpusDuo (Rosslyn Medical, Великобритания),
- б* – DOCTOR SMILE™ PluserLAEDD001.1 (Lambda Scientifica, Италия),
- в* – Waterlase iPlus (Biolase Technology, США)

Уникальный лазерный лечебный центр Opus Duo RosslynMedical, Великобритания, состоит из двух лазеров: MegaPulse Er:YAG и SuperPulse CO₂. Применяется для безболезненного щадящего препарирования кариозных полостей без последующей протравки эмали.

DOCTOR SMILE™ PluserLAEDD001.1 имеет в своем составе Er:YAG-лазер ($\lambda = 2.94$ мкм) и диодный лазер ($\lambda = 810$ нм), использующийся для отбеливания зубов и терапии.

Waterlase iPlus укомплектован сразу двумя стоматологическими системами: iPlus - Er,Cr:YSGG-лазер ($\lambda = 2.78$ мкм) – для операций на твёрдых и мягких тканях и диодный лазер ($\lambda = 940$ нм) – в дополнение, для автономной работы на мягких тканях.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 16

16.1. Основные лечебные области применения лазеров включают их использование в клинических процедурах физиотерапии НИЛИ, фотодинамической терапии, общей и сосудистой хирургии, дерматологии, офтальмологии, стоматологии.

16.2. Механизмы терапевтического действия низкоинтенсивного лазерного излучения на биологические ткани обсуждается в научной среде последние 30–35 лет, однако единой общей теории терапевтического действия лазерного излучения пока не существует.

16.3. Несмотря на то, что показания к применению низкоинтенсивной лазерной терапии определены еще далеко не окончательно, а механизмы, лежащие в основе терапевтических эффектов, остаются неясными, накопленные данные свидетельствуют о необходимости дальнейшего развития экспериментальных и клинических исследований в этом направлении.

16.4. Фотодинамическая терапия включает использование препаратов фотосенсибилизатора, который при активации светом соответствующей длины волны и интенсивности производит фотопродукт, разрушающий больные клетки и ткани в присутствии кислорода.

16.5. Эффективность фотодинамической терапии зависит от многих факторов, в том числе свойств фотосенсибилизатора, характеристик источника излучения механизма его доставки, фотобиологического ответа клеток и тканей, способов оптического мониторинга лечения.

16.6. При использовании фототепловых эффектов лазер - источник энергии для нагревания биотканей с целью лечения доброкачественных и злокачественных опухолей, а также профилактики кровотечения краёв хирургических разрезов.

16.7. В коагуляции для лечения опухолей, лазерное излучение в видимой длине волны зеленого спектра селективно поглощается гемоглобином, пигментом в красных кровяных клетках, останавливая при этом кровотечение сосудов.

16.8. Лазерная ангиопластика это процедура, при которой закупоренная артерия открывается с помощью лазерной энергии, доставленной через оптоволоконный зонд. Лазерная ангиопластика является нехирургической альтернативой чистки закупоренной артерии с необычайной точностью и эффективностью.

16.9. Лазерная хирургия в дерматологии использует фототермический эффект. В дерматологии лазер применяется для лечения кожных сосудистых поражений, таких как винное пятно, пигментных образований, удаления волос и татуировок.

16.10. Различные механизмы взаимодействия, ответственные за лечебные процедуры в офтальмологии, включают фотокоагуляцию, фотоабляцию, фотодеструкцию.

16.11. Офтальмологическое применение лазеров включает лечение отслоения сетчатки, уничтожение аномальных кровеносных сосудов в сетчатке и лечение опухолей.

16.12. Фотоабляция – испарение ткани лазерным излучением в диапазоне глубокого ультрафиолета – в основном применяется в корректирующей глазной хирургии, для удаления ткани с помощью испарения, вызванного путем переноса энергии в целевую область. Профилирование роговицы используется для коррекции преломляющей силы глаза.

16.13. Фотодеструкция – это разрушение тканей с помощью индуцированной лазерным излучением быстрой ионизации молекул. Применяется для постоперационного удаления плёнки после лечения катаракты.

16.14. Лазеры в стоматологии применяют для удаления кариеса и связанных с ним операций стерилизации, пломбирования и отверждения. Другие области, где лазер находит применение в стоматологии, включают эндодонтию и подготовку корневого канала, дезинфекцию, пародонтологию, включая удаление камней, дезинфекцию имплантатов и различные виды хирургии мягких тканей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 16

16.1. Какие типы лазеров используют в физиотерапии низкоинтенсивным лазерным излучением, каковы их основные характеристики?

16.2. В чем заключается принцип фотодинамической терапии (ФДТ)? Каковы основные факторы, влияющие на ее эффективность?

16.3. Где применяется ФДТ?

16.4. На использовании какого эффекта основано широкое применение лазеров в общей хирургии? Какие лазеры применяются наиболее часто?

16.5. В чем суть метода эндовазальной лазерной коагуляции (ЭВЛК)?

16.6. Что такое лазерная ангиопластика, как ее реализуют практически, в чем ее преимущества?

16.7. Какой механизм взаимодействия излучения и тканей наиболее часто используется в дерматологии, как выбираются основные параметры лазерного излучения?

16.8. На каком принципе основано лечение винных пятен, удаление пигментных пятен и татуировок, эпиляция с помощью лазера?

16.9. Какие лазеры наиболее часто применяются в дерматологии?

16.10. Как называются наиболее широко используемые клинические лазерные процедуры в офтальмологии, не имеющие других альтернатив? В чем они заключаются?

16.11. Какова цель рефракционной хирургии, какие лазеры используются в ней?

16.12. В чем заключается лечение глаукомы с помощью лазера? Какие лазеры при этом используются?

16.13. Что такое катаракта, как ее лечат с помощью лазера?

16.14. Какая лазерная процедура используется при лечении отслоения сетчатки, какой лазер при этом используется?

16.15. Какая лазерная процедура используется при лечении пролиферативной диабетической ретинопатии, какой лазер при этом используется?

16.16. Какие эффекты используются в лазерной стоматологии, в чем ее преимущества, какие лазеры применяются?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 16

16.1. Москвин С.В., Ачилов А.А. Основы лазерной терапии. – Тверь, 2008. – 256 с.

16.2. Москвин С.В. Эффективность лазерной терапии. Серия «Эффективная лазерная терапия». Т. 2. – М. –Тверь: Издательство «Триада», 2014. – 896 с.

16.3. Серебряков В.А. Лазерные технологии в медицине. СПб., ГУИТМО, 2009. – 266 с.

16.4. Рубникович С.П., Фомин Н.А. Лазерно-оптические методы диагностики и терапии в стоматологии. Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2010. – 361 с.

16.5. Гейниц А.В., Москвин С.В. Лазерная терапия в косметологии и дерматологии. – М., 2010. – 400 с.

16.6. Невротин А.И., Введение в лазерную хирургию. Учебное пособие для вузов, СПб: СпецЛит. - 2000. – 175 с.

16.7. Костенев С.В., Черных В.В. Фемтосекундная лазерная хирургия. Принципы и применение в офтальмологии. – М., Наука, 2012. – 142 с.

16.8. Щуко А.Г.. Лазерная хирургия сосудистой патологии глазного дна. – М., Издательство «Офтальмология», 2014. – 254 с.

16.9. Шевченко Ю.А., Стойко Ю.М., Мазайшвили К.В. Лазерная хирургия варикозной болезни. – М., Боргес, 2010. – 198 с.

16.10. Агеева С.А., Кутовой В.С., Агеева О.А. Лазерная хирургия в оториноларингологии. – М., 2007 – 34 с.

16.11. Баграмов Р.И., Александров М.Т., Сергеев Ю.Н. Лазеры в стоматологии, челюстно-лицевой и реконструктивно-пластической хирургии, М.: Техносфера. – 2010. - 608 с.

16.12. Привалов В.А., Крочек И.В., Лаппа А.В., Евневич М.В., Полтавский А.Н., Минаев В.П. Лазерная остеоперфорация в лечении остеомиелита. – М., 2007. – 30 с.

ЧАСТЬ VI

**ВОЕННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ЛАЗЕРОВ**

В. А. Борейшо, Д. В. Клочков, М. А. Коняев, Е. Н. Никулин

ВВЕДЕНИЕ К ЧАСТИ VI

Интерес к военным применениям лазеров возник сразу после демонстраций первых квантовых генераторов. Уникальные свойства лазерного излучения, направленность, монохроматичность, когерентность, генерация ультракоротких импульсов, высокая концентрации энергии оказались весьма привлекательными для различных систем вооружений. С самого начала выделили два основных класса задач, решаемых с помощью лазеров.

Первый – это непосредственное воздействие лазерного луча на цель, приводящее к ее уничтожению, нанесению непоправимого ущерба или препятствующего выполнению боевой задачи (лазерные системы для таких целей относятся к оружию направленной энергии, ОНЭ), и второй класс, к которому относят оборудование и системы, несущие вспомогательные функции для поддержки обычных систем вооружений: дальнометрия; целеуказание и подсветка целей; поддержка средств управления огнем и связанных с ними устройств, таких как датчики сближения; высокоточная 3D-локация, включая малоразмерные цели (лазерные радары); мониторинг атмосферы для обнаружения и идентификации химических, биологических и взрывоопасных веществ (лидары); батиметрия морского шельфа и приповерхностных слоев океана. Лазерные дальномеры, гироскопы и лидары имеют гораздо более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства и подробно рассмотрены отдельно. Настоящий материал посвящен лазерным системам, в основном, военного назначения.

К лазерным инструментам относятся системы, используемые для выполнения измерений, или функциональные датчики. В военных целях такие лазерные системы используются для наведения или целеуказания, дальнометрии (определения расстояния до цели), управления боевыми средствами (датчики сближения), обнаружения, сопровождения и визуализации целей (лазерные радары), противодействия электронно-оптическим средствам противника, лазерной батиметрии для 3D-мониторинга морского шельфа, лидары дистанционного обнаружения и идентификации химических, биологических и взрывоопасных веществ в атмосфере (лидары).

ГЛАВА 17

ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

17.1.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЭЛЕМЕНТЫ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Воздействие на элемент конструкции определяется длительностью лазерного импульса $\tau_{\text{имп}}$ и коэффициентом температуропроводности материала χ , имеющим размерность $[\text{м}^2/\text{с}]$.

С помощью этого коэффициента можно определить, за какое время сможет прогреться слой вещества толщиной $\delta[\text{м}]$:

$$t_{\text{прогр}} = \delta^2 / \chi. \quad (17.1)$$

Можно решить и обратную задачу: на какую глубину проникает тепло при импульсном нагреве поверхности с длительностью импульса $\tau_{\text{имп}}$.

$$\delta = \sqrt{\chi \cdot \tau_{\text{имп}}}. \quad (17.2)$$

Величина χ определяется плотностью материала $\rho[\text{кг}/\text{м}^3]$, изобарной удельной теплоемкостью c_p [$\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$] и теплопроводностью материала $a[\text{кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$:

$$\chi = \frac{a}{c_p \cdot \rho}. \quad (17.3)$$

Значения коэффициента температуропроводности χ и другие теплофизические свойства некоторых материалов, в т.ч. конструкционных, применяемых в ракетной технике, приведены в табл. 17.1.

При оценках порога разрушения лазерным излучением элементов конструкции авиационных и ракетных систем можно ограничиться более простыми соотношениями для тонких пластин.

Таблица 17.1

Теплофизические свойства некоторых материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоёмкость c_p , кДж/(кг·К)	Теплопроводность a , кВт/(м·К)	Температуропроводность χ , м ² /с
Алюминий	2.7×10^3	0.92	0.21	8.4×10^{-5}
Титан	4.5×10^3	0.53	0.02	9.3×10^{-6}
Сталь	7.8×10^3	0.50	0.03	1.2×10^{-5}
Углерод	2.5×10^3	0.75	0.34	2.2×10^{-4}
Магний	1.74×10^3	1.00	0.1	-
Медь	8.9×10^3	0.38	0.401	1.11×10^{-4}
Фенол-формальдегидные смолы	1.73×10^3	0.8	1.6×10^{-4}	1.2×10^{-7}
Углепластики	$(1.3...1.9) \times 10^3$	0.6...1.5	$(0.75...0.90) \times 10^{-3}$	$(5.0...8.0) \times 10^{-7}$
Стеклопластики	$(1.6...2.2) \times 10^3$	0.7...4.2	$(0.21...0.33) \times 10^{-3}$	$(0.3...1.0) \times 10^{-7}$

Оценить удельную энергию лазерного излучения E [кДж/м²], необходимую для прогрева пластины толщиной δ за время воздействия до ее разрушения, можно из уравнения:

$$E = [c_p \cdot (T_{пл} - T_0) + L_{пл}] \cdot \rho \cdot \delta, \quad (17.4)$$

где T_0 [K] – начальная температура, $T_{пл}$ [K] – температура плавления, $L_{пл}$ [кДж/кг] – удельная теплота плавления.

Тогда с учетом длительности воздействия потребная для разрушения плотность мощности лазерного излучения I [кВт/м²]:

$$I = E/\tau, \quad (17.5)$$

где τ – время воздействия (длительность импульса) лазерного излучения.

Термодинамические характеристики некоторых конструкционных материалов приведены в табл. 17.2.

Таблица 17.2

Термодинамические характеристики некоторых материалов

Материал	Температура плавления $T_{пл}$, К	Теплота плавления $L_{пл}$, кДж/кг	Температура кипения $T_{кип}$, К	Теплота испарения $L_{исп}$, кДж/кг
Алюминий	933	393	2772	1.09×10^4
Титан	1941	315	3560	1.00×10^4
Сталь	1720...1790	205	3135	0.64×10^4
Углерод	-	-	4300	5.92×10^4

Используя эти данные, можно оценить требования к энергетике лазеров для каждого сценария.

Естественно, что первоначально рассматривалось самое универсальное решение задачи противодействия оружию массового поражения – уничтожение боеголовок межконтинентальных баллистических ракет (МБР) на больших высотах. При этом нужно учитывать, что основная часть траектории таких ракет проходит на высотах в тысячи километрах от поверхности, т.е. в космическом пространстве, откуда боеголовка устремляется к Земле со скоростью нескольких километров в секунду, разогреваясь при этом до очень высоких температур. Для предохранения боевой части и системы управления от перегрева в них используется специальная высокотемпературная теплозащита толщиной в несколько сантиметров.

Предварительные оценки показывают, что диаметр лазерного пятна на поверхности, достаточный для нанесения неприемлемого ущерба должен быть не менее 15 см.

Определим, какая энергия лазерного излучения E достаточна, чтобы уничтожить (испарить) слой углеродной теплозащиты толщиной в 1 см, нагретый почти до температуры деструкции, воспользовавшись выражением (17.6):

$$E \approx \rho \frac{\pi d^2 \delta}{4} L_{исп}. \quad (17.6)$$

Для углеродного покрытия $E \approx 2.6 \times 10^7$ Дж = 26 МДж, т.е. полностью соответствует приведенным выше оценкам. Полученная величина является оценкой поглощенной материалом энергии, тогда как энергия, излученная лазером с учетом потерь на трассе, должна быть в разы больше.

Учитывая величину удельной мощности, превышение которой ведет к оптическому пробою в атмосфере $I_{\text{пр}} \sim 10^{15}$ Вт/м², можно определить минимально возможное время лазерного импульса $\tau_{\text{имп}}$ для полученного выше значения энергии, при котором излучение еще сможет распространяться в атмосфере без существенных искажений $\tau_{\text{имп}} > (E/\frac{\pi D^2}{4})/I_{\text{пр}} \sim 10^{-6}$ с.

Менее жесткие требования к энергетике лазера могут быть рассмотрены для задач более раннего поражения МБР на активных участках траектории, хотя в этом случае лазер должен размещаться в космическом пространстве и в условиях прямой видимости взлетающей ракеты.

Толщина алюминиевого корпуса баков или двигательной установки МБР не превышает 0.5 см, в этом случае энергетический порог разрушения существенно снижается:

$$E \approx [c_p \cdot (T_{\text{пл}} - T_0) + L_{\text{пл}}] \cdot \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot \delta \approx 2.0 \times 10^5 \text{ Дж} = 0.2 \text{ МДж}. \quad (17.7)$$

Энергетический порог для элементов ракетносителя оказался на два порядка ниже, чем для боеголовки, но при этом нужно иметь в виду, что воздействие в данном случае осуществляется на существенно больших расстояниях от лазера до цели (многие сотни и тысячи километров) при огромных относительных скоростях перемещений и с мобильных платформ.

И все же несмотря на очевидные технические сложности реализации решения задач противоракетной обороны с помощью лазеров, это не остановило разработку «стратегических» лазерных систем для противоракетной обороны.

Предполагается, что такие системы смогут обнаруживать и поражать множество различных объектов, таких как крылатые ракеты, неуправляемые ракеты и беспилотные самолеты, а также наземные объекты, такие как автомашины, пусковые установки ракет на горизонтальных дистанциях от 8 до 25 км, что на несколько порядков меньше по сравнению с 300...400 км у лазера ABL.

17.2.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ БПЛА

Одной из наиболее важных целей тактических лазерных систем могли бы стать беспилотные летательные аппараты (БПЛА), причем в первую очередь малогабаритные мини- и микро-БПЛА.

БПЛА принято делить по таким взаимосвязанным параметрам, как масса, время, дальность и высота полёта. Выделяют следующие классы аппаратов:

– «микро» (условное название) – массой до 10 кг, временем полёта около 1 часа и высотой полета до 1 километра;

- «мини» – массой до 50 кг, временем полёта несколько часов и высотой до 3-5 километров;
- средние («миди») – до 1000 кг, временем 10...12 часов и высотой до 9...10 километров;
- тяжёлые – с высотами полёта до 20 километров и временем полёта 24 часа и более.

Именно такой выбор военной цели представляется наиболее целесообразным и с экономической точки зрения. «Тяжелые» и «средние» разведывательные и ударные беспилотники, схожие по габаритам и другим характеристикам (в том числе по стоимости) с пилотируемыми аппаратами, могут поражаться современными средствами противовоздушной обороны, такими как управляемые ракеты. В то же время использование подобных дорогостоящих средств против «мини» и особенно «микро» БПЛА нецелесообразно с технической и неэффективно с экономической точек зрения.

Для оценки потребной энергетики лазера воспользуемся данными в табл. 17.1. и 17.2.

Этих данных достаточно для приблизительной оценки энергетических характеристик тактического лазера, способного нанести достаточный ущерб микро-БПЛА. Так, при весе микро-БПЛА 2 кг и нагрузке на крыло 40 г/дм², площадь поверхности крыльев составляет не менее 50 дм². Если считать, что вес планера составляет примерно четверть от общего веса БПЛА, то средняя толщина алюминиевой стенки составляет ~0.3 мм.

Важным условием достаточности ущерба является размер пятна. Считается, что для не слишком больших целей неприемлемый ущерб возникнет при размере пятна не менее 15 см (~ 2 дм²). Разрушение даже небольшого участка поверхности крыльев приводит к существенному изменению аэродинамических характеристик планера и к потере управляемости.

Разумное время удержания лазерного пятна на одном месте быстро движущейся цели составляет порядка нескольких секунд (допустим $\tau \sim 1$ с) на небольших дистанциях в несколько километров. Тогда можно оценить интенсивность лазерного луча, достаточную для разрушения алюминиевой стенки толщиной ~ 1 мм, характерной для элементов конструкций небольших БПЛА.

Используя табличные данные получим величину плотности мощности на поверхности, необходимой для поражения цели $I \approx 125$ Вт/см². Тогда дошедшее до цели излучение должно иметь мощность около 25 кВт при времени работы $\tau \sim 1$ с даже для не слишком больших дистанций. При этом для разрушения элементов конструкций из титана, стали и композитных материалов выходная мощность (или время воздействия) должны быть увеличены.

С точки зрения устойчивости к воздействию мощного лазерного излучения объекты типа мини- и микро-БПЛА (для поражения которых достаточно создать плотность мощности порядка 100 Вт/см^2) классифицируются как «мягкие» цели.

17.3.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МИНЫ И БОЕПРИПАСЫ

Утилизацию мин и артиллерийских снарядов проводят путем фокусировки лазерного луча высокой мощности на корпусе боеприпаса. При этом происходит нагрев, который продолжают до тех пор, пока температура задней стенки корпуса не превысит температуру вспышки взрывчатого вещества (ВВ), которым снаряжен боеприпас. ВВ при этом воспламеняется и начинает гореть, причем этот процесс не зависит от типа плавления ВВ. Соответственно, возникает так называемая низкоуровневая детонация или дефлаграция, а не полная детонация. Технические характеристики современных мин приведены в табл. 17.3.

Таблица 17.3

Технические характеристики современных мин

Тип мины	ТМ-89	ТС/6.1	ПМН-4	VS50
Материал корпуса	Металл	Пластмасса	Пластмасса	Пластмасса
Масса мины, кг	11.5	9.8	300	185
ВВ	ТГ-40/60	TNT	ТГ-40	TNT/RDX
Масса заряда ВВ, кг	6.7	6.15	50	42...45
Масса промежуточного детонатора, кг	0.17		95	90
Диаметр, мм	320	270	42	45
Высота, мм	132	185	90	35
Температурный диапазон применения, °С	-30...+50	-20...+40	-40...+40	-20...+20

Мины снаряжают бризантными взрывчатыми веществами (ВВ), такими как тринитротолуол (тротил, TNT), циклотриметилентринитрамин (гексоген, RDX), тетранитропентаэритрит (ТЭН – используется в детонаторах) и их смесями.

Для изготовления корпусов мин применяются металлы и пластики на основе фенолформальдегидных смол (ФФС) – бакелиты, стеклопластики. Считая массу детонатора ≈ 150 г, находим массу корпуса противотанковой мины 4.65 кг и массу корпуса противопехотной мины 150 г. Плотность стали 7800 кг/м^3 , плотность бакелита 1270 кг/м^3 . Для оценки будем считать корпус мины равнотолщинным цилиндрическим телом, тогда толщина стенок пластмассового корпуса ≈ 4 мм, стального ≈ 2 мм.

Площадь нагрева поверхности боеприпаса определяется исходя из размеров боеприпаса, и для последующих расчетов будем считать достаточным диаметр пятна излучения ~ 5 см.

Пороговые значения энергии лазерного излучения для утилизации боеприпасов можно оценить исходя из прогрева стенки до достижения температуры вспышки взрывчатого вещества на внутренней стенке, после чего должно начаться его самостоятельное горение, приводящее к недетонационному разрушению боеприпаса. Формула оценки такова:

$$E_{\text{пор}} \approx c_p \cdot (T_{\text{всп}} - T_0) \cdot \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot \delta. \quad (17.8)$$

Температура вспышки $T_{\text{всп}}$ для большинства ВВ лежит в диапазоне $220\text{--}270^\circ\text{C}$. Тогда $E_{\text{пор}}$ боеприпаса с металлической стенкой будет порядка 4 кДж, а с пластмассовой – 2.5 кДж.

Таким образом, лазерному комплексу мощностью непрерывного излучения 1–2 кВт для утилизации боеприпаса не слишком большого размера понадобится всего несколько секунд.

17.4.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОРГАНЫ ЗРЕНИЯ

В соответствии с «Дополнительным протоколом IV Конвенции о запрещении или ограничении применения конкретных видов обычного оружия, которые могут считаться наносящими чрезмерные повреждения или имеющими неизбирательное действие» (Вена, октябрь 1995 г.), запрещено использование лазерного оружия, специально предназначенного для боевых действий, исключительно или в том числе для того, чтобы причинить постоянную слепоту органам зрения человека, не использующего оптические приборы.

Данный запрет не распространяется на лазерное оружие, вызывающее временное ослепление. Одним из видов его применения является пресечение преступных действий, направленных против сотрудников МВД и специальных подразделений, выполняющих свои обязанности по защите правопорядка или при захвате правонарушителей. Применение подобного оружия при самообороне обеспечивает малую степень риска для здоровья и жизни обороняющегося. Тем не менее, на близком расстоянии эффект лазера усиливается и приводит к частичной, но обратимой потере зрения.

Сине-зеленой областью является диапазон длин волн, выбранный из-за хорошей степени воздействия на человеческий глаз, как показано на рис. 17.1.

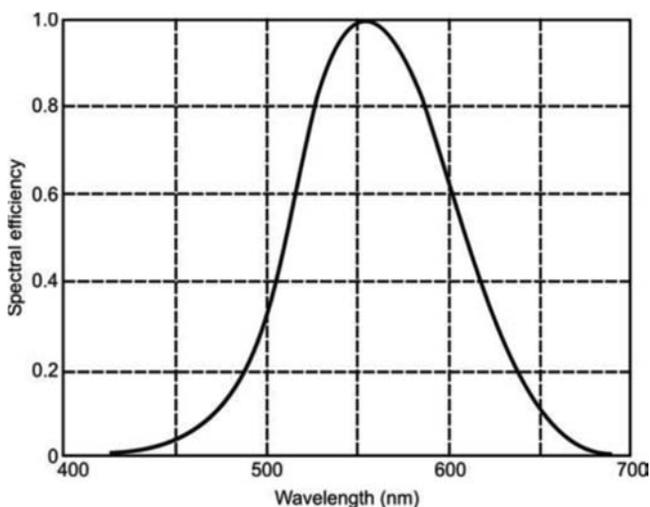


Рис. 17.1

Степень воздействия лазерного излучения зрения в зависимости от длины волны

В соответствии с нормами по безопасности МЭК, мощность лазерного источника должна находиться между двумя пределами, где верхний предел ограничивает максимальную мощность воздействия, не приводящую к ожогам и необратимым последствиям глаз (2.5 мВт/см^2), нижний предел (менее 1 мВт/см^2), определяет мощность, достаточную для достижения временного ослепляющего воздействия.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) зависят от длины волны и времени воздействия. При длине волны 532 нм, максимально допустимая плотность мощности составляет 2.5 мВт/см^2 и 1.0 мВт/см^2 для времени экспозиции 0.25 и 10 с, соответственно. Эти устройства генерируют случайные импульсы в диапазоне 10–20 Гц для улучшения общего эффекта воздействия. В ночное время максимальная рабочая дальность в 3–4 раза превышает максимальную дальность днём.

Для защиты сетчатки глаза от поражения, маломощными лазерами на малом расстоянии, можно снабжать лазерные излучатели измерителями расстояния, автоматически снижающими мощность излучения или отключающими излучатель.

17.5.

ТОЧНОСТЬ ПРИЦЕЛИВАНИЯ

Как уже говорилось, будем считать, что оптимальный размер пятна, сфокусированного на поверхности движущегося объекта, составляет $d \sim 0.15$ м. Тогда линейная точность прицеливания $\Delta d \approx d/2$, а угловая $\Delta\varphi \approx \xi (\lambda/D)$ рад $\approx \xi (\lambda/D) \times 2 \times 10^5$ угловых секунд. Исходя из сегодняшних технических возможностей, точность в 1 угловую секунду можно считать предельно достижимой для реальных систем. Отсюда можно оценить размер выходной апертуры лазера, которая для $\lambda \sim 1$ мкм составляет $D_{\max} \sim 0.5$ м.

Эта оценка сделана в предположении дифракционного оптического качества лазерного луча ($M^2 = 1$). В реальных лазерах расходимость всегда больше дифракционной, поэтому обеспечение требуемой точности при неидеальной расходимости потребует пропорционального увеличения выходной апертуры.

Для тех же допущений можно в качестве примера оценить предельную дальность воздействия, на которой при дифракционном качестве луча и точности удержания пятна на поверхности цели в Δd ($\Delta\varphi$) обеспечивается оптимальный размер пятна:

$$R \approx \frac{d \times D}{\xi \lambda} \approx 2 \left(\frac{\Delta d}{\xi \lambda} \right), \quad (17.9)$$

где $R_{\max} \approx 60$ км.

Приведенные оценки означают, что при длине волны лазера $\lambda \sim 1$ мкм для обеспечения оптимального размера пятна на цели на дистанциях менее 60 км выходная апертура лазерного комплекса D может быть менее 0.5 м, а для больших дистанций, чтобы обеспечить заданную интенсивность (плотность мощности) на цели, придется выбирать между увеличением размеров пятна (что равнозначно увеличению полной мощности лазера) или снижением точности прицеливания, компенсировать которое можно, также увеличивая мощность лазера.

Следует иметь в виду, что все вышеприведенные оценки выполнены без учета эволюции лазерного луча при прохождении через неоднородную среду и иллюстрируют только роль качества излучения и дифракции на выходной апертуре лазера. Изменения, которые могут происходить с лазерным лучом на трассе по пути к цели, могут в определенных обстоятельствах оказывать решающее влияние на характеристики дошедшего до цели излучения.

17.6. УЧЕТ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Чтобы перейти от оценки дошедшего до цели излучения к суммарной мощности на выходной апертуре лазера, нужно учесть реальную расходимость лазерного луча в атмосфере.

При прохождении лазерного луча через слой атмосферы, в котором имеется перепад показателя преломления (температуры и скорости движения воздуха), происходит его отклонение от первоначального направления. Степень отклонения зависит от относительных размеров луча и температурной неоднородности.

Степень влияния турбулентности атмосферы зависит от относительных размеров диаметра луча D_n и размера неоднородности s . Если $D_n/s \ll 1$, то основное действие турбулентности сводится к отклонению пучка в целом. При $D_n/s \approx 1$ неоднородности действуют как линзы, если $D_n/s \gg 1$, небольшие области луча диффрагируют независимо друг от друга, искажая волновой фронт лазерного пучка. На рис. 17.2 схематично представлены искажения вносимые турбулентностью с разными характерными размерами на излучение.

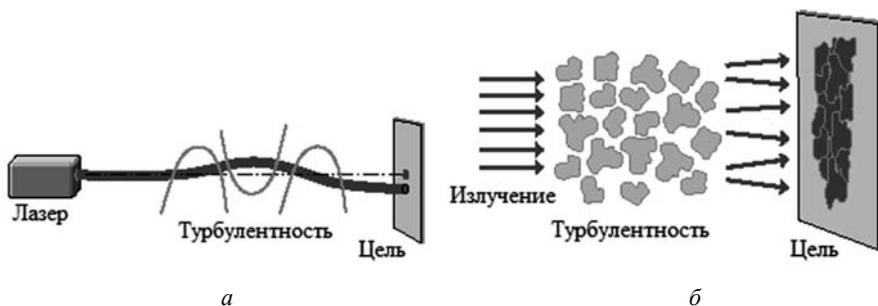


Рис. 17.2

Типы турбулентности и ее влияние на прохождение лазерного излучения:
а – крупномасштабная турбулентность; *б* – мелкомасштабная турбулентность

Суммарная угловая расходимость Θ лазерного излучения определяется дифракционной расходимостью луча, его дрожанием и оптическим качеством (параметр M^2), а также расходимостью, вызванной атмосферной турбулентностью (турбулентная расходимость):

$$\Theta^2 = \Theta_{DM}^2 + \Theta_T^2, \quad (17.10)$$

где Θ_D – дифракционная расходимость [рад], M^2 – оптическое качество, Θ_T – турбулентная расходимость [рад].

Оценить турбулентную расходимость можно по следующей формуле:

$$\Theta_T \approx 2 \times 2.016 \lambda^{-0.2} (C_N^2 L)^{0.6}, \tag{17.11}$$

где L – расстояние до объекта, C_N^2 – структурная постоянная атмосферы, на C_N^2 зависит от высоты, времени суток и географического положения. Для средних атмосферных условий вблизи поверхности $10^{-15} < C_N^2 < 10^{-14}$ [м^{-2/3}]. Распределение C_N^2 по высоте над поверхностью Земли для спокойной ночной атмосферы приведен на рис. 17.3.

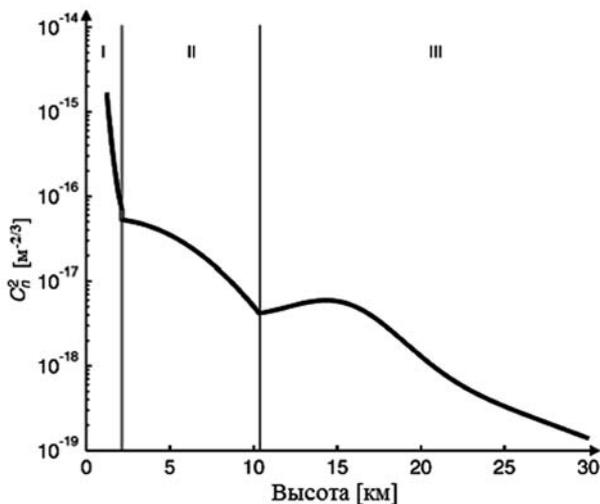


Рис. 17.3
Зависимость турбулентности от высоты согласно модели турбулентности Clear-1 Night

Так, для лазерной системы с выходной апертурой 0.5 м и мощностью 50 кВт, максимальная дальность поражения БПЛА для которой $I=100$ Вт/см², составляет около 7 км.

На вертикальных трассах ситуация с прохождением по турбулентной поглощающей атмосферной трассе существенно лучше. Положительной, с технической точки зрения, является сравнительно умеренная скорость перемещения БПЛА на подлете и в районе театра военных действий (ТВД).

Если для вертикальных оптических трасс «земля-космос» и, тем более, «воздух-космос» проблемами прохождения излучения через атмосферу (для «стратегических» систем) можно пренебречь, то для горизонтальных приземных трассах

ключевую роль играет состояние атмосферы и погода, определяющие ослабление излучения, тем более, что в этом случае рассматриваемые дальности из-за рельефа местности не превышают 5–7 км.

В плотных слоях атмосферы существенную роль играют оптические неоднородности воздушной среды, определяемые погодными условиями, которые могут существенно влиять на прохождение излучения даже при умеренных плотностях мощности лазерного излучения.

Все параметры атмосферы, вызывающие ослабление лазерного излучения, быстро уменьшаются с высотой над поверхностью земли. Сочетание этих факторов сильно зависит от геометрии трассы. Можно выделить 9 типов трасс (табл. 17.4).

Таблица 17.4

Трассы прохождения излучения через атмосферу

Цель:	Лазерный комплекс:		
	Земля	Воздух	Космос
Земля	Земля–земля: приземные горизонтальные трассы	Воздух-земля	Космос-земля
Воздух	Земля–воздух: источник расположен на уровне моря, цель – на высоте 1-2 км или выше, угол наклона трассы к горизонту $\geq 20^\circ$	Воздух-воздух	Космос-воздух
Космос	Земля–космос: вертикальные трассы длиной ≥ 200 км, источник расположен на уровне моря	Воздух-космос	Космос-космос

На *горизонтальных приземных трассах* ключевую роль играет состояние атмосферы и погода, определяющие ослабление излучения, тем более, что в этом случае рассматриваемые дальности из-за рельефа местности не превышают 5–7 км. Как показано на рис. 17.4, для коротковолновых лазеров ($\lambda \sim 1 - 2$ мкм) с расходимостью излучения на уровне дифракционного ($M^2 \sim 2$) в идеальных погодных условиях размер пятна на цели оказывается порядка сантиметра, в то время как в неблагоприятных условиях этот размер увеличивается более чем на порядок. Оценки выполнены для кольцевой апертуры (увеличение 1:5) по уровню мощности 50%. Расходимость лазерного излучения на уровне 2-3 дифракционных предела ($\sim 4''$ угловых секунды на дистанции 3 км) вполне доступна для современных лазерных технологий.

Кроме того, «турбулентная» составляющая угла расходимости зависит от длины волны как $\lambda^{-1/5}$, тогда как дифракционная – как λ^{-1} . Это означает, что в условиях сильной турбулентности для небольших дистанций лазеры с длинноволновым излучением имеют определенное преимущество. Так, например, для сложных метеоусловий и при низком содержании атмосферной влаги, высокой турбулентности, наличии дымки ($C_n^2 = 10^{-13}$, зима, снежная пыль) облученность мишени CO₂-лазером становится даже выше, чем у более коротковолновых ТТЛ и НХЛ.

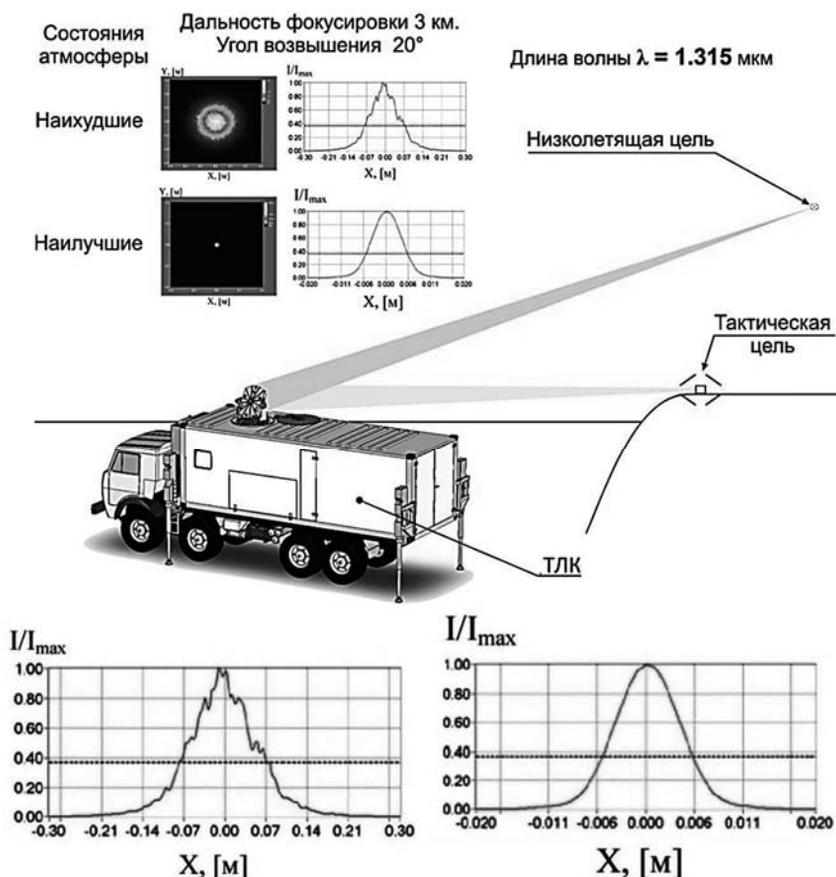


Рис. 17.4

Влияние состояние атмосферы на размер пятна на цели для приземных трасс (предоставлено «НПП «Лазерные системы»)

Для наклонных трасс, начиная с углов $\geq 20^\circ$ – 30° , влияние приземного слоя становится малым, и, следовательно, преимущество коротковолновых лазеров – все более ощутимым. Для больших расстояний предельные возможности концен-

трации излучения при наличии современной адаптивной оптики определяются только дифракционной расходимостью.

На *длинных вертикальных трассах* главную роль также играет дифракционная расходимость.

Трассы типа *земля-космос* зависимы от погоды, поэтому лазерные источники лучше размещать в районах с хорошим астроклиматом.

Подъем лазерного источника даже на 1–2 км над уровнем моря кардинально меняет ситуацию. Содержание аэрозоля резко падает, атмосферная турбулентность практически перестает влиять. Для трасс *воздух-воздух* и *воздух-космос* зависимости от погодных условий нет. Главной проблемой становится динамическая ошибка наведения, которая возникает из-за сильных вибраций авиационной платформы и турбулентного обтекания выходных окон лазерной системы

Для трасс типа *воздух-земля* и *космос-земля* приземный слой не оказывает пагубного влияния.

Как показывают расчеты, наземный лазерный комплекс на основе непрерывного лазера с длиной волны $\lambda \sim 1$ мкм и мощностью 20–30 кВт с фокусирующим телескопом диаметром 30–50 см позволит поражать как «твердые», так и «мягкие» цели в широком диапазоне атмосферных условий. При этом размер сфокусированного пятна определяется в основном атмосферными условиями. Однако даже при весьма неблагоприятных погодных условиях можно получать пятно размером не более 20 см на дистанциях до 5 км.

Максимальную дальность наземного лазерного комплекса разумно ограничить 2–3 километрами для «твердых» (порог поражения $I \geq 2$ МВт/м²) целей и 5–6 км для «мягких» ($I \leq 1$ МВт/м²), что в принципе обеспечит требуемый уровень плотности мощности даже с учетом реальных потерь, вызванных поглощением и рассеянием в атмосфере. Эта дальность если и сужает его возможности, то только с точки зрения противостояния далеким воздушным объектам. Но как раз такие объекты легко доступны для других видов противовоздушных систем. Дистанции до 6 км, с одной стороны, учитывают реальные особенности рельефа и достаточны, чтобы охватить большинство возможных объектов воздействия.

Определив максимально допустимое смещение пятна как ± 5 см от центра, получим точность удержания пятна на цели в $\pm 2''$ угловых секунды для максимальной дистанции. Эта результат также достижим на современном техническом уровне, хотя и потребует определенных усилий.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 17

17.1. Лазерные системы имеют ограничения, связанные с необходимостью локализации цели в зоне прямой видимости, требованиями к времени позициониро-

вания лазерного пятна на корпусе цели, проблемами атмосферного ослабления сигнала и турбулентности.

17.2. Одной из наиболее важных целей тактических лазерных систем могли бы стать беспилотные летательные аппараты (БПЛА), причем в первую очередь малогабаритные мини- и микро-БПЛА.

17.3. Лазерному комплексу мощностью непрерывного излучения 1–2 кВт для утилизации боеприпаса не слишком большого размера понадобится всего несколько секунд.

17.4. В соответствии с нормами безопасности МЭК, мощность лазерного источника должна находиться между двумя пределами, где верхний предел ограничивает максимальную мощность воздействия, не приводящую к ожогам и необратимым последствиям глаз (2.5 мВт/см^2), нижний предел (менее 1 мВт/см^2), определяет мощность, достаточную для достижения временного ослепляющего воздействия.

17.5. При длине волны лазера $\lambda \sim 1 \text{ мкм}$ для обеспечения оптимального размера пятна на цели на дистанциях менее 60 км выходная апертура лазерного комплекса D может быть менее 0.5 м. Для больших дистанций, чтобы обеспечить заданную интенсивность (плотность мощности) на цели, придется выбирать между увеличением размеров пятна (что равнозначно увеличению полной мощности лазера) или снижением точности прицеливания, компенсировать которое можно увеличивая мощность лазера.

17.6. Суммарная угловая расходимость Θ лазерного излучения определяется дифракционной расходимостью луча, его дрожанием и оптическим качеством (параметр M^2), а также расходимостью, вызванной атмосферной турбулентностью (турбулентная расходимость).

17.7. В ближайшей перспективе для «атмосферных» применений наиболее вероятными целями лазерного оружия направленной энергии будут оставаться «мягкие» миниатюрные и микро-БПЛА, чувствительные сенсоры систем управления оружием, органы зрения.

ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ 17

Задача № 1. Лазерный луч диаметром 10 см и мощностью 1 кВт облучает металлическую поверхность. Требуется определить, за какое время он сможет расплавить стенку из титана (алюминия) толщиной 2 мм (3 мм) соответственно.

Задача № 2. Определите, на какое расстояние (толщину прогрева) в слое углепластика распространится энергия лазерного импульса длительностью $17 \pm 2.5 \text{ нс}$.

Задача № 3. Рассчитайте плотность мощности непрерывного лазерного излучения на поверхности достаточного для разрушения стальной стенки толщиной 2 мм за 3 с.

Задача № 4. Оцените, какую массу вещества можно испарить с мишени из титана, лазерным импульсом с энергией 150 мДж и 500 мДж. Начальная температура 290 К.

Задача № 5. Решите предыдущую задачу для непрерывного излучения мощностью 100 кВт и времени воздействия 1, 5 и 50 с.

Задача № 6. Определите выходную апертуру Nd:YAG лазера с оптическим качеством луча $M^2 = 2.5$, обеспечивающую размер пятна на цели 15 см, если расстояние до цели 10 км, коэффициент ослабления $k_\lambda = -10^{-4} \text{ м}^{-1}$, а атмосферная турбулентность $C_N^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$.

Задача № 7. Решите предыдущую задачу для CO₂-лазера и $k_\lambda = -10^{-5} \text{ м}^{-1}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 17

- 17.1. Чем определяется воздействие лазерного излучения на элементы конструкции?
- 17.2. Каков оптимальный размер лазерного пятна, необходимы для нанесения неприемлемого ущерба?
- 17.3. Перечислите основные проблемы решения задач ПРО с помощью лазеров.
- 17.4. Дайте классификацию современных БПЛА. Для уничтожения каких из них целесообразно применение лазерного оружия?
- 17.5. Оцените пороговые значения энергии лазерного излучения, потребные для утилизации боеприпасов.
- 17.6. В каком диапазоне длин волн действует нелетальное лазерное оружие? Охарактеризуйте цели и задачи его применения.
- 17.7. Сформулируйте основные принципы учета расходимости лазерного излучения в атмосфере с точки зрения военного применения.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 17

- 17.1. Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие. – СПб., «Лань». – 2016.
- 17.2. Maini Anil K. Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications. – John Wiley and Sons Ltd., London – Delhi, 2013.
- 17.3. Энциклопедия XXI век «Оружие и технологии России». Том XI, «Опτικο-электронные системы и лазерная техника». – М.: ИД «Оружие и технологии», 1999. – 720 с.
- 17.4. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: Курс лекций: Учеб. руководство. – М., Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.

ГЛАВА 18

ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ПОРАЖЕНИЯ

История об Архимеде, якобы уничтожившим более двух тысячелетий назад вражеский флот с помощью зеркал-концентраторов солнечного излучения, может считаться первой попыткой обосновать возможность использования световой энергии в качестве средства поражения.

Естественно, что сразу с появлением лазеров возник самый серьезный интерес к этой теме. Тем более, что новая технология требовала для своего развития немалых материальных затрат, которые в то время могли быть реально оправданы лишь военными программами.

Первые лазеры были созданы в 1960–1961 году, а к 1963 году уже существовали лабораторные образцы твердотельных лазеров с энергией импульса 10 Дж и непрерывный CO_2 -лазер мощностью в один киловатт (рис. 18.1).

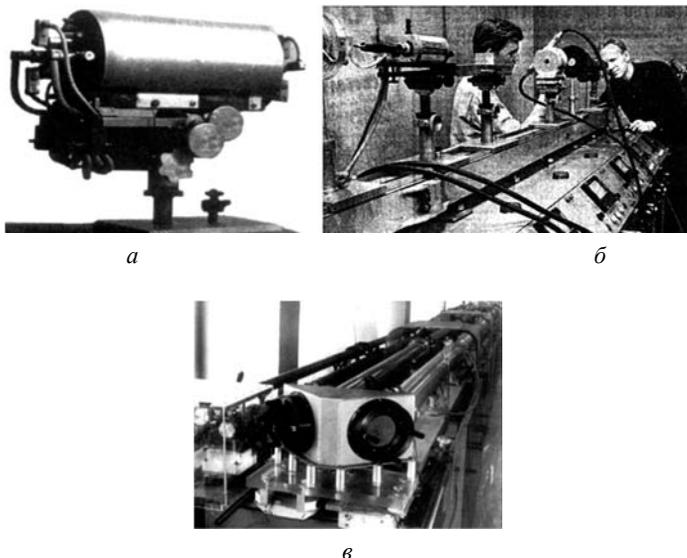


Рис. 18.1

- а* – рубиновый 10 Дж лазер (ГОИ им. С. И. Вавилова, 1963 г.);
б – рубиновый 10 Дж лазер с модулированной добротностью (ФИАН, 1963 г.);
в – 1 кВт CO_2 -лазер (НИИПФ, 1966 г.)

18.1.

«СТРАТЕГИЧЕСКИЕ» ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Одной из первых задач, поставленных перед разработчиками лазеров, стала борьба со стратегическим оружием массового поражения – боеголовками баллистических ракет, а впоследствии с самими ракетами в активной фазе полета, поскольку в то время именно для этих целей вообще не существовало альтернативных средств противодействия. Только такая амбициозная цель позволила сконцентрировать на развитии мощных лазерных систем ресурсы, достаточные для быстрого продвижения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Потребная лазерная энергия, требуемая для военных целей на первом этапе, была определена в 1–10 МДж, сравнимая с суммарной кинетической энергией осколков боеголовки ракеты «земля – воздух», что эквивалентно взрыву заряда тринитротолуола весом до пяти килограмм. При этом уже тогда было понятно, что реализация лазеров с такими характеристиками потребует экстраординарных решений.

Из рассекреченного письма заместителя директора ФИАН Н.Г. Басова Президенту АН СССР М.В. Келдышу в ответ на запрос Министерства обороны СССР, датированного декабрём 1963 г.:

«Вероятно, можно создать генераторы [лазеры] с энергией до $10^6 \dots 10^7$ Дж, используя в качестве источника энергии взрыв обычного ВВ... По-видимому, единственным путем создания генераторов с энергией $10^9 \dots 10^{10}$ Дж является использование в качестве источника накачки атомного взрыва...»

По-видимому, эту дату можно считать точкой отсчета начала работ над высокоэнергетическими лазерами.

18.2.

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

Наиболее быстро продвигались работы по импульсным фотодиссоциационным лазерам (ФДЛ) с взрывной накачкой, уже в 1969 году в Советском Союзе был успешно испытан мегаджоульный ФДЛ (рис. 18.2).

Тогда же был подготовлен проект и начато строительство Научно-экспериментального комплекса «Терра-3» на полигоне ПВО Министерства обороны Сары-Шаган в Казахстане (рис. 18.3).

Сердцем этого комплекса должны были стать восемь мегаджоульных ФДЛ, излучение которых формировалось в один луч и с помощью системы наведения

могло фокусироваться на летящих высокоскоростные цели, включая космические объекты.



а

б

Рис. 18.2

Сборка ФДЛ (фотодиссоционного лазера) с энергией импульса более 10^6 Дж; испытательная площадка в ВНИИЭФ, 1969 г. (б)

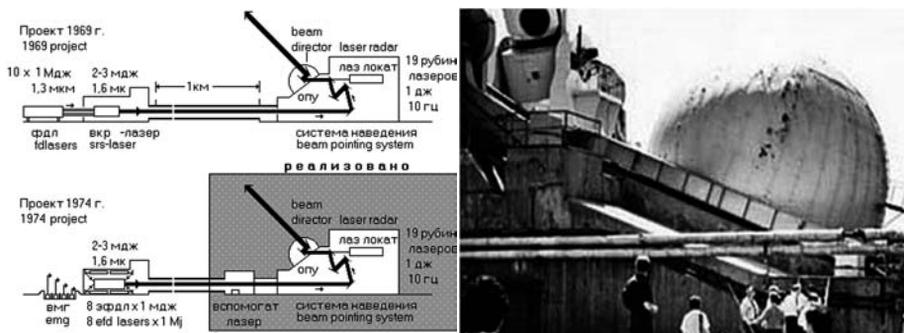


Рис. 18.3

Научно-экспериментальный комплекс «Терра-3» (на фото справа купол и телескоп системы наведения)

В это же время, в США также были развернуты работы над мощными лазерами, но в отличие от СССР, там основные успехи были достигнуты в развитие непрерывных газодинамических CO_2 -лазеров (CO_2 -ГДЛ) на продуктах сгорания углеводородных топлив. Источником накачки такого лазера являлся газогенератор, разработанный на базе ракетного двигателя. Работы над мощными лазерами велись, вероятно, несколько лет, однако первые результаты были раскрыты только в 1969 году в докладе Э. Джерри из фирмы «Авко-Эверетт рисерч», сообщившем о работах над CO_2 -ГДЛ непрерывной мощностью излучения свыше 100 кВт (рис. 18.4).

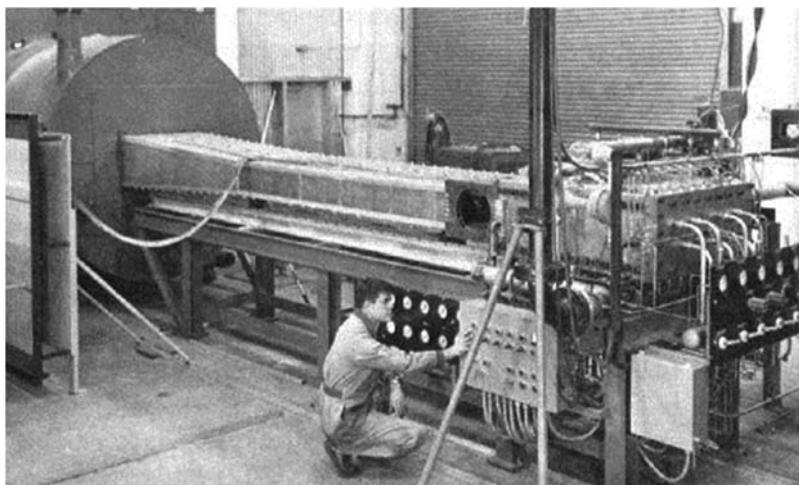


Рис. 18.4

Газодинамический лазер на продуктах сгорания мощностью 135 кВт
на стенде фирмы AVCO

Таким образом, к концу 60-х годов прошлого века, когда от появления первых лазеров еще не прошло и десятилетия, появились лазерные системы с мегаджоульной энергией в импульсе и более чем сотней киловатт в непрерывном режиме, которые уже можно было рассматривать в качестве основного компонента лазерного (лучевого) оружия или оружия направленной энергии (ОНЭ).

Несмотря на очень перспективную длину волны фотодиссоционных лазеров (ФДЛ) (1.315 мкм) успешная реализация этого направления ограничивалась почти непреодолимыми техническими сложностями использования ФДЛ в мобильных системах вооружений и принципиальными проблемами прохождения через атмосферу излучения с гигантской пиковой интенсивностью, характерной для импульсных лазеров.

Поэтому в 70-80-е годы интерес разработчиков сместился в сторону мобильных (хотя бы в перспективе) непрерывных лазеров. В это время электроразрядный CO_2 -лазер мегаваттного класса, разработанный в СССР и установленный на сухопутный носитель (рис. 18.5), и 400 кВт CO_2 -ГДЛ на летающей лаборатории Airborne Laser Laboratory (ALL) Военно-воздушных сил США вместе с системами наведения и управления лучом (рис. 18.6) впервые позволили практически проверить и оценить масштабность и сложность технологических проблем создания лазерного оружия.

Однако большая длина волны (10.6 мкм) и, следовательно, высокая расходимость лазерного луча вкуче с низкой энергетической эффективностью лазерных источников, оказались слишком серьезными техническими препятствиями для

лазерных систем на основе CO_2 -ГДЛ с дальностью в десятки километров, чтобы конкурировать с традиционными видами вооружений.

Тем не менее, эти работы оказались сильнейшим стимулом для ускорения развития систем управления и информационных технологий, заложивших условия для их беспрецедентного прогресса в последующие десятилетия.



Рис. 18.5

Советский мобильный лазерный комплекс на базе электроразрядного CO_2 -лазера на колесном шасси (а); фото поражения лазерным излучением беспилотного летательного аппарата (б)



Рис. 18.6

400 кВт CO_2 -ГДЛ на самолете Boeing KC-135 ВВС США

С началом работ в США над программой Стратегической оборонной инициативы (СОИ) во второй половине 80-х, максимальный интерес стали вызывать более коротковолновые непрерывные химические лазеры (НХЛ), открывшие пути для продвижения практически по всем направлениям. Конкретной целью работ было создания глобальной системы ОНЭ космического базирования основанной на использовании технологии мощного химического лазера «Альфа», установлен-

ного на спутнике, и предназначенного для поражения баллистических ракет на активном участке траектории.

НХЛ обеспечили значительный рост энергетической эффективности и снижение расходимости лазерного луча. Спектр излучения HF-НХЛ ($\lambda = 2.7\text{--}3.1$ мкм) сильно поглощается атмосферой, тогда как спектр DF-НХЛ ($\lambda = 3.6\text{--}4.1$ мкм) практически полностью попадает в окно прозрачности. Поэтому HF-лазеры рассматривались только для внеатмосферных применений, тогда как DF-НХЛ привлекательны в наземных условиях.

Экспериментальные образцы таких лазеров мощностью в несколько мегаватт вместе с крупногабаритной оптикой (около полутора метров в диаметре), разработанные в США, уже позволили провести эффектные испытания, продемонстрировавшие зрелость лазерных, оптических, электронных и информационных технологий, достаточных для решения многих практических задач в полном объеме (рис. 18.7).

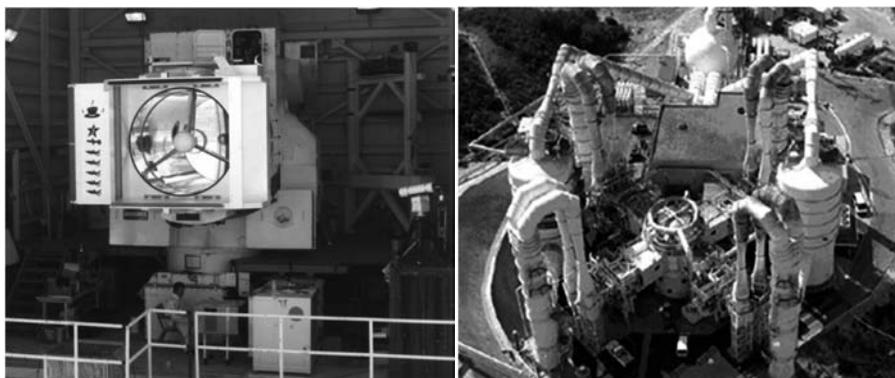


Рис. 18.7

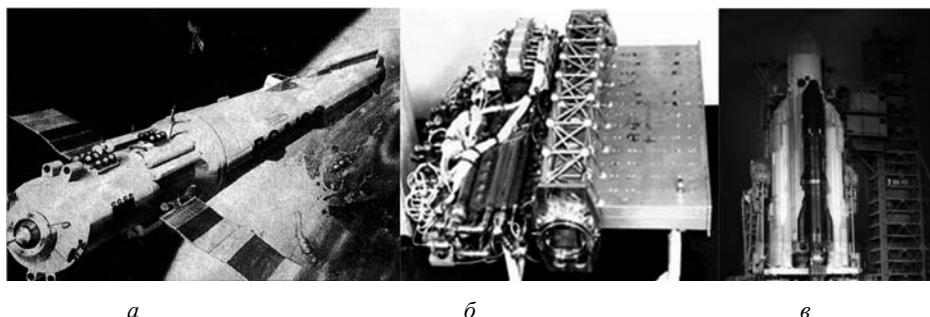
DF-НХЛ MIRACL мощностью 2.5 МВт на стенде лаборатории ВВС США в Нью-Мексико и стендовый комплекс для испытаний 5 МВт HF-НХЛ «Альфа» в Калифорнии

В ответ на развертывание в США работ по программе СОИ в СССР также начались работы, направленные на создание систем противодействия американскому лазерному космическому оружию. Разрабатывались противоспутниковые лазерные системы, размещаемые на авиационном носителе (рис. 18.8), а также рассматривалась возможность размещения на околоземной орбите космического лазера.

Проект «Скиф-Д» – непрерывный газодинамический СО-лазер разработки КБ «Химавтоматика» (КБХА) мощностью 1 МВт, создавался в рамках программы НПО «Астрофизика» по лазерной установке космического базирования для космической станции 17Ф19Д «Скиф-Д» (рис. 18.9).

**Рис. 18.8**

Самолет А-60 (на базе Ил-76) с противоспутниковым лазерным комплексом «Сокол-Эшелон»

*a**б**в***Рис. 18.9**

Лазерная установка космического базирования для космической станции «Скиф-Д» (проект) (*a*); газодинамический лазер РД-0600 разработки КБХА (*б*); ракетный комплекс «Энергия» с макетом мощного лазера перед запуском на орбиту (*в*)

«Скиф-Д» был прежде всего экспериментальным космическим аппаратом, на котором должны были отрабатываться не только лазер, но и некоторые штатные системы следующих аппаратов, создаваемых в рамках программы «советской СОИ». Это были системы разделения и ориентации, система управления движением, система электропитания, система управления бортовым комплексом.

Аппарат 17Ф19Д должен был продемонстрировать также принципиальную возможность создания космических комплексов для уничтожения целей в околоземном пространстве. Для испытаний лазера на «Скифе-Д» планировалось установить специальные мишени, имитирующие вражеские ракеты, боеголовки и спутники.

Предполагалось использовать лазер большой мощности, работающий по принципу преобразования тепловой энергии активной газовой среды, полученной при неравновесном расширении в сверхзвуковой сопловой решетке, в электромагнитное излучение с длиной волны 10.6 мкм. ГДЛ РД-0600 прошел полный цикл стендовой обработки на специальном стенде с оптической трассой.

Следующим за «Скифом-Д» в КБ «Салют» планировалось создать аппарат 17Ф19С «Скиф-Стилет». Это тоже был аппарат тяжелого класса, рассчитанный на запуск на РН «Энергия». На этом аппарате собирались установить бортовой специальный комплекс (БСК) 1К11 «Стилет», разработанный в НПО «Астрофизика». Это была «десятиствольная» установка инфракрасных лазеров, работающих на длине волны 1.06 мкм, которую вполне можно было применять как противоспутниковое средство.

Тем не менее, до демонстраций реальных мобильных прототипов таких лазеров дело так и не дошло, вероятно, из-за комплекса технологических и экологических проблем и недостаточного финансирования. Стала очевидной необходимость более ограниченного в своих возможностях, но в то же время более рационального решения.

Начиная с середины девяностых годов стал активно развиваться другой тип НХЛ – химический кислородно-йодный лазер. Длина волны излучения ХКЙЛ ($\lambda = 1.315$ мкм) приходится на окно спектральной прозрачности атмосферы, а также соответствует рабочему диапазону волоконной оптики. Это означает отсутствие принципиальных ограничений на использование лазеров этого типа в различных атмосферных и внеатмосферных условиях. Более короткая длина волны обеспечивает уменьшение дифракционного предела, а малая плотность активной среды в резонаторной полости – высокое оптическое качество лазерного луча.

Проект AirborneLaser (ABL) на базе непрерывного химического кислородно-йодного лазера мощностью в несколько мегаватт, предназначенного для поражения баллистических ракет с ядерными боеголовками на активном участке траектории, на борту широкофюзеляжного самолета (Boeing 747-400F) (рис. 18.10) стал вероятно последней попыткой применить лазерное ОНЭ для противоракетной обороны. Другой возможной задачей боевого применения этого комплекса являлось поражение спутников на околоземной орбите.

Проект ABL был доведен до реальных испытаний, признанных «ограниченно успешными», и в конце декабря 2011 года стало известно, что Министерство обороны США закрыло программу разработки ABL. Программа разработки лазера велась на протяжении 16 лет, а объем ее финансирования составил пять миллиардов долларов. По данным Пентагона, программа ABL была закрыта из-за ее высокой стоимости, малой практической применимости созданных технологий и необходимости сокращать расходы оборонного бюджета.



Рис. 18.10

Конструктивная схема и внешний вид самолета Boeing 747F с непрерывным химическим кислородно-йодным лазером на борту

На сегодняшний день пока неизвестно о разработках лазерного оружия направленной энергии для поражения баллистических ракет или их боеголовок. Интерес разработчиков лазерного оружия направленного действия, кажется, окончательно сместился в сторону менее мощных, более компактных и рациональных (тактических) лазерных систем.

18.3.

«ТАКТИЧЕСКИЕ» ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

К концу 90-х годов, по мере снижения интереса к «стратегическим» задачам использования высокоэнергетических лазеров в системах противоракетной обороны, началось обсуждение их возможностей для решения более ограниченных концепций тактических лазерных систем (Advanced Tactical Laser) сначала на базе химического кислородно-йодного лазера, а позже, с конца первого десятилетия нового века, на волоконных и твердотельных лазерах средней мощности (до 100 кВт). При этом рассматривались разнообразные носители и варианты использования.

Накопленный практический опыт испытаний экспериментальных лазеров, привёл к лучшему пониманию их возможностей, расширению перечня потенциальных целей, увеличению диапазона дистанций и еще большей избирательности и точности воздействия. Это и стимулировало переход от гигантизма первого поколения лазерных систем к более эффективным и компактным мобильным системам, рассчитанным, соответственно, на более широкое применение.

Примером «тактической» системы может считаться Advanced Tactical Laser (ATL) на базе кислородно-йодного лазера мощностью 50–75 кВт, установленного на борту самолета NC-130H (рис. 18.11). ATL может быть использован в разведывательных и диверсионных операциях для уничтожения транспортных средств, линий связи и коммуникаций, разрушение инфраструктур энергоснабжения на дистанциях 8–10 км. Преимуществами ATL является высокая мобильность среднеразмерного самолета, высокое разрешение для идентификации цели, локализация с точностью менее метра объектов атаки.

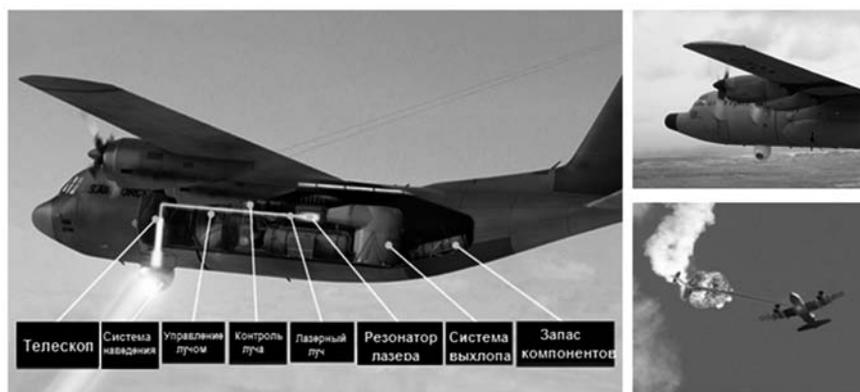


Рис. 18.11

Авиационный носитель NC-130H с установленным кислородно-йодным лазером мощностью 50–75 кВт

Лазер основан на тех же технологиях, которые применялись в программе лазера воздушного базирования AVL, но выходная мощность намного меньше, чем у систем первого поколения. Однако возможность быстрого высвобождения огромных запасов энергии на автономных мобильных платформах была по сути единственным неоспоримым преимуществом химических лазеров. При существенном снижении требований по уровню мощности, это достоинство перестает быть определяющим, а основные недостатки, такие как конструктивная и технологическая сложность, ограниченный запас расходных компонентов активной среды, опасность для окружающих серьезно ограничили перспективы их использования.

Тем более, что уровень мощности излучения в десятки киловатт сейчас могут обеспечить компактные и надежные твердотельные и волоконные лазеры, для накачки которых нужно было только электричество.

Привлекательность лазеров с электрическим питанием – скорость и точность; большой запас «выстрелов», ограниченный только энергией и охлаждением; низкая цена по сравнению с потенциальными целями: БПЛА и даже неуправляемыми ракетами, артиллерийскими снарядами и минами.

Основным недостатком твердотельных и волоконных лазеров для мобильных систем поля боя является обеспечение высокого качества излучения большой мощности.

Однако в последнее десятилетие были продемонстрированы волоконные лазеры с непрерывной мощностью излучения до десяти киловатт и оптическим качеством близким к дифракционному пределу. Также ведутся активные работы по когерентному сложению («фазировке») лучей нескольких лазерных модулей, что открывает дорогу к созданию принципиально новых систем лазерного оружия большой яркости на базе твердотельных лазеров.

Во время начальных испытаний в 2009 году на полигоне ВМС США в Чайна Лэйке (Калифорния) проверялось смешанное применение военной лазерной системы Laser Avenger, установленной на автомобиль HUMVEE, с целью поддержки обычных систем вооружения для уничтожения БПЛА (рис. 18.12, *а*).

*а**б***Рис. 18.12**

Тактическая лазерная система Laser Avenger компании Boeing (*а*);
Лазер HEL MD компании Boeing (*б*)

Во время испытаний инфракрасный твердотельный лазер Laser Avenger был использован для подогрева небольшого БПЛА, имеющего очень слабый инфракрасный след, до такого уровня, чтобы его смогла захватить, сопровождать и уничтожить ракета Стингер.

Специалисты компании Boeing также разработали и проводят испытания прототипа мобильной высокоэнергетического боевого лазера HEL MD. В его ходе проводятся стрельбы 10-киловаттного твердотельного лазерного модуля, с возможностью наращивания мощности до 100 и более киловатт с системой управления огнем и системой питания (рис. 18.12, б).

Самоходный лазер HEL MD размещен на шасси тяжелого четырехосного грузовика HEMMT и предназначен для перехвата управляемых и неуправляемых ракет, бомб, минометных мин, беспилотных аппаратов. Допускается возможность использования боевого лазера против живой силы и небронированной техники. Прежде всего, HEL MD обеспечит защиту военных баз от авиационных и артиллерийских средств поражения. В Boeing надеются доказать надежность и эффективность систем наведения и питания лазера, которые в будущем можно использовать с более мощным излучателем.

Лазерная система LaWS (Laser Weapon System) разрабатывается компаниями Raytheon и Northrop Grumman. При ее разработке были решены проблемы интеграции лазерного оружия с корабельным радиолокатором зенитного артиллерийского комплекса системы ближнего боя Mark 15 Phalanx и силовой корабельной установкой (рис. 18.13).

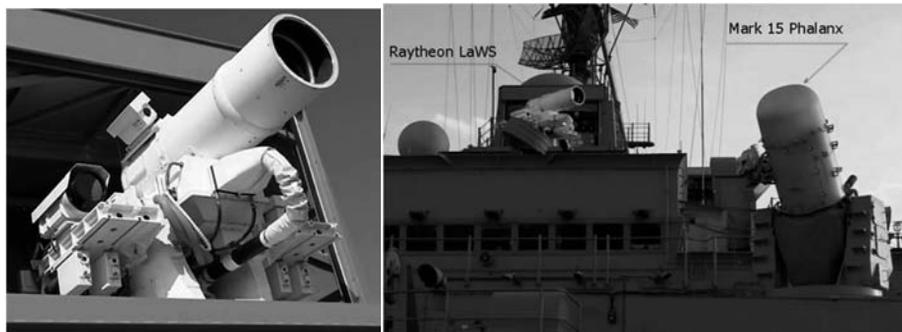


Рис. 18.13

Боевой лазер морского базирования LaWS, интегрированный с корабельным радиолокатором зенитного артиллерийского комплекса системы ближнего боя Mark 15 Phalanx

В ходе морских испытаний LaWS успешно выполнила задачи, которые ставились перед лазерным оружием морского базирования: система отследила и уничтожила надводные и воздушные цели небольшого размера, типа малоразмерного катера и беспилотного самолета.

После модернизации система наведения позволяет автоматически удерживать серию лазерных импульсов в заданной точке на цели до её полного уничтожения (рис. 18.14).

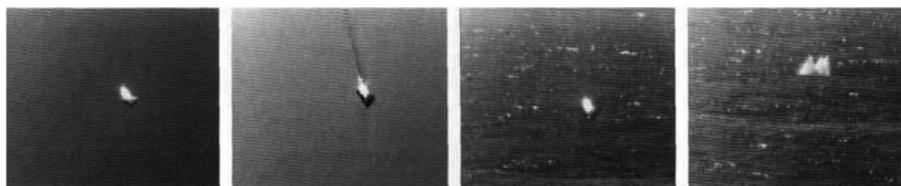


Рис. 18.14

Последовательность кадров горящего БПЛА, сбитого лазерной системой Phalanx

Американская корпорация Lockheed Martin разработала малогабаритный наземный лазер «Система защиты территории от подлетающих боеприпасов» (Area Defense Anti-Munitions – ADAM), предназначенный для перехвата ракет и беспилотных летательных аппаратов. Эта мобильная лазерная система использует волоконный лазер мощностью 10 кВт и установлена на автомобильном прицепе. ADAM фиксирует лазерный луч на перехваченной цели в течение нескольких секунд, что приводит к нагреву и разрушению снаряда (рис. 18.15, а).

Система наведения ADAM обеспечивает захват и сопровождение воздушной цели на расстоянии в 5 километров. В ходе испытаний ADAM сбил восемь ракет малого калибра на дальности 1.5 километра.

Разработка прототипов тактических лазерных систем ведется не только в США. Израильская военно-промышленная корпорация RAFAEL создает боевой лазерный комплекса противоракетной обороны «Железный луч» (Iron Beam) на рис. 18.15, б, предназначенный для уничтожения ракет, минометных и артиллерийских снарядов на малых расстояниях.



Рис. 18.15

Система защиты территории от подлетающих боеприпасов (ADAM) (а); система «Железный луч» (б)

«Железный луч» обеспечивает самый нижний уровень противоракетной обороны. В его состав входят два твердотельных лазера, способные поражать ракеты

на дальности до двух километров, радиолокационная станция и пост управления. Комплекс является мобильным, а лазерные установки смонтированы внутри стандартных грузовых контейнеров, установленных на грузовых шасси (система может монтироваться на любое шасси в зависимости от потребности заказчика). Система должна будет поражать ракеты малой дальности, минометные мины и снаряды при помощи лазерного луча, нагревая боевую часть боеприпасов до разрушения.

Немецкая компания Rheinmetall Defence провела испытания боевого лазера, в котором для повышения мощности реализовано другое техническое решение (рис. 18.16).



Рис. 18.16

Прототип тактических лазерных систем компании Rheinmetall Defence

Энергия лазера обеспечивается двумя волоконными лазерными модулями (20 и 30 кВт), лучи которых с высокой точностью сводятся в одну точку на мишени. Такое решение в действующем прототипе применяется впервые и позволяет в принципе достичь и даже превысить требуемую по оценкам некоторых экспертов мощность в 100 кВт. Кроме того, использование сведения лучей позволяет осуществить более надежное облучение цели, ведь даже если один из лазеров перестанет работать, второй (третий, четвертый и т.д.) смогут «добить» цель – просто для этого понадобится немного больше времени. В отдельных случаях, когда высокая мощность луча не нужна, например, при поражении микро-БПЛА, все лазерные оружейные модули могут работать по отдельным целям.

В перспективе 5-10 машин с мощными лазерами могут накрыть «зонтиком» ПРО крупное подразделение, а в случае необходимости объединить лучи и прожечь, например, бронемашину или самолет.

В ходе испытаний немецкий лазер доказал способность наводить несколько лучей на одну цель. В первом испытании 50-киловаттный лазерный луч с расстояния 1000 метров прожиг 15 мм стальную балку. Во втором испытании радар обнаружил БПЛА на расстоянии 3 км и передал данные на 30-киловаттную лазерную пушку, которая с высокой точностью облучила носовую часть беспилотника с расстояния 2 км. В результате через несколько секунд БПЛА был уничтожен. Кроме испытаний по поражению бронированных целей и БПЛА также проводились тестовые стрельбы по металлическому шару диаметром 82 мм, летящему со скоростью 50 м/с (имитация перехвата минометной мины).

18.4.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Утилизация неразорвавшихся боеприпасов, включая разминирование минных полей, самодельных взрывных устройств (СВУ), гранатометных, артиллерийских и минометных снарядов, кассетных бомб на безопасном расстоянии с использованием высокоомощного лазерного излучения, является новым применением лазерных систем направленной энергии.

Особенно остро стоит вопрос разминирования. На рис. 18.17 изображены некоторые из наиболее распространенных мин.

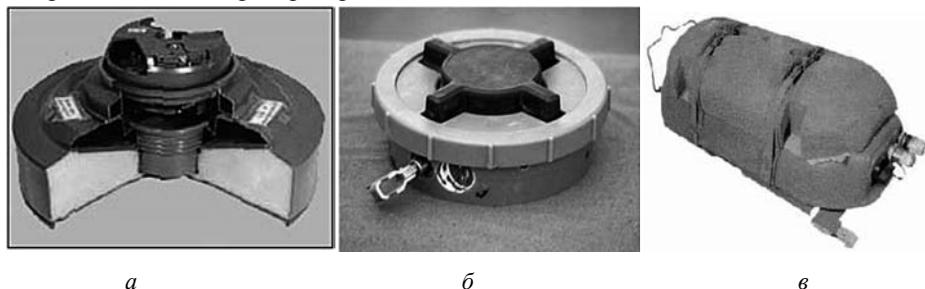


Рис. 18.17

Наиболее часто используемые мины:

а – противотанковая; *б* – противопехотная; *в* – объектная

Этот метод позволяет безопасно, быстро и на заданную глубину вскрывать корпуса боеприпасов из любых материалов в автоматическом режиме. Преимуществами использования лазерной энергии для утилизации боеприпасов является возможность быстрой высокоточной утилизации больших складов оружия с минимальным сопутствующим ущербом и на безопасном расстоянии.

Утилизация действующих боеприпасов с использованием лазерной энергии была впервые продемонстрирована в 1994 году во время тестирования мобильной системы разрушения боеприпасов, в которой применялся 1.1 кВт твердотельный лазер с ламповой накачкой, установленный на бронетранспортер. Система ZEUS изначально использовала 500 Вт лазер; последняя ее версия оснащена 2 кВт волоконным лазером, со сканером наведения и фокусировки луча на объекты, находящиеся на расстояниях 25–300 метров, установленным на крышу адаптированного Humvee (рис. 18.18).



Рис. 18.18

Лазерный комплекс разминирования ZEUS

Для утилизации неразорвавшихся боеприпасов, применялась также тактическая система Laser Avenger, разработанная компанией Boeing (см. рис. 18.12, *a*) и изначально предназначенная для борьбы с БПЛА. С её помощью были успешно утилизированы несколько типов самодельных взрывных устройств, крупнокалиберных артиллерийских боеприпасов и мин. Комплекс работает на безопасном расстоянии от мишеней при различных условиях, в том числе под разными углами и расстояниями.

Даже при ограниченной мощности такие лазерные системы оказываются востребованными для решения конкретных задач в критических ситуациях.

18.5.

НЕЛЕТАЛЬНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ОРУЖИЕ

Нелетальное оружие используют в качестве сопутствующего оружия, позволяющего увеличить суммарную мощь силовых ведомств для противодействия и предотвращения враждебных действий. Особенно эффективно оно в ситуациях, когда использование летального оружия ограничено или запрещено в силу каких-

либо причин. Примерами нелетального оружия являются средства ограничения эскалации и временно отключающие средства и оборудование. Нелетальное оружие, такое как лазерные ослепляющие средства «даззлер» (dazzler), может быть использовано для борьбы с мятежниками, террористами, разгона демонстраций и в целях защиты инфраструктурных объектов.

Лазерные даззлеры появились как новая несмертельная альтернатива летальному оружию для правоохранительных органов, сил внутренней безопасности, пограничных войск, береговой охраны, охраны инфраструктур и множества других сценариев конфликтов низкой интенсивности.

Лазерный даззлер испускает лазерный луч высокой интенсивности в видимом диапазоне, как правило, в сине-зеленой области для временного ослабления зрения противника, не причиняя долгосрочного вреда и травм глазам объекта. Наиболее часто для этого используется длина волны 532 нм, которую генерируют лазерные диоды или Nd:YAG-лазеры с удвоением частоты.

Рис. 18.19, *а* иллюстрирует использование лазерного даззлера в ближнем бою, а рис. 18.19, *б* демонстрирует использование лазерной даззлер – системы, которая установлена на платформу HAMVEE и предназначена для разгона манифестаций.



Рис. 18.19

Лазерные ослепляющие системы:

а – даззлер ближнего боя; *б* – даззлер на мобильной платформе

Выбор параметров производительности, таких как мощность лазера, размер пятна на цели и плотность мощности, производится в зависимости от поставленной задачи. Формирующая оптика предназначена для достижения номинального расстояния, при котором достигается требуемый уровень воздействия на глаза, и плотности мощности излучения на цели. Эти значения не должны превышать предельно допустимые уровни (ПДУ), оговоренные в специальных регламентирующих документах.

Дополнительно портативные лазеры могут использоваться для подачи сигналов предупреждения, бедствия, как средство обмена информацией при ведении разведывательных операций за счет узконаправленного излучения на больших расстояниях. *Слепящие лазеры* используются как оружие несмертельного действия. Их использование в военных целях впервые зафиксировано в Фолклендской войне.

Лазерные даззлеры сегодня рассматриваются в качестве потенциального кандидата для предупреждения экипажей коммерческих авиалайнеров или военных летательных аппаратов, нарушающих (намеренно или ненамеренно) зоны, запретные для полетов. Такие системы, состоящие из нескольких объединённых в сеть лазерных даззлер-комплексов и радаров, могут быть эффективно использованы для защиты критически важных объектов инфраструктуры.

Нелетальные лазеры выпускаются в США, Великобритании, Китае. В РФ подобные спецсредства приняты на вооружение МВД и выпускаются серийно.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 18

18.1. Основные преимущества лазерных систем направленной энергии включают в себя световую скорость доставки, почти нулевой уровень сопутствующих повреждений, одновременно множественное поражение цели или способность быстрого перенацеливания, устойчивость к электромагнитным помехам, отсутствие влияния силы тяжести.

18.2. Хотя первоначальные затраты, связанные с разработкой и изготовлением лазерного оружия, на порядки выше, чем для систем кинетического оружия, однако, эксплуатационные расходы систем направленной энергии незначительны. Это связано с тем, что в то время как обычные системы вооружения являются одноразовыми (пули, снаряды, мины, ракеты), лазерное оружие имеет фактически неограниченный боезапас.

18.3. Лазерные системы имеют ограничения, связанные с необходимостью локализации цели в зоне прямой видимости, требованиями к времени позиционирования лазерного пятна на корпусе цели, проблемами атмосферного ослабления сигнала и турбулентности.

18.4. За прошедшее время были очень сильно продвинуты разработки мощных лазеров, многократно повышена их эффективность, продемонстрированы возможности мобильных реализаций лазерных систем мегаваттного класса. Тем не менее, лазерные системы направленной энергии на сегодняшний день находятся в стадии разработки и совершенствования, и только будущее покажет, смогут ли они стать полноценными боевыми системами.

18.5. Достаточно долгая история позволяет выделить некоторые тенденции дальнейшего развития лазерных систем направленного действия.

18.6. Главные среди них:

- снижение масштаба задач, т.е. выбор менее защищенных целей;
- переход к более коротковолновым лазерам;
- уменьшение мощности непрерывного излучения вместе с ростом КПД источников излучения.

18.7. Преимуществами использования лазерной энергии для утилизации боеприпасов является возможность быстрой высокоточной утилизации больших складов оружия с минимальным сопутствующим ущербом и на безопасном расстоянии.

18.8. Лазерные даззлеры появились как новая несмертельная альтернатива летальному оружию для правоохранительных органов, сил внутренней безопасности, пограничных войск, береговой охраны, охраны инфраструктур и множества других сценариев конфликтов низкой интенсивности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 18

18.1. По каким направлениям развивались стратегические системы ОНЭ? Подчеркните их достоинства и недостатки.

18.2. Перечислите и дайте краткую характеристику стратегическим системам ОНЭ СССР и США.

18.3. В чем особенность тактических комплексов ОНЭ? Сформулируйте их достоинства и недостатки тактических ОНЭ по сравнению с традиционными средствами.

18.4. Приведите примеры нелетального лазерного оружия. Сформулируйте основные цели его применения.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 18

18.1. Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие. – СПб., «Лань». – 2016.

18.2. Зарубин П.В. Лазерное оружие: миф или реальность? Мощные лазеры в СССР и в мире. Владимир, Транзит-Икс, 2009. – 331 с.

18.3. Maini Anil K. Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications. – John Wiley and Sons Ltd., London – Delhi, 2013.

18.4. Рубаненко Ю.В. Военные лазеры России. Научное издание. М.: Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2013. – 390 с.

18.5. Энциклопедия XXI век «Оружие и технологии России». Том XI, «Опτικο-электронные системы и лазерная техника». – М.: ИД «Оружие и технологии», 1999. – 720 с.

18.6. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: Курс лекций: Учеб. руководство. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.

18.7. Jan Stupland Goetz Neunack. Assessment of Long Range Laser Weapon Engagements: The Case of the Airborne Laser, Science and Global Security, 2010, Volume 18, pp. 1-60, Оценка возможности применения лазерного оружия большой дальности в боевых действиях: вариант лазера воздушного базирования, <http://scienceandglobalsecurity.org/ru/archive/sgsr18stup.pdf>.

ГЛАВА 19

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

19.1. МОБИЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Независимо от вида носителя все лазерные комплексы, предназначенные для воздействия на удаленные движущиеся цели, должны иметь в своем составе источник энергии, обеспечивающий функционирование всех систем комплекса, включая основной лазер-излучатель и лазер-подсветчик цели, систему формирования и управления лучом для его наведения и удержания на цели в процессе воздействия, систему поиска, захвата и слежения за целью, а также еще целый ряд вспомогательных систем. В зависимости от конкретных задач, носителей и областей применения комплексы могут существенно видоизменяться и дополняться различным оборудованием, но, тем не менее, приведенная на рис. 19.1 принципиальная схема лазерного комплекса может считаться универсальной.

Примеры компоновок мощных ГДЛ и НХЛ мегаваттного класса на широкофюзеляжных самолетах приведены в главе 18. Такие лазерные комплексы занимают значительные объемы авиалайнеров, причем их большую часть составляют системы хранения топливных компонентов и эвакуации отработанной активной среды.

Используя современные криособционные технологии для утилизации отработанной активной среды можно существенно снизить весогабаритные характеристики лазерных систем, так чтобы разместить их на одном автомобильном шасси. На рис. 19.2 (ил. 13) приведена конструктивная схема непрерывного химического кислородно-йодного лазера мощностью 25 кВт на шасси автомобиля КамАЗ.

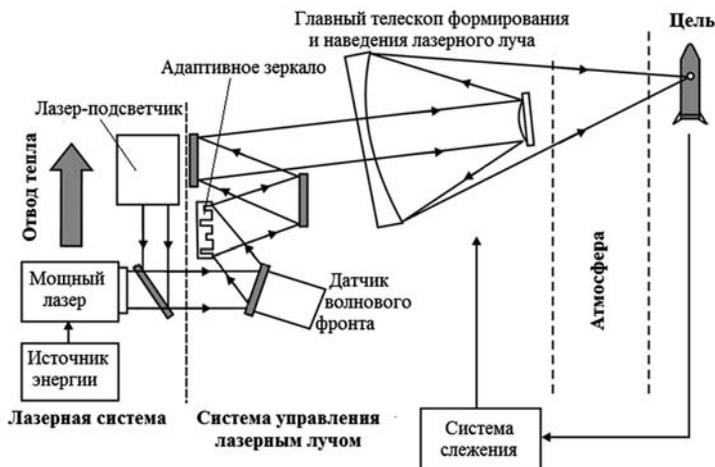


Рис. 19.1
Принципиальная схема лазерного комплекса

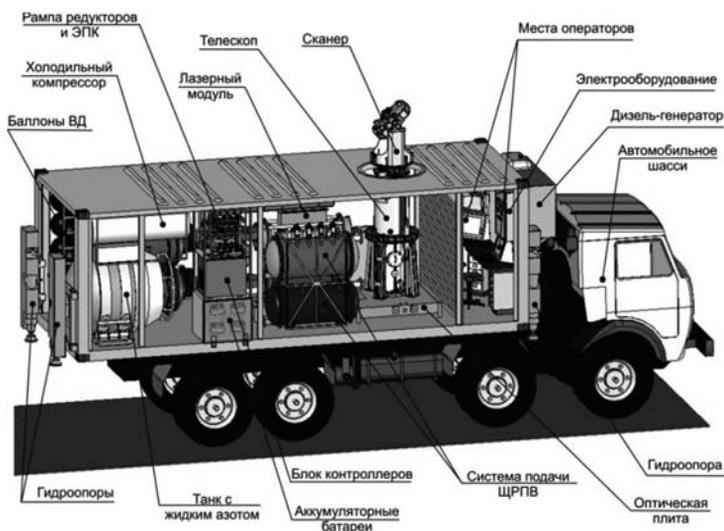


Рис. 19.2
Непрерывный химический кислородно-йодный лазер мощностью 25 кВт (предоставлено НИП «Лазерные системы»)

При этом на едином шасси размещается и отсек управления с рабочими местами операторов. Из-за отсутствия необходимости внешнего источника энергии такой комплекс оказывается даже более компактным, чем твердотельные. Однако его полное время работы не превышает 30 секунд из-за необходимости после этого очистки и захлаживания криосорбера.

В принципе, на автомобильном шасси можно разместить непрерывный ХКЙЛ мощностью порядка 100 кВт. Однако в таком случае для обеспечения работы лазера в течение нескольких минут потребуется существенно увеличить габариты, прежде всего, за счет количества модулей криосорбционной системы (рис. 19.3) и разместить систему управления с операторами на отдельном автомобиле.

ХКЙЛ с криосорбционной системой утилизации отработанного рабочего тела также может быть размещен на тяжелом вертолете (рис. 19.4).



Рис. 19.3
Конструктивная схема 100 кВт ХКЙЛ
(предоставлено НПП «Лазерные системы»)



Рис. 19.4
Конструктивная схема размещения 25 кВт ХКЙЛ на тяжелом транспортном вертолете Ми-26 (предоставлено НПП «Лазерные системы»)

Большой интерес вызывает возможность создания мощных мобильных комплексов на базе твердотельных лазеров. Такие системы более компактны, их кон-

струкция может быть более жесткой и устойчивой к разбюстировкам. При возможном, особенно в реальных боевых условиях, поражении комплексов на основе твердотельных и волоконных лазеров, они не представляют опасности для персонала и окружающей среды. Немаловажным преимуществом для военных систем является и отсутствие необходимости в организации для них специальных служб снабжения и заправки компонентами для создания активной среды, поскольку используемые в качестве источников электроэнергии электрогенераторы работают на обычном автомобильном топливе.

Тактические комплексы на основе твердотельных лазеров средней мощности также можно успешно размещать на автомобильном шасси, как показано, например, на рис. 19.5.

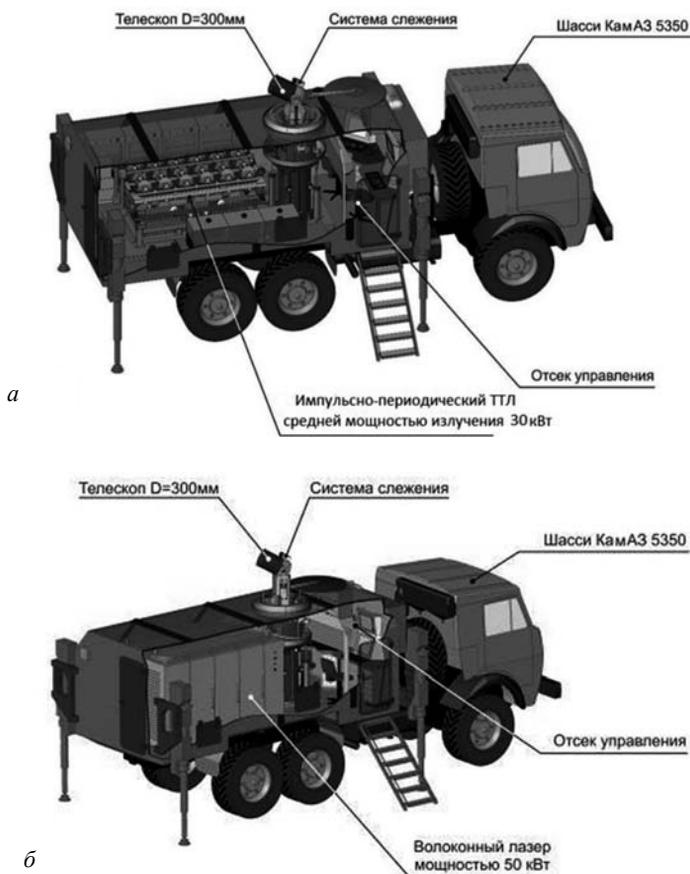


Рис. 19.5

Конструктивная схема импульсно периодического ТТЛ со средней мощностью излучения 30 кВт (а) и волоконного лазера мощностью до 50 кВт на автомобильном шасси (б) (предоставлено НПП «Лазерные системы»)

На единой платформе удастся разместить практически все системы лазера и даже отсек управления с рабочими местами операторов. В отличие от химических лазеров для твердотельных систем нет необходимости решать проблемы хранения запасов компонентов рабочего тела и выхлопа отработанных продуктов. Вместо этого системы должны быть укомплектованы отдельным источником электрической энергии (автономным электрогенератором) мощностью 150–250 кВт, чтобы обеспечить работу всех систем лазерного комплекса.

Электрогенераторы такой мощности с приводом от двигателя внутреннего сгорания или газовой турбины серийно выпускаются промышленностью и являются коммерчески доступными. Естественно, что они должны располагаться на отдельном носителе на достаточном для исключения неизбежных при работе электрогенератора вибраций расстоянии от лазерного комплекса (рис. 19.6).

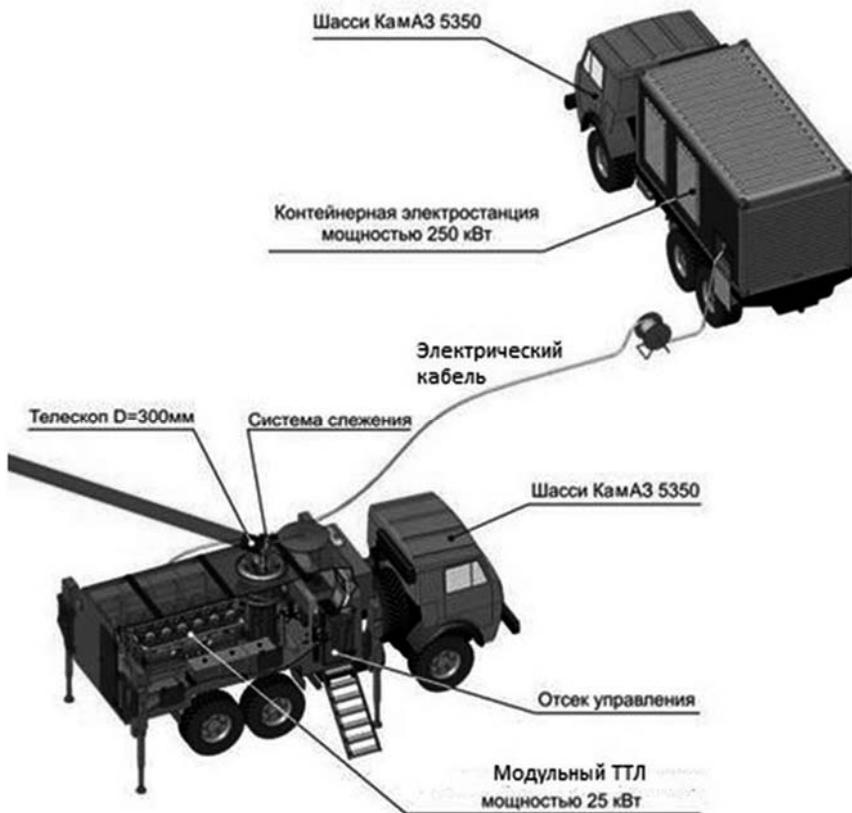


Рис. 19.6

Расположение лазерного комплекса и источника энергии в рабочем положении (предоставлено НПП «Лазерные системы»)

19.2. СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И НАВЕДЕНИЯ ЛУЧА

Формирующий телескоп: формирование лазерного луча заданной апертуры для концентрации излучения на цели обеспечивается телескопом. Типичная конструкция телескопа с апертурой (диаметром главного зеркала) около полуметра (в качестве примера выбрана разработка компании «Лазерные системы») приведена на рис. 19.7.

Телескоп с диаметром главного зеркала 0.5 м состоит из зеркального объектива с перемещаемым вторичным зеркалом. Главное зеркало телескопа закреплено через центральный стакан в оправе, являющейся одновременно основанием всего телескопа, и устанавливается на оптическом столе.

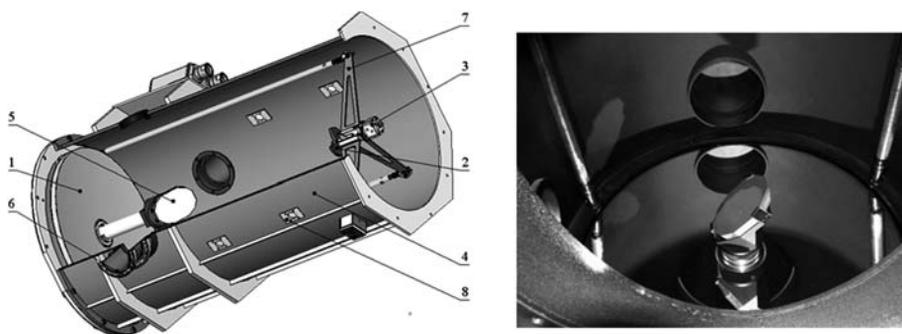


Рис. 19.7

Формирующий телескоп:

- 1 – главное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3 – механизм перефокусировки,
4 – корпус телескопа, 5 – зеркало углового корректора, 6 – канал ввода излучения,
7 – пилоны, 8 – окна для установки юстировочных элементов
(предоставлено НПП «Лазерные системы»)

Зеркальный объектив афокальный, выполнен по схеме Мерсена. Узел вторичного зеркала крепится к корпусу при помощи подвеса, который обеспечивает необходимую растяжку спайдеров и смещение узла вторичного зеркала вдоль оптической оси относительно корпуса при воздействии температурных полей, отличных от условий сборки.

Стабильность расстояния между центрами главного и вторичного зеркал при стационарном положении узла перемещения контррефлектора обеспечивается термостабилизаторами из инваровых стержней. Перестройка фокусного расстояния осуществляется путем перемещения малого зеркала. Диапазон перефокуси-

ровки составляет от 500 м до ∞ при перемещении зеркала в диапазоне 0–5 мм с точностью ± 0.05 мм.

Наведением луча можно управлять двумя способами (рис. 19.8):

- поворотом зеркал, устанавливаемых после неподвижного телескопа (целостат, гелиостат);
- поворотом телескопа, закрепленного в специальном подвесе.

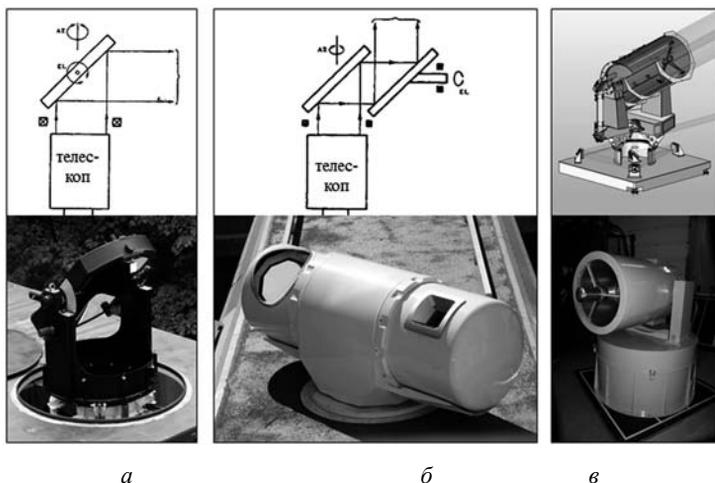


Рис. 19.8

Оптические системы формирования и прецизионного управления лучом мощного лазера: *а* – гелиостат $\varnothing 0.5$ м; *б* – целостат $\varnothing 0.35$ м; *в* – телескоп с независимым подвесом ($\varnothing 0.8$ м) (предоставлено НПП «Лазерные системы»)

Каждый способ имеет свои достоинства и недостатки, а критическими параметрами оказываются размер апертуры лазера и необходимый диаметр главного зеркала телескопа (табл. 19.1).

Первый способ управления лучом (управляемые зеркала за телескопом) имеет преимущества при сравнительно небольших диаметрах выходной апертуры, тогда для широкоапертурных систем более подходящим может оказаться второй способ.

Окончательный выбор должен определяться всем объемом требований к мобильному комплексу, однако принципиальные тенденции, обобщенные в табл. 19.1, можно использовать для предварительных оценок.

Поскольку развитие мощных лазеров начиналось с длинноволновых систем, требующих телескопов больших диаметров, то применение в системах управления поворачивающихся телескопов казалось разумным. Однако, у ТГЛ и ХКЙЛ дифракционный предел существенно ниже, чем в HF(DF)-лазерах, поэтому для мобильных систем тактического назначения достаточно полуметровой и даже

меньшей по диаметру выводной оптики. А в таком случае неподвижный телескоп со сканером в определенных случаях становится весьма привлекательным.

Таблица 19.1

Принципиальные методы управления наведением лазерного луча

Тип системы	Достоинства	Недостатки
Поворотное зеркало за формирующим телескопом (целостат, гелиостат)	<ul style="list-style-type: none"> - разделение функций формирования и управления лазерным лучом; - пригодна любая форма апертуры; - минимальное число высоконагруженных зеркал транспортной оптики для ввода излучения в телескоп; - отсутствие ограничений на высоту телескопа 	<ul style="list-style-type: none"> - высокие требования к точности позиционирования управляемого зеркала. Требуемая угловая точность позиционирования зеркала сканера вдвое выше, чем для поворачивающегося телескопа; - большие размеры плоских зеркал; - высокие требования к поворотному зеркалу
Поворачивающийся формирующий телескоп	<ul style="list-style-type: none"> - широкий угловой диапазон; - не слишком жесткие требования на точность позиционирования систем зеркал ввода в телескоп и, соответственно, к их вибрации; - большой технологический опыт разработки подобных схем 	<ul style="list-style-type: none"> - большое количество дополнительных высоконагруженных зеркал для ввода излучения в телескоп; - большой момент инерции при вращении телескопа; - необходимость использования апертуры только круглой формы

При движении, ударах и вибрациях в процессе эксплуатации бортовая оптика испытывает серьезные нагрузки. Например, ускорения для наземных систем могут достигать $6g$, а для воздушных и космических лазеров они могут оказаться еще большими. Особенно серьезными в этом случае оказывается обеспечение стабильных геометрических характеристик крупногабаритных зеркал и сохранение точности в подвижных узлах самых массивных элементов конструкции – телескопа или сканера. Для этого зеркала изготавливаются максимально облученными и закрепляются с особыми разгрузками (рис. 19.9).

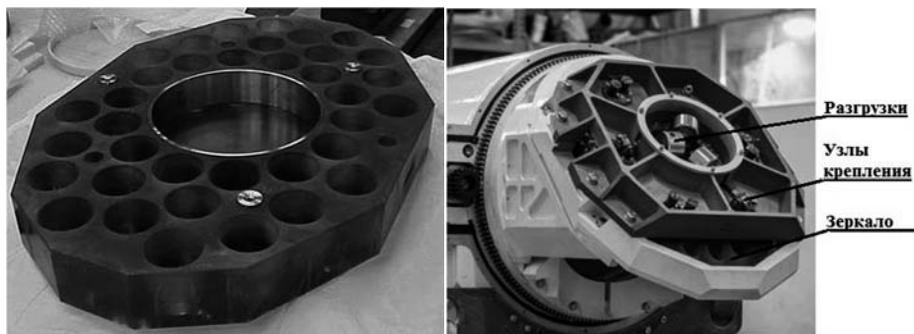


Рис. 19.9
Сборка сканера и облегченное плоское зеркало
(предоставлено НПП «Лазерные системы»)

19.3.

СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

*С*истема обнаружения обычно находится вне лазерного комплекса и включает радиолокационную станцию (РЛС), способную обнаруживать и отслеживать потенциальные цели на дистанциях, превышающих возможности оптических систем. Однако в некоторых случаях удастся совместить всю систему слежения на одной платформе рис. 19.10 (ил. 14).

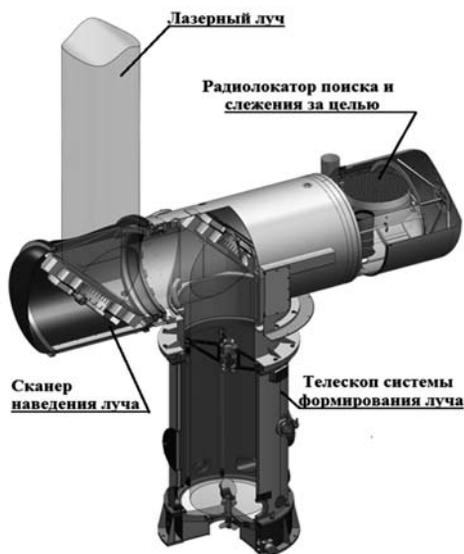


Рис. 19.10
Компоновка РЛС
на оптическом сканере
лазерного комплекса
(предоставлено НПП
«Лазерные системы»)

Сканер обеспечивает обзор всей верхней полусферы с помощью РЛС. Современные бортовые РЛС с активной фазированной антенной решёткой (АФАР) компактны, способны обнаруживать цели за десятки километров в условиях ограниченной видимости и одновременно отслеживать несколько целей. Однако важнейшим достоинством АФАР является возможность электронного сканирования в широком диапазоне углов, что позволяет после обнаружения цели вести ее до входа в зону видимости и надежно передать ее оптической системе наблюдения без излишних перемещений сканера.

Системы оптического наблюдения за целью включают телевизионную систему широкого поля зрения, тепловизор и телекамеру точного позиционирования.

Телевизионная система широкого поля зрения предназначена для наблюдения за целями и передачи информации в систему позиционирования. Угол поля зрения камеры составляет обычно порядка 5° – 7° (0.12 рад), а ее расположение на сканере почти полностью определяется конструктивными соображениями. Телевизионная система широкого поля зрения крепится на корпус сканера или телескопа.

Разрешение телевизионной системы широкого поля зрения должно обеспечивать обнаружение, захват и распознавание цели на расстояниях, не менее расчетной дальности поражения и находящейся в зоне прямой видимости, а также позволять совместить ось телескопа с направлением на цель с точностью не хуже 1 мрад. Эта величина определяется возможностью прецизионного управления лучом только с помощью системы точного позиционирования без ухудшения диаграммы направленности и оптического качества лазерного луча. При этом массивный сканер остается неподвижным. Отсюда следует, что телевизионной системы широкого поля зрения с матрицей 1024×1024 пикселей вполне достаточно.

Тепловизор позволяет визуализировать область наблюдения в условиях слабой освещенности.

Наилучшая позиция видеокамеры точного позиционирования непосредственно на оптической оси телескопа в зоне, свободной от основного излучения. В качестве объектива телекамеры точного позиционирования возможно использование самого фокусирующего телескопа. Это решает задачу совмещения осей камеры и телескопа и уменьшает влияние ветра.

Поле зрения системы точного позиционирования составляет 7 мрад, что как минимум в 2 раза превышает требуемый угловой размер в зоне использования. Изображение пятна лазерного излучения на поверхности цели регистрируется матрицей с разрешением 512×512 точек.

Система точного позиционирования используется в управлении характеристиками лазерного луча для обеспечения требуемой точности направленности лазерного излучения и уровня интенсивности излучения на цели. Элементы системы приведены на оптической схеме системы формирования и управления из-

лучением лазера на рис. 19.11. Основой системы являются зеркало углового корректора линии визирования и адаптивное зеркало корректировки волнового фронта (исправления аберраций).

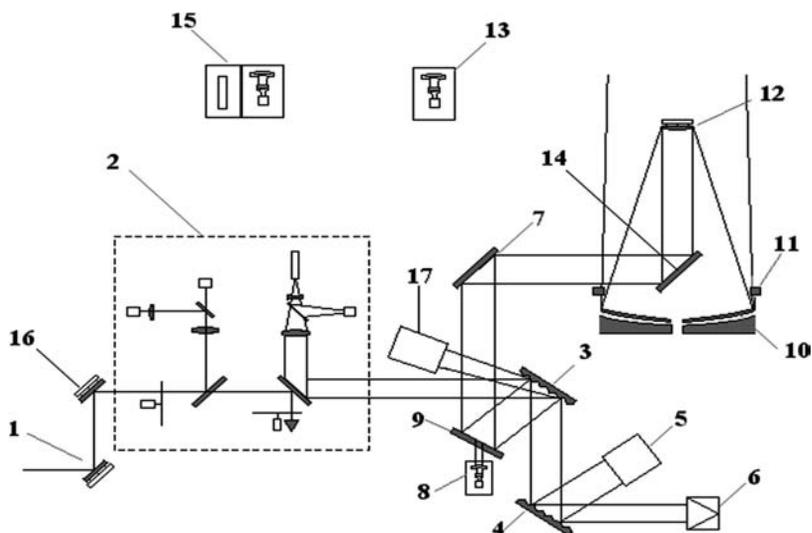


Рис. 19.11

Система точного позиционирования:

- 1 - зеркало ввода луча в систему формирования, 2 – блок предварительной юстировки,
- 3 - решетка-ответвитель луча, 4 - решетка-ослабитель, 5 - датчик волнового фронта (датчик Гартмана), 6 - измеритель мощности, 7 - поворотные зеркала оптического шарнира,
- 8 - видеокамера системы точного позиционирования,
- 9 - зеркало с центральным отверстием,
- 10 - главное зеркало телескопа, 11 - автоколлимационное зеркало,
- 12 - вторичное зеркало телескопа с угловым корректором,
- 13 - телекамера широкого поля зрения, 14 - зеркало ввода излучения в телескоп,
- 15 - дальномер, 16 - зеркало углового корректора луча лазера,
- 17 - датчик волнового фронта излучения, вернувшегося из зоны использования

Зеркало углового корректора линии визирования предназначено для точного позиционирования лазерного луча на цели. В общем случае лазер с резонатором и фокусирующий телескоп могут располагаться на разнесенных в пространстве платформах. В этом случае возможны динамические отклонения в положении платформ и, следовательно, неприемлемые отклонения оси входящего в систему точного позиционирования луча. Угловой корректор должен обеспечивать динамическую стабилизацию направленности лазерного луча,

компенсируя возможные отклонения при передаче луча из резонатора и совмещая его с линией визирования телескопа.

Управление зеркалом углового корректора осуществляется за счет узла крепления на пьезокерамических держателях по сигналам системы управления, анализирующей данные телекамеры точного позиционирования линии визирования телескопа. Применение зеркала углового корректора стабилизирует направленность луча с точностью до нескольких микрорадиан.

Адаптивное зеркало корректировки волнового фронта. При необходимости, исправление аберраций может осуществляться адаптивным зеркалом. Реальная картина искажений регистрируется двумя датчиками волнового фронта. Один предназначен для анализа волнового фронта излучения лазера (датчик Гартмана), другой анализирует волновой фронт, возвратившийся из зоны использования. Вся информация об искажениях волнового фронта совместно обрабатывается системой управления. На адаптивном зеркале происходит обращение волнового фронта за счет микроперемещений его поверхности, компенсирующее суммарные искажения, измеренное обоими датчиками.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 19

19.1. Независимо от вида носителя все лазерные комплексы, предназначенные для воздействия на удаленные движущиеся цели, должны иметь в своем составе источник энергии, обеспечивающий функционирование всех систем комплекса, включая основной лазер-излучатель и лазер-подсветчик цели, систему формирования и управления лучом для его наведения и удержания на цели в процессе воздействия, систему поиска, захвата и слежения за целью, а также целый ряд вспомогательных систем.

19.2. Используя современные криосорбционные технологии для утилизации отработанной активной среды, можно существенно снизить весогабаритные характеристики лазерных систем, чтобы разместить их на одном автомобильном шасси.

19.3. Для мобильных систем тактического назначения достаточно полуметровой и даже меньшей по диаметру выводной оптики. В таком случае неподвижный телескоп со сканером в определенных случаях становится весьма привлекательным.

19.4. Формирование лазерного луча заданной апертуры для концентрации излучения на цели обеспечивается телескопом.

19.5. При движении, ударах и вибрациях в процессе эксплуатации бортовая оптика испытывает серьезные нагрузки. Особенно серьезными в этом случае оказывается обеспечение стабильных геометрических характеристик крупногабарит-

ных зеркал и сохранение точности в подвижных узлах самых массивных элементов конструкции – телескопа или сканера.

19.6. На адаптивном зеркале происходит обращение волнового фронта за счет микроперемещений его поверхности, компенсирующее суммарные искажения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 19

19.1. Объясните принцип работы мобильного тактического комплекса ОНЭ на основе конструктивной схемы.

19.2. Принцип работы систем формирования лазерного излучения. Их достоинства и недостатки.

19.3. Дайте краткую характеристику и сформулируйте основные цели и задачи вспомогательных лазерных систем.

19.4. Сформулируйте основные принципы учета расходимости лазерного излучения в атмосфере с точки зрения военного применения.

19.5. Опишите виды оптических систем формирования и прецизионного управления лучом мощного лазера.

19.6. Опишите состав оптических систем наблюдения за целью и систем точного позиционирования.

19.7. Сформулируйте ваше мнение о перспективах использования систем ОНЭ на театре военных действий.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 19

19.1. Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие. – СПб., «Лань». – 2016.

19.2. Зарубин П.В. Лазерное оружие: миф или реальность? Мощные лазеры в СССР и в мире. – Владимир, "Транзит-Икс", 2009. – 331 с.

19.3. Maini Anil K. Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications. – John Wiley and Sons Ltd., London – Delhi, 2013.

19.4. Рубаненко Ю.В. Военные лазеры России. Научное издание. – М.: Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2013. – 390 с.

19.5. Энциклопедия XXI век «Оружие и технологии России». Том XI, «Опτικο-электронные системы и лазерная техника». – М.: ИД «Оружие и технологии», 1999. – 720 с.

ГЛАВА 20

ЛАЗЕРНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

К лазерным инструментам относятся системы, используемые для выполнения измерений или функциональные датчики. В военных целях такие лазерные системы используются для наведения или целеуказания, дальнометрии (определения расстояния до цели), управления боевыми средствами (датчики сближения), обнаружения, сопровождения и визуализации целей (лазерные радары), противодействия электронно-оптическим средствам противника, лазерной батиметрии для 3D-мониторинга морского шельфа, лидаров дистанционного обнаружения и идентификации химических, биологических и взрывоопасных веществ в атмосфере.

20.1.

СПОСОБЫ ВЫСОКОТОЧНОГО НАВЕДЕНИЯ СНАРЯДА НА ЦЕЛЬ

В системах высокоточного оружия могут применяться три способа точного наведения снаряда на цель: пассивный, полуактивный и активный (рис. 20.1).



Рис. 20.1

Три способа высокоточного наведения

Под активным самонаведением понимают такой способ управления, в котором как источник зондирующего сигнала, облучающего цель, так и приемник отраженного от цели сигнала размещаются на снаряде. Такой снаряд в полете абсолютно автономен, и для его наведения не требуется внешних систем, облучающих цель.

При полуактивном наведении цель облучается источником, расположенном вне снаряда, а отраженный от цели сигнал принимается приемным устройством снаряда. Излучатель может быть расположен на земле, на корабле или на самолете.

Зондирующий сигнал такого излучателя значительно интенсивнее, чем при активном наведении, так как излучатель должен быть более мощным. Поэтому дальность действия полуактивных систем наведения больше, чем активных. Кроме того, бортовая аппаратура снаряда в этом случае легче и проще. Вследствие этого полуактивный способ наведения получил широкое распространение.

Под пассивным самонаведением понимают такой способ управления, при котором приемная аппаратура, установленная на снаряде, анализирует излучение, приходящее от самой цели и никакого зондирующего сигнала не требуется. Преимущество пассивного наведения заключается в относительной простоте аппаратуры, размещаемой на снаряде. Недостатком является зависимость наведения от мощности и направленности излучения самой цели.

Лазерное целеуказание относится к полуактивным способам наведения снаряда на цель.

20.2.

ЦЕЛЕУКАЗАТЕЛИ ДЛЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

Современные лазерные целеуказатели способны увеличить эффективность стрельбы в несколько раз. Они устанавливаются на оружейный прицел, с его помощью на мишени высвечивается конечная точка вхождения пули. Лазерные целеуказатели отлично используются в боевых условиях, на охоте и в спорте. Применение этих устройств позволяет даже непрофессионалам точно попадать в цель. В темное время суток лазерный целеуказатель служит дополнительным средством освещения и помогает идентифицировать объект.

В лазерных целеуказателях для стрелкового оружия, как правило, используются непрерывные полупроводниковые лазеры, излучающие в видимом или ИК-диапазоне, мощностью 5–10 мВт. Чаще всего это красные лазерные диоды, излучающие на 635 или 650 нм. Можно применять и твердотельный лазер с диодной накачкой, излучающий на длине волны 532 нм. Одним из ограничений использо-

вания лазеров видимого диапазона для прицеливания является видимость излучения невооруженным глазом, что, таким образом, нарушает скрытность операции.

Целеуказатель юстируется так, чтобы лазерный луч шел параллельно стволу. В связи с чрезвычайно низкой расходимостью лазерного луча, он способен создать очень небольшое пятно даже на большом расстоянии – до сотен метров.

В качестве примера на рис. 20.2 представлен лазерный целеуказатель ЛЦУ-ОМ-3Л-4, выпускаемый тульской компанией «ЭСТ».

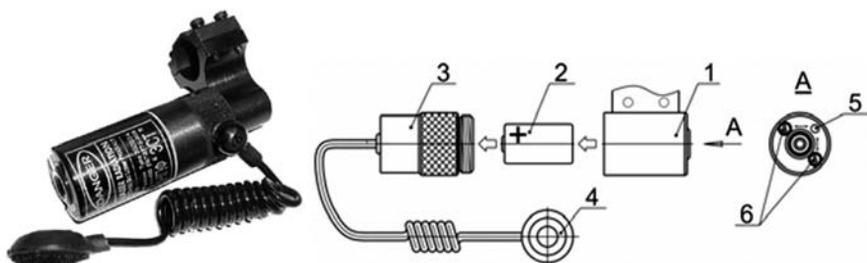


Рис. 20.2

Лазерный целеуказатель ЛЦУ-ОМ-3Л-4 (компания «ЭСТ»)

Конструктивно ЛЦУ-ОМ-3Л-4 состоит из цилиндрического корпуса (1), на котором жестко крепится установочный кронштейн, батареи питания (2), задней крышки (3), гибкого кабеля с кнопкой включения (4). На передней части корпуса ЛЦУ-ОМ-3Л-4 находятся два регулировочных винта (6) и метка для ориентирования (5). Задняя крышка является отсеком питания ЛЦУ. Длина волны лазерного излучения 0,635 мкм, мощность лазера не менее 4 мВт, диаметр светового пятна на 25 метров не более 25 мм.

В последнее время используют и инфракрасные диодные лазеры, для получения пятна на цели, невидимого невооруженным глазом. Прицеливание осуществляется с помощью прибора ночного видения, как правило, установленного на огнестрельное оружие.

На российском и международном рынке представлено большое количество образцов лазерных целеуказателей для стрелкового оружия всех видов.

20.3.

ВЫСОКОТОЧНОЕ НАВЕДЕНИЕ УДАРНЫХ БОЕПРИПАСОВ

Благодаря возможности наносить высокоточный удар, боеприпасы с лазерным наведением (бомбы, снаряды и ракеты) являются одними из наиболее широко используемыми высокоточными ударными боеприпасами на различных платформах наземного, морского и воздушного базирования, таких как танки, боевые

машины, корабли, истребители и ударные вертолеты. Оружие с этими системами наведения показало свою эффективность и поражающую способность во всех недавних конфликтах.

Это самое современное оружие имеет огромную практическую ценность и важное тактическое значение в современных сценариях боя. Все электрооптические системы наведения ударных боеприпасов основаны на использовании оптоэлектронного датчика положения, который отслеживает точное положение ракеты относительно цели в реальном времени и вырабатывает командные сигналы управления и корректировки боеприпаса. Система сервоприводов, управляющая плоскостями, обеспечивает сохранение боеприпасом своей ориентации в заданном направлении и нанесении точного удара.

На рис. 20.3 показаны конструктивные особенности оружия с лазерным наведением.

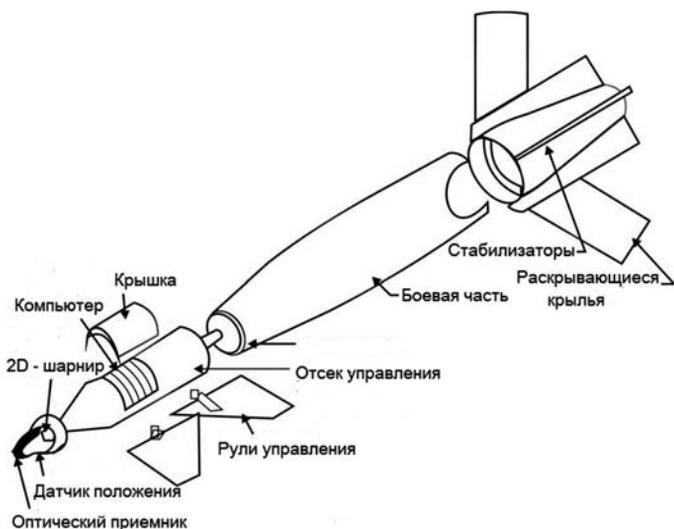


Рис. 20.3

Конструктивная схема боеприпаса с лазерным наведением

При операциях доставки боеприпасов с лазерным наведением цель подсвечивается целеуказателем с помощью импульсного твердотельного лазера, генерирующего высокие пиковые импульсы энергии с определенной частотой повторения импульса (ЧПИ). Пиковая мощность, длительность импульса и ЧПИ, как правило, лежат в диапазоне 5–8 МВт, 10–20 нс и 5–20 Гц соответственно. Лазерные головки самонаведения (ГСН) используют рассеянное от цели лазерное излучение для получения информации об угловой ошибке, которая в свою очередь используется для генерации командных сигналов, необходимых, чтобы направить боеприпас к источнику рассеяния, который и является целью (рис. 20.4).

В качестве оптического приемника (рис. 20.4), как правило, используют квадрантные фотодетекторы. В некоторых случаях может использоваться 2D-матрица фотодатчиков. На рис. 20.5 показана принципиальная схема квадрантного фотодатчика, когда он используется для позиционирования.

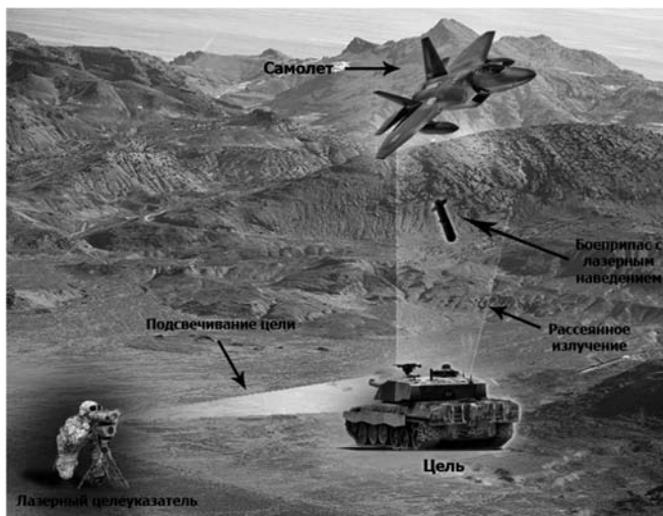


Рис. 20.4

Подсвечивание цели при помощи лазерного целеуказателя с последующим направлением боеприпаса к источнику рассеяния

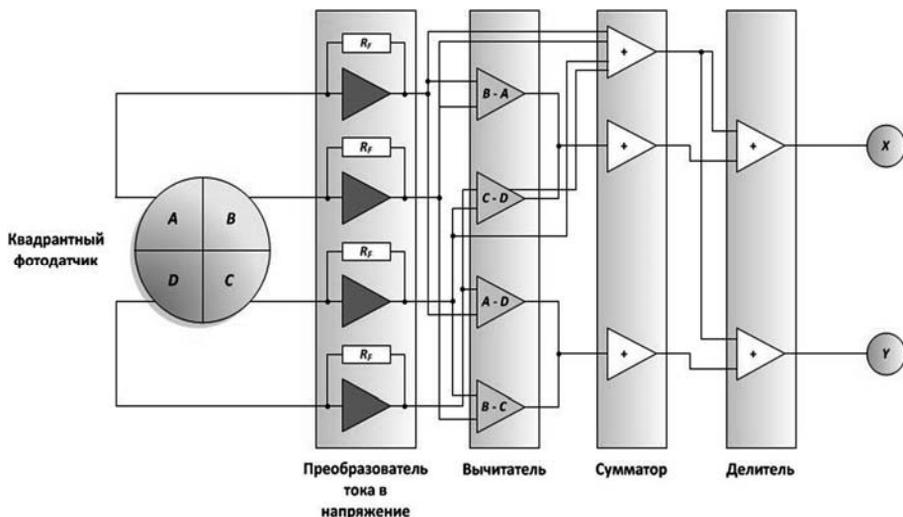


Рис. 20.5

Принцип работы квадрантного фотодатчика

Квадрантный фотодатчик помещается перед фокальной плоскостью передней оптики. Фокусное пятно симметрично относительно центра квадрантного фотодатчика, когда фокальная плоскость детектора параллельна оси лазерного излучения, рассеянного от намеченной цели, как показано на рис. 20.6, *а*. Это тот случай, когда боеприпас направлен точно на цель. Если же рассеянное лазерное излучение попадает в лазерную ГСН под углом, образуя поперечное сечение, это значит, что боеприпас не направлен в сторону намеченной цели, и центр сфокусированного лазерного пятна сместится, в зависимости от угловой ошибки по азимуту и высоте, как показано на рис. 20.6, *б* – *д*.

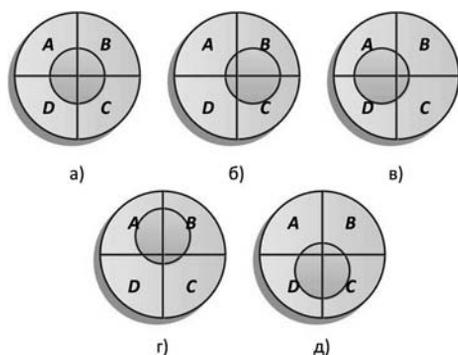


Рис. 20.6

Расположение сфокусированного пятна на фотодетекторе

Положение луча в X - и Y -направлениях рассчитываются при помощи уравнений (20.1) и (20.2), соответственно, где X и Y представляют собой значения угловых ошибок в направлениях по азимуту и углу места, рассчитанные как:

$$X = \frac{(B+C)-(A+D)}{A+B+C+D}, \quad (20.1)$$

$$Y = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D}, \quad (20.2)$$

где A , B , C и D являются электрическими напряжениями, соответствующими мощности лазера, падающего на четыре квадранта.

В случае если боеприпас точно направлен в сторону мишени, все четыре уровня мощности равны и, следовательно, $X=0$ и $Y=0$. Сумма $A+B+C+D$ представляет собой общую мощность. Деление на общую мощность гарантирует, что рассчитываемая ошибка определения местоположения не зависит от колебаний интенсивности лазерного излучения.

Выходные аналоговые сигналы, пропорциональные величине мощности лазера, падающего на четыре квадранта, оцифровываются и затем обрабатываются для вычисления X и Y . Сигналы ошибки X и Y используются для наведения бое-

припаса на нужную позицию приведением их к нулю при помощи переднего горизонтального оперения, управляемого сервоприводами.

Максимальное значение поля зрения лазерной ГСН по X и Y направлениям пропорционально $\pm R$, где R – радиус сфокусированного лазерного пятна. Большой размер пятна дает больший обзор, но меньшее угловое разрешение. Максимальной радиус сфокусированного пятна равен половине площади квадранта активной зоны.

В случае 2D-массива датчиков каждый активный элемент массива идентифицируется по уникальным значениям азимута и угла места. Сфокусированное пятно в любой момент времени покрывает более чем один активный элемент и угловые ошибки по азимуту и углу места вычисляются из уравнений (20.3) и (20.4).

$$X = n \cdot \Theta + \frac{(B+C)-(A+D)}{A+B+C+D}; \tag{20.3}$$

$$Y = m \cdot \Theta + \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D}, \tag{20.4}$$

где Θ – пропорциональное поле зрения каждого миниатюрного элемента квадранта, а n и m – константы, зависящие от освещаемого квадранта.

Рис. 20.7 объясняет этот подход.

Основные параметры лазерных боеприпасов включают:

- чувствительность;
- поле зрения;
- совместимость ЧПИ кодов;
- линейность ответа.

При оценке эффективности боеприпасов с лазерной ГСН также важны устойчивость к ложным кодам и ответ на нужный код в присутствии ложного кода.

Чувствительность – это минимальное значение плотности мощности лазерного излучения, падающего на поперечное сечение ГСН в плоскости, ортогональной к оптической оси ГСН, на которое ГСН способна удовлетворительно реагировать.

Это характеристика фронтальных оптики и фотодатчиков. Чувствительность ГСН определяет максимальную дальность наведения при известных значениях параметров лазерного целеуказателя, таких как коэффициент от-

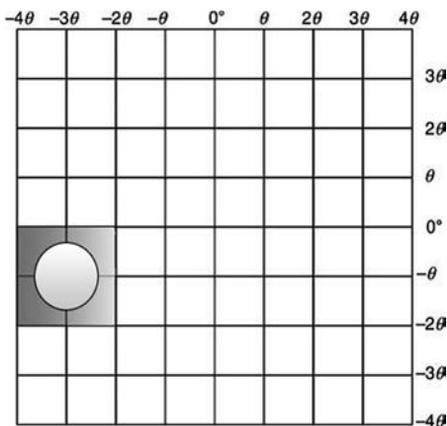


Рис. 20.7
Принцип действия 2D-матрицы приемных элементов

ражения цели, высота лазерного целеуказателя (в случае воздушного лазерного целеуказателя) и лазерной ГСН над уровнем моря, погодные условия видимости.

Поле зрения определяет вероятность ЛГСН выделить на фоне помех нужную цель и захватить её на максимальной дальности наведения. Снаряды с лазерными ГСН с большим полем обзора имеют более высокую вероятность корректного захвата и, следовательно, поражения предназначенной цели.

Перед тем как лазерная ГСН захватит рассеянное излучение, необходимо убедиться, что это излучение рассеянно именно от цели. Для этого лазерный целеуказатель и лазерная ГСН используют один и тот же код ЧПИ. Проверка совместимости ЧПИ формирует основу для идентификации излучения. Код ЧПИ обычно выбирают с точностью $\pm(1...2)$ мкс в интервале времени между двумя последовательными лазерными импульсами номинального значения, которое обычно находится в диапазоне 50...200 мс. Датчик положения ГСН определяет ориентацию боеприпаса по отношению к мишени. Однако перед этим ГСН сверяет коды ЧПИ принимаемого излучения и только потом приступает к дальнейшей обработке, чтобы извлечь информацию об угловом положении по отношению к мишени, в случае если коды ЧПИ совпадают с заданной точностью.

Совместимость ЧПИ кодов является основным требованием для лазерных ГСН. Это требование состоит в возможности быстрого сравнения полученного кода ЧПИ, рассеянного от цели лазерного излучения и запрограммированного перед началом операции ЧПИ кода (в пределах определенного допуска). ЧПИ код является временным интервалом между двумя последовательными лазерными импульсами, и измеряется в миллисекундах с точностью до третьего знака после запятой. Два кода считаются совпавшими, если разница двух кодов меньше определенного указанного значения. Линейность ответа преимущественно определяет вероятность круговой ошибки (ВКО).

Иммунитет к ложным кодам ЧПИ и возможность захватить цель с нужным кодом в присутствии ложных кодов значительно повышают вероятность поражения цели. Настройка ГСН осуществляется путем облучения ГСН излучением с кодом ЧПИ, отличающимся от запрограммированного кода, а после этого путем облучения ГСН излучениями с правильным и ложным кодами ЧПИ одновременно.

Кроме показанного на рис. 20.4, существуют и другие сценарии применения боеприпасов с лазерными ГСН. Так, на рис. 20.8 лазерный целеуказатель и бомба с лазерным наведением расположены на двух разных самолетах.

Цель может быть подсвечена с земли, и управляемый боеприпас также запускается с наземной платформы (например, пушка со снарядами с лазерным наведением). Такая схема изображена на рис. 20.9.

Наконец, лазерное целеуказание и доставка лазерного боеприпаса может быть осуществлена с одной платформы, как показано на рис. 20.10.

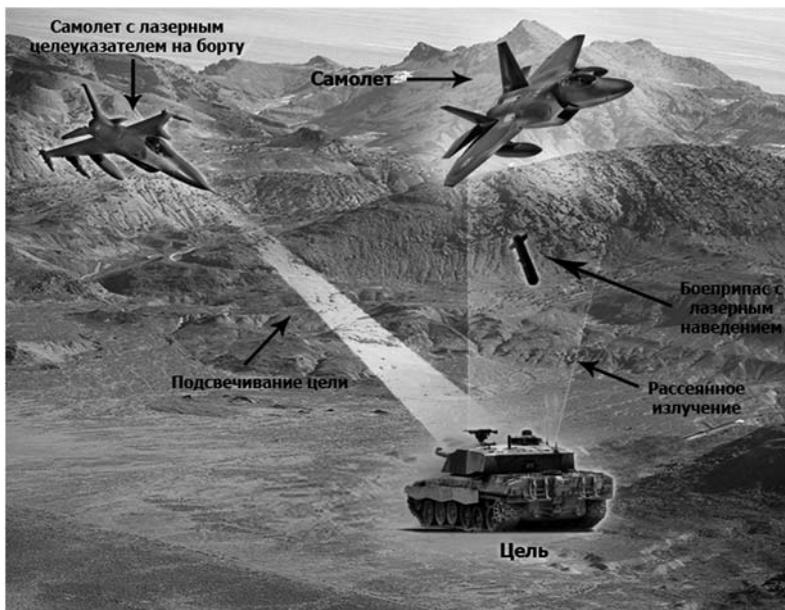


Рис. 20.8

Подсвечивание цели при помощи самолета с целеуказателем на борту



Рис. 20.9

Подсвечивание цели и запуск боеприпаса с наземной платформы



Рис. 20.10

Лазерное целеуказание и доставка лазерного боеприпаса с одной бортовой платформы

20.4.

ЦЕЛЕУКАЗАТЕЛИ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО ОРУЖИЯ

Лазерные целеуказатели для наземных систем высокоточного оружия предназначены для обеспечения артиллерийской и ракетной стрельбы обычными и управляемыми боеприпасами с полуактивным способом наведения.

Основные задачи целеуказателя-дальномера в боевых условиях:

- оптическая разведка целей на местности;
- измерение сферических координат (дальность, дирекционный угол и угол места) целей и разрывов боеприпасов;
- целеуказание (лазерный подсвет цели) при наведении управляемых артиллерийских боеприпасов.

В современных лазерных целеуказателях используют Nd:YAG-лазеры с длиной волны 1064 нм в режиме модуляции добротности резонатора. Как правило, целеуказатели имеют канал дальнометрии либо на той же длине волны 1064 нм, либо на безопасный для глаз на длине волны 1540 нм.

Существуют портативные лазерные целеуказатели для ручного вооружения, а также для наземных и воздушных платформ. Типичные технические характеристики лазерных целеуказателей для управления боеприпасами: дальность подсвета цели 3–7 км, энергия импульса 50–120 мДж, длительность импульса 5–50 нс, частота следования импульсов 5–20 Гц и расходимость луча 0.1–0.5 мрад. В режиме дальнометрии они способны измерять дальность до 20–25 км с точностью не хуже ± 5 м. На рис. 20.11 приведена фотография лазерного целеуказателя-дальномера ЛЦД 1Д22, который используется вместе с артиллерийскими комплексами «Смельчак», «Сантиметр», «Краснополь» и «Китолов».

Схема применения целеуказателей с корректируемыми боеприпасами показана на рис. 20.4. Корректируемый снаряд выстреливается из орудия в направлении цели, и одновременно информация о выстреле уходит на позицию лазерного целеуказателя-дальномера, находящегося в прямой видимости от цели.

Менее чем за 1–3 секунды (для «Смельчака» и «Сантиметра») или 5–12 секунд (для «Краснополя» и «Китолова») до расчетного времени сближения с целью, включается лазер целеуказателя, подсвечивающий цель, отраженный сигнал которого воспринимается головкой самонаведения снаряда.

По поступающему сигналу траектория снаряда корректируется с помощью специальных реактивных микродвигателей («Смельчак», «Сантиметр») или аэродинамических рулей («Краснополь», «Китолов»). Ограничение по времени подсветки связаны с системами управления и возможной демаскировкой боевой позиции целеуказателя.

Внешний вид и конструктивные схемы этих боеприпасов приведены на рис. 20.12.

Рис. 20.11

Лазерный целеуказатель-дальномер «1Д22»,
разработанный НИИ «Полус»



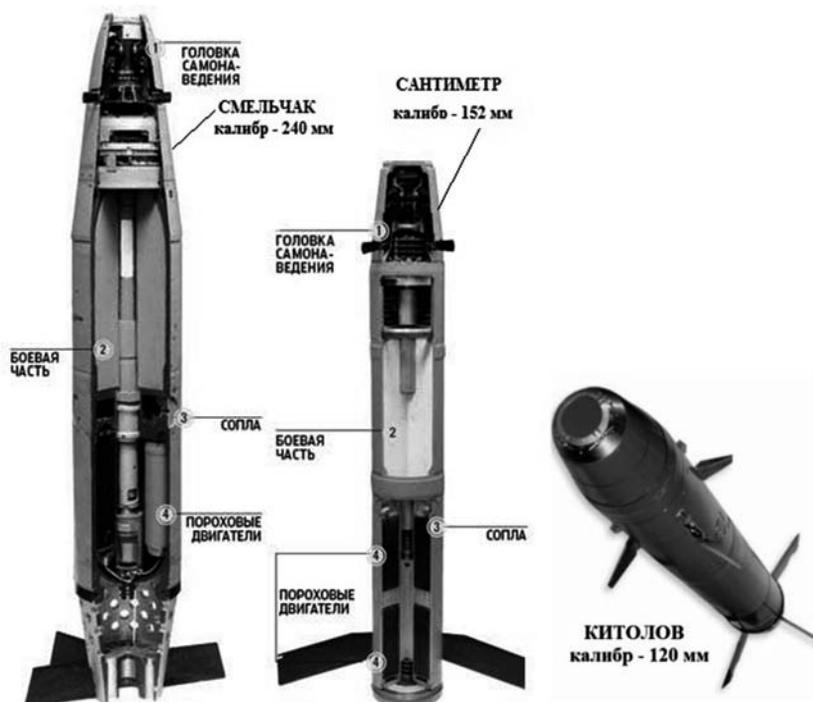


Рис. 20.12

Корректируемые (управляемые) боеприпасы

20.5.

АВИАЦИОННЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ (ОЭС)

Дальнейшее развитие оптико-электронных прицельных систем шло по пути значительного расширения функциональных возможностей, что в большой степени связано с началом применения инфракрасных (ИК) матриц. ИК-матрица, встроенная в ОЭС, не только обеспечивает системе ночное видение, но и позволяет отслеживать ситуацию как в окружающем воздушном пространстве, так и на земле, в пассивном режиме, то есть без всякого излучения. Применение инфракрасных сенсоров не исключает использования активных средств, таких как лока́тор или лазерные дальномеры и целеуказатели. Более того, ИК-матрицы в современных, оснащенных искусственным интеллектом системах способны работать в согласованном режиме с бортовыми радиолокационными станциями (БРЛС).

Современные ОЭС – это multifunctional системы круглосуточного применения, в которых используются три информационных канала. Первый – телевизионный канал дневного действия, построенный на приборах с зарядовой

связью (ПЗС-матрицах). Второй – тепловизионный канал ночного действия, работающий в длинной (8–12 мкм) и средней (3–5 мкм) частях ИК-диапазона. Третий канал представлен лазерным дальномером-целеуказателем с пеленгатором лазерного пятна, обычно работающим на длине волны 1.06 мкм. В последнее время появляются ОЭС с лазерами-подсветчиками на безопасной для зрения длине волны излучения 1.57 мкм.

На рис. 20.13 представлено некоторое радиолокационное оборудование современного российского истребителя МИГ-35.

Оптико-локационная станция кругового обзора нижней полусферы ОЛС-К, размещаемая в конформном контейнере под правой мотогондолой. Включает ИК и ТВ каналы, лазерный целеуказатель-дальномер и канал обнаружения лазерного пятна.

Основные режимы работы современных ОЭС – поиск и ведение цели в оптическом ИК-диапазоне. Их характерный признак – шарообразные обтекатели («шары») из сапфира, которые защищают апертуры от набегающего потока. Они располагаются перед фонарем кабины с некоторым смещением относительно центральной оси, чтобы снизить влияние затенения от конструкции корпуса. Пример ОЛС-ЭМ самолета МИГ-35 иллюстрирует рис. 20.13.



Рис. 20.13

Бортовое локационное оборудование самолета МИГ-35

Оборудование ОЭС может размещаться в специальных контейнерах, которые имеют перспективу превратиться во встроенные системы. Таким оборудованием перспективного комплекса ОЛС для самолета МИГ-35 является оптико-локационная станция кругового обзора нижней полусферы ОЛС-К (рис. 20.13).

На рис. 20.14 приведены фотографии авиационной управляемой ракеты «воздух–поверхность» с лазерным наведением Х-29Л. Ракета Х-29Л выполнена

по аэродинамической схеме «утка» и имеет модульную конструкцию из пяти отсеков: ГСН, отсек управления, боевая часть, двигатель и хвостовой отсек, которые могут храниться в укупорке отдельно и собираются при подготовке с помощью фланцевых стыков.

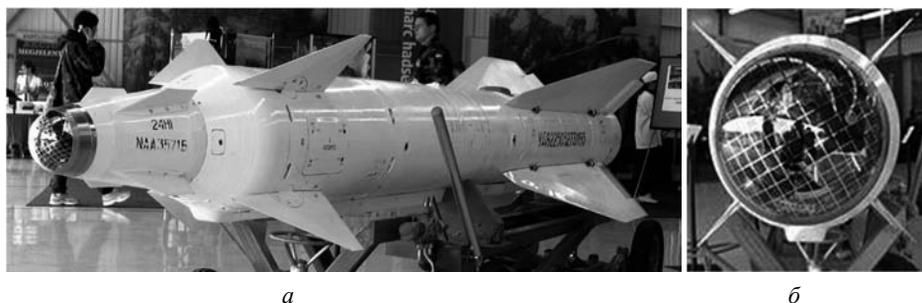


Рис. 20.14

Авиационная ракета X-29Л с лазерным наведением:
а – общий вид, б – головка самонаведения 24Н1

Ракета оснащена полуактивной лазерной системой самонаведения – подсвеченная лучом лазера цель становится вторичным «светящимся» источником излучения. Наведение на цель проводится по методу пропорционального сближения, заключающемся в наведении на цель с упреждением таким образом, чтобы поперечная перегрузка ракеты была пропорциональна угловой скорости вращения линии визирования, которую измеряет следящий координатор ГСН типа 24Н1.



Рис. 20.15

Противодействие применению
авиационных систем
лазерного целеуказания

Для целеуказания требуется подсветка цели в течение определенного времени при сближении с ней средства поражения, которое может осуществляться как с самого носителя оружия, так и с независимого подсветчика (см. рис. 20.4, 20.8–20.10).

Недостатком такого оружия является необходимость постоянного визуального контакта с целью и уязвимость целеуказателя против средства поражения противника, которое может наводиться по сигналу подсветки.

Эффективным может быть и распыление аэрозольных облаков над защищаемой областью (рис. 20.15) и другие варианты противодействия, которые будут обсуждаться ниже.

Тем не менее, средства наведения, использующие лазерное целеуказание остаются одним из наиболее высокоэффективных системы высокоточного оружия и широко используются в конфликтах различного масштаба.

20.6.

БЕСКОНТАКТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДАТЧИКИ

Лазерный датчик приближения является одним из видов лазерного дальномера и предназначен для точного измерения относительно небольших расстояний до цели по сравнению с обычными лазерными дальномерами, используемыми для наблюдения, слежения и управления огнем. В то время как обычные боевые лазерные дальномеры отображают информацию о расстоянии до цели для наблюдателя, датчик приближения генерирует командный сигнал, когда расстояние до цели становится равным предустановленному значению в рамках определенного допуска. Командный сигнал, в свою очередь, может быть использован для выполнения разнообразных функций управления.

Для военного применения наиболее распространено применение датчика приближения в лазерных дистанционных взрывателях, в которых командный сигнал используется для детонации боеголовок больших артиллерийских снарядов, авиационных бомб и управляемых ракет. Основные способы лазерной дальнометрии: времяпролетный, фазовый, триангуляционный, частотно-модулированный (FM-CW) обсуждаются в части 1 и рекомендованной литературе.

В принципе, все перечисленные методы измерения дальности могут быть использованы для создания лазерных датчиков приближения или лазерных дистанционных взрывателей. Однако выбор рационального метода определяется требованиями по дальности предполагаемого применения и максимальной точности определения дальности. Метод триангуляции гораздо лучше конструктивно подходит для лазерных датчиков приближения или детонаторов, так как с его помощью можно измерять короткие расстояния до нескольких метров с высокой точностью. Точность, однако, быстро падает с увеличением расстояния. На рис. 20.16 показан основной принцип работы лазерного датчика приближения.

Триангуляционный метод основан на расчете искомого расстояния через соотношения треугольника с использованием известных параметров системы. Он позволяет измерять как относительное изменение расстояния от датчика до объекта, так и абсолютную его величину.

Принцип работы триангуляционного датчика поясняется на рис. 20.17. Гауссово распределение света, создаваемое источником, показано в правой части рисунка.

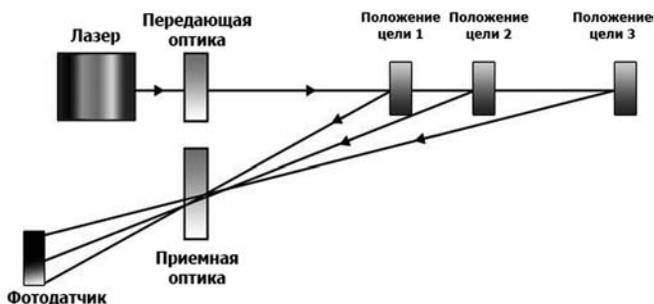


Рис. 20.16

Оптическая схема лазерного датчика приближения

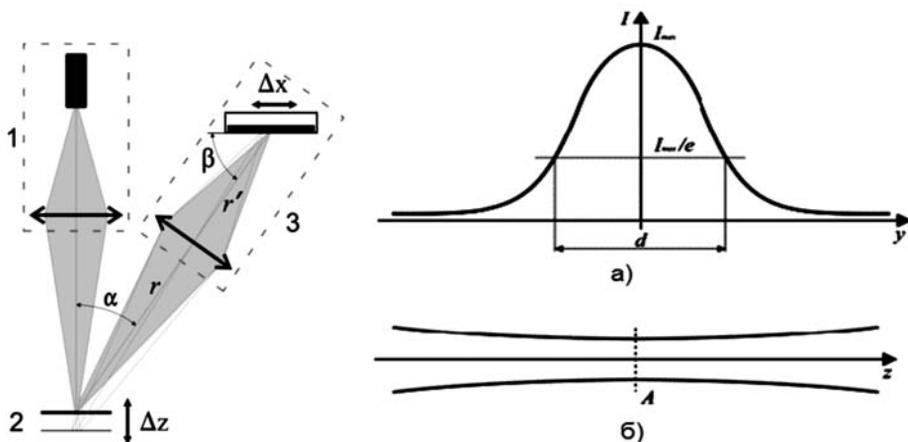


Рис. 20.17

Принцип работы триангуляционного измерителя (слева): 1 – излучательный канал; 2 – контролируемая поверхность; 3 – приемный канал. Гауссово распределение света (справа): а – профиль интенсивности; б – гауссов пучок в продольном сечении

Излучательный канал, состоящий из источника излучения и объектива, формирует зондирующий пучок на поверхности объекта.

Шириной d зондирующего пучка называется расстояние между точками профиля интенсивности на уровне I_{\max}/e . Очевидно, в плоскости перетяжки A (минимальная ширина пучка вдоль направления распространения) интенсивность зондирующего пучка достигает максимального значения.

Относительное положение объектива и лазерного источника определяет настройку излучательного канала, целью которой является выставление перетяжки в центр диапазона измерения и центрировка зондирующего пучка.

Задачей триангуляционного датчика является измерение расстояния от выбранной точки на оси зондирующего пучка до физической точки поверхности. Отраженное или рассеянное падающее излучение используется в триангуляции как физическая основа для получения информации о расстоянии до этой поверхности.

Приемный канал, состоящий из проецирующего объектива и фотоприемника, формирует изображение зондирующего пятна в плоскости фотоприемника. Чем больше диаметр объектива, тем выше его светосила. Иначе говоря, тем интенсивнее и качественнее строится изображение пятна.

В зависимости от конкретной реализации датчика, для регистрации сформированного изображения используют как ПЗС-линейку, так и позиционно-чувствительные приемники.

Схема триангуляционного измерителя, приведенная на рис. 20.17, работает следующим образом. Излучательный канал 1 формирует изображение светового пятна на контролируемой поверхности 2. Далее рассеянный контролируемой поверхностью свет попадает в приемный канал 3.

Таким образом, в плоскости фотоприемника создается изображение освещенного участка контролируемой поверхности (световое пятно). При смещении контролируемой поверхности на величину Δz , световое пятно в плоскости фотоприемника смещается на величину Δx . Зависимость смещения контролируемой поверхности Δz от смещения светового пятна в плоскости фотоприемника Δx , имеет следующий вид:

$$\Delta z = r \times \sin \varphi / \sin(\alpha - \varphi), \quad (20.5)$$

где $\varphi = \arctg\left(\frac{\sin(\beta/r') \times \Delta x}{1 - \cos(\beta/r') \times \Delta x}\right)$; r и r' – расстояния от контролируемой поверхности 2 до проецирующего объектива приемного канала 3 и от проецирующего объектива до фотоприемника соответственно, при том, что контролируемая поверхность находится в центре диапазона измерений смещений.

Датчик имеет исходящий канал, обычно сконфигурированный вокруг полупроводникового диодного лазера или твердотельного с диодной накачкой лазерного микрочипа с пассивной модуляцией добротности вместе с соответствующей передающей оптикой, приемный канал, содержащий приемную оптику, лавинные PIN- или APD-фотодиоды и схему обработки данных. Как показано на схеме, исходящий лазерный луч, отраженный от цели, расположенной на трех различных расстояниях, производит изображения луча, которые проходят через рабочую область фотоприемника.

Фотоприемник получает сфокусированный в центре активной области лазерный луч в течение заданного значения расстояния до цели. В зависимости от увеличения или уменьшения расстояния от заданного значения, фокальное пятно сдвигается в сторону от центра активной области. Этот принцип лежит в основе

работы лазерного датчика приближения в общем и лазерного бесконтактного взрывателя в частности.

Производительность лазерного датчика приближения может быть повышена при помощи осесимметричного расположения многоапертурного фотодатчика, как показано на рис. 20.18.

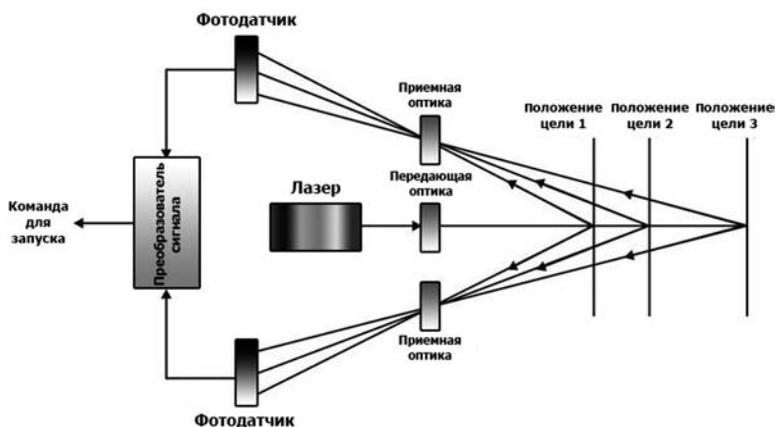


Рис. 20.18

Лазерный триангуляционный датчик с осесимметричной расположением многоапертурного фотодатчика

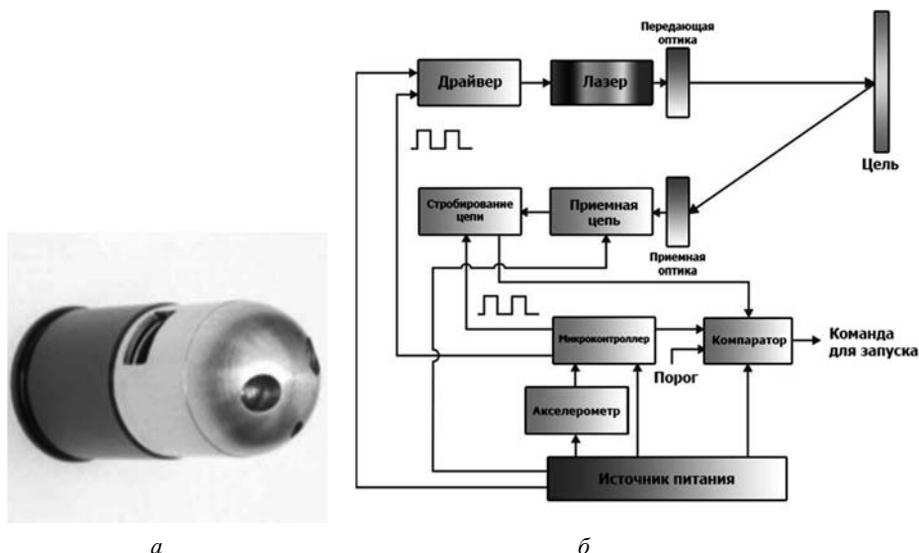


Рис. 20.19

Лазерный бесконтактный взрыватель:

а – внешний вид; б – блок-схема бесконтактного взрывателя с датчиком приближения

Такая конструкция обеспечивает улучшенную баллистику за счет центра тяжести, расположенного на продольной оси вращающегося боеприпаса, и более высокое соотношение сигнал-шум за счет усреднения нескольких отраженных сигналов.

На рис. 20.19, *а* приведена фотография лазерного бесконтактного взрывателя, на рис. 20.19, *б* – блок-схема расположения бесконтактного детонатора с датчиком приближения. Требуемое расстояние детонации может быть выбрано, путем задания соответствующего порогового значения.

20.7.

СРЕДСТВА ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ (СЭОП)

Необходимость развертывания средств эффективного противодействия уже используемым лазерным и оптическим системам (electrooptic counter measures) для противодействия электрооптическим системам, состоящим на вооружении противника, является на сегодняшний день чрезвычайно актуальным.

Не существует сухопутных, авиационных или корабельных вооружений, застрахованных от риска подвергнуться воздействию лазерного излучения. Работа таких систем вооружений находится под постоянным пристальным наблюдением различных видов электрооптических устройств и оптико-электронных датчиков. Обнаружение и вывод этих приборов и датчиков противника из строя даст огромное преимущество войскам на поле боя. Поэтому развертывание СЭОП и систем, предназначенных для выведения из строя или нейтрализации традиционных лазерных приборов и систем, служит умножающим фактором суммарного потенциала и живучести современных войсковых соединений.

20.7.1.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

К числу важных применений лазерных технологий относится обнаружение и идентификация тактических оптических и оптоэлектронных прицельных комплексов, приборов ночного видения, тепловизоров, лазерных дальномеров и целеуказателей. С точки зрения безопасности дистанционное обнаружение оптических приборов, используемых снайперами, является исключительно важной задачей. Поэтому разрабатываемые для решения этих задач приборы часто называют «антиснайпер». Другим связанным с безопасностью применением, может быть наблюдение за критически важными объектами городской инфраструктуры. Принципиальная схема такого устройства приведена на рис. 20.20.



Рис. 20.20

Схема обнаружения и идентификации тактических оптических и оптоэлектронных прицельных комплексов

Цель («оптический прибор») подсвечивается лазерным лучом и возвращает его часть, как рассеянное излучение, которое поступает на светочувствительный приемник. Для затруднения использования для маскировки антибликовых покрытий в одном устройстве могут использоваться несколько лазеров, излучающих в разных спектральных диапазонах.

Промышленность выпускает разнообразные системы, как портативные, которые могут применяться индивидуально, так и монтируемые на военной технике (рис. 20.21).



а

б

Рис. 20.21

Системы обнаружения и идентификации тактических оптических и оптоэлектронных прицельных комплексов: а – малогабаритный локационный лазерный прибор «Антиснайпер» компании «Инновационная безопасность», б – электронно-оптические средства мобильного пункта разведки «Аргус» на БМП-2 производства «НПК «Уралвагонзавод»

Благодаря использованию различных приемников возможны как дневной, так и ночной режимы работы. Максимальная дальность обнаружения оптических устройств достигает 2500 метров.

Импульсный режим работы лазера позволяет определять дальность до отражающего объекта по времени пролета переданного и отраженного сигналов, а также возможность работать в режиме стробирования, исключая помехи от рассе-

яния в ближней зоне. Это позволяет прибору работать в плохих метеоусловиях и даже сквозь растительность.

Дополнительной опцией может быть способность не только обнаруживать потенциально опасные оптические приборы, но и ослеплять их лучом встроенного импульсного лазера.

На рис. 20.22 на примере «антиснайпера» «Мираж-1200» компании НПЦ «Транскрипт» показаны возможные сценарии применения приборов для обнаружения и идентификации тактических оптических и оптоэлектронных прицельных комплексов.

Основные направления развития приборов обнаружения оптических и электрооптических устройств будут идти в сторону большей их универсализации и добавления новых функциональных возможностей.

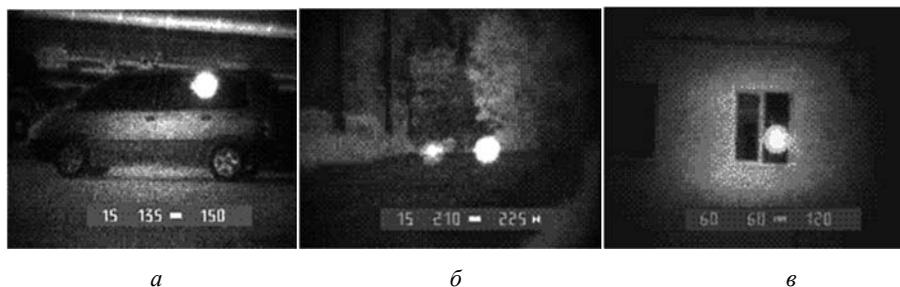


Рис. 20.22

Сценарии применения «антиснайпера»: *а* – в автомобиле с тонированными стеклами находится наблюдатель с биноклем (расстояние 150 м); *б* – в лесу находятся наблюдатель с биноклем (слева) и снайпер (справа) (расстояние 225 м); *в* – в здании находится снайпер (расстояние 120 м)

20.7.2.

ВИДЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

Основная задача СЭОП состоит в контратаке атакующего объекта. Это может быть достигнуто путем нейтрализации какого-либо одного из элементов, ответственных за работоспособность атакующего комплекса, либо физического разрушения атакующего объекта. СЭОП, как правило, классифицируются по расстоянию, на котором осуществляется перехват цели, которое соответствует быстродействию системы. По данному признаку они делятся на системы с высоким (микросекунды), средним и низким (миллисекунды) быстродействием.

Существует две основные категории СЭОП: лазерные СЭОП, такие как антисенсорные лазеры и лазерные даззлеры, и системы поддержки, такие как системы обнаружения лазерных угроз.

Датчики предупреждения о лазерном облучении используются и как автономные устройства, и как часть стационарных СЭОП. С точки зрения терминологии,



Рис. 20.23
Шлем летчика-истребителя
(поколение 4+ / 5)

лазерный даззлер можно рассматривать как один из видов антисенсорного лазера, где в качестве сенсора рассматривается глаз человека.

Примером автономной системы является нащлемная система предупреждения, которая использует несколько датчиков для 360° охвата (рис. 20.23).

Антисенсорные лазеры способны вызвать либо временное ослепление электрооптических устройств и оптико-электронных датчиков противника, либо полностью вывести их из строя.

В обоих случаях, целью является интерфейсная оптика и оптико-электронные датчики.

В первом случае воздействие называется функциональным. Энергия таких систем не превышает нескольких джоулей, и они не могут нанести необратимые физические или структурные повреждения оптоэлектронным средствам.

В то же время эти системы, как правило, достаточно малогабаритные и их можно использовать как индивидуальное средство.

СЭОП, способные нанести физический урон фронтальной оптике любой электрооптической системы, имеют энергию лазерного импульса порядка нескольких килоджоулей. Они могут быть стационарными или устанавливаются на транспортное средство и имеют намного больший размер и вес, чем их «функциональные» аналоги.

Сенсорная система предупреждения о лазерном облучении является незамечным компонентом любой СЭОП. Такая система обеспечивает СЭОП информацией о виде и направлении входящего лазерного сигнала противника. Система предупреждения дает возможность экипажу платформы сделать оптимальный выбор в отношении типа атакующего боеприпаса и методах противодействия, которые будут использоваться.

При использовании в сочетании с дымовым/аэрозольным экраном, представленная системой предупреждения информация датчиком используется для запуска и развертывания этого экрана в направлении угрозы и тем самым блокировки падающего излучения. Это позволяет экипажу платформы уклониться от атаки за те решающие 50–60 секунд, в течение которых дымовая завеса остается в силе.

Такой тип противодействия особенно эффективен против боеприпасов с лазерным наведением.

В СЭОП применяются датчики лазерного излучения, которые обеспечивают обнаружение, идентификацию и направление прихода лазерного излучения, например, от лазерного целеуказателя, а затем либо генерирует дымовой или аэрозольный экран, либо посылает лазерный луч более высокой мощности в направлении источника, тем самым парализуя лазерный целеуказатель.

Существует и другой метод, который заключается в использовании лазерного излучения высокой энергии для подсветки ложной цели в 100–200 м от защищаемой платформы, тем самым заставляя боеприпас с лазерной головкой самонаведения атаковать ложную цель. Этот способ очень привлекателен для защиты критически важных и дорогих военных активов, таких как ангары для самолетов и склады боеприпасов. Также к таким методам относится использование инфракрасных ловушек для защиты воздушных объектов от ракет с ИК-наведением класса «земля-воздух» или «воздух-воздух».

На рис. 20.24 изображен типичный сценарий развертывания СЭОП, используемой в качестве системы защиты критически важных и дорогих объектов, таких как склады боеприпасов или горюче-смазочных материалов.



Рис. 20.24
Многокомпонентная СЭОП для защиты объектов

Системы предупреждения с рабочим диапазоном до 10 км охватывают весь применяемый в военных целях спектральный диапазон – от видимого до дальнего инфракрасного. Военные твердотельные лазеры, как правило, работают на длинах волн 1064 и 1540 нм, лазеры средней инфракрасной области работают в 3–5 мкм диапазоне и лазеры дальнего инфракрасного диапазона работают на 8–14 мкм.

Существуют СЭОП с возможностью обнаружения направления в заданных секторах 40–50° и высокой точностью наведения, приближающейся к доле градуса.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 20

20.1. Лазерные инструменты имеют важное и все возрастающее значение для военной техники. Они находят все более широкое применение в различных системах вооружений, позволяют существенно улучшить и расширить их возможности.

20.2. Применение лазеров в системах целеуказания позволило не только повысить точность обычного стрелкового оружия, но создать принципиально новые высокоточные системы и управляемые боеприпасы.

20.3. Основные направления развития приборов обнаружения оптических и электрооптических устройств будут идти в сторону большей их универсализации и добавления новых функциональных возможностей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 20

20.1. Что означает понятие «лазерные инструменты»? Перечислите основные цели и задачи, решаемые с помощью этих систем.

20.2. Какие способы наведения боеприпасов вам известны? Приведите схему применения и объясните принцип работы лазерного целеуказателя для корректируемых боеприпасов. Приведите примеры реализаций.

20.3. В чем заключаются основные задачи военного применения лазерной дальнометрии?

20.4. Приведите конструктивную схему лазерного целеуказателя для стрелкового оружия. Объясните принцип действия.

20.5. Перечислите состав и объясните принципы работы авиационных оптико-электронных систем, режимы работы ГСН, сценарии применения.

20.6. В чем заключается принцип работы систем электрооптического противодействия? Классификация СЭОП. Приведите примеры.

20.7. На основе схемы обнаружения и идентификации тактических оптико-электронных прицельных комплексов, объясните принцип работы систем типа «антиснайпер».

20.8. Приведите схему и объясните принцип работы многокомпонентных СЭОП.

20.9. Сформулируйте ваше мнение о перспективах развития лазерных инструментов для военного применения.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 20

20.1. Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие. – СПб.: «Лань». – 2016.

20.2. Anil K. Maini. Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications. – John Wiley and Sons Ltd., London – Delhi, 2013.

20.3. Рубаненко Ю.В. Военные лазеры России. Научное издание. – М.: Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2013. – 390 с.

20.4. Энциклопедия XXI век «Оружие и технологии России». Том XI, «Оптико-электронные системы и лазерная техника». – М.: ИД «Оружие и технологии», 1999. – 720 с.

ГЛАВА 21

ЛИДАРЫ (ЛАЗЕРНЫЕ РАДАРЫ)

Лидар – производное от английского (*Lidar – Light Identification Detection and Ranging* – определение дальности по световой идентификации) обозначает широкий круг приборов для получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеяния в прозрачных и полупрозрачных средах. По аналогии с радиолокационными системами иногда используется термин «ладар», в основном для 3D локационных систем лазерной дальнометрии.

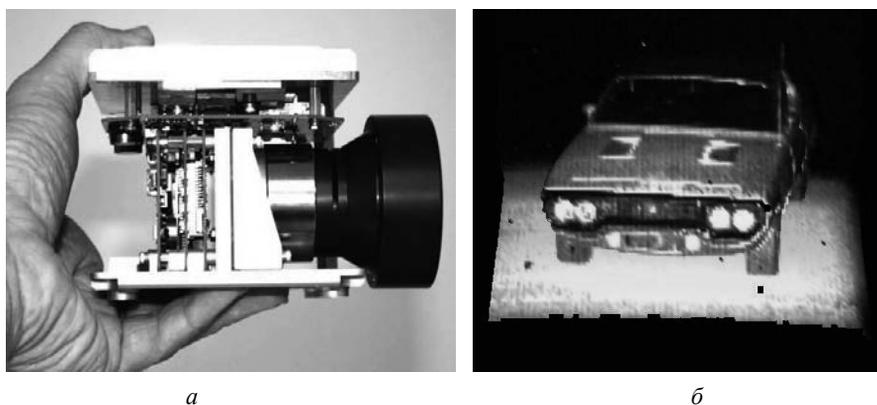
21.1.

ТРЕХМЕРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ

Лидары различаются методом совмещения полей зрения приемника и зондирующего лазера. На рис. 21.1, *а* показана моностатическая система, в которой передатчик и приемник имеют общую оптику. В биаксиальной (бистатической) схеме, оптика приема и передачи разделены (рис. 21.1, *б, в*). На блок-схеме, изображенной на рис. 21.2, показана блок-схема когерентного лазерного радара. Лазерный луч направляется на цель, в качестве которой может выступать и аэрозольное образование в атмосфере, часть энергии, отраженной или рассеянной целью, собирается на приемнике.

Неотъемлемой частью лидара является система сбора обратно отраженного излучения и система управления зондирующим лучом, которая позволяет сканировать заданный сектор пространства. При обработке полученных данных сканирования сектора можно построить 3D-картину исследуемого пространства. На рис. 21.2 проиллюстрирована концепция лидара для мгновенного формирования 3D-изображения объекта.

ряют время пролета. Такие лидарные системы получили название широкоапертурных 3D-ладаров. Время пролета пропорционально расстоянию между точкой на цели, от которой отражается лазерный луч, и фоточувствительным датчиком. Поэтому массив датчиков позволяет получить 3D-изображение цели (угол-угол-дальность). Внешний вид широкоапертурного 3D-ладара полученного с его помощью изображения (дальность показана изменением цвета) приведены на рис. 21.3.

*a**б***Рис. 21.3**

Внешний вид широкоапертурного 3D-ладара (*a*)
и пример построения изображения (*б*)

Возможность временного анализа данных с одного пикселя появилась с разработкой специальной матрицы и схемы считывания сигнала с каждого пикселя. На сегодняшний момент изготовлены матрицы 64×64 и 128×128 пикселей и ведутся работы по увеличению разрешения таких матриц. Дальность получаемого 3D-изображения определяется выходной энергией лазера подсветки и может достигать нескольких километров. Пространственное разрешение по дальности составляет порядка 6 см, а поле зрения от 3 до 90 градусов.

К сожалению, разрешение матриц 128×128 не обеспечивает высоких значений угловой точности для некоторых задач требующих малых полей зрения для каждого пикселя при сохранении широкого поля обзора камеры.

21.2.

КОМПЕНСАЦИЯ ПОМЕХИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Атмосфера создает обратное рассеяние излучения подсвета, которое накладывается на изображение наблюдаемого объекта. Контраст изображения значи-

тельно снижается, что приводит или к частичной или полной потере видимости в зависимости от степени прозрачности среды (туман, дождь, снегопад и т.п.)

В таких ситуациях для получения 3D-изображения на матричных приемниках можно использовать метод стробирования камеры по дальности и регулирования времени экспозиции в зависимости от длительности импульса зондирующего лазера. Суть метода схематично представлена на рис. 21.4.

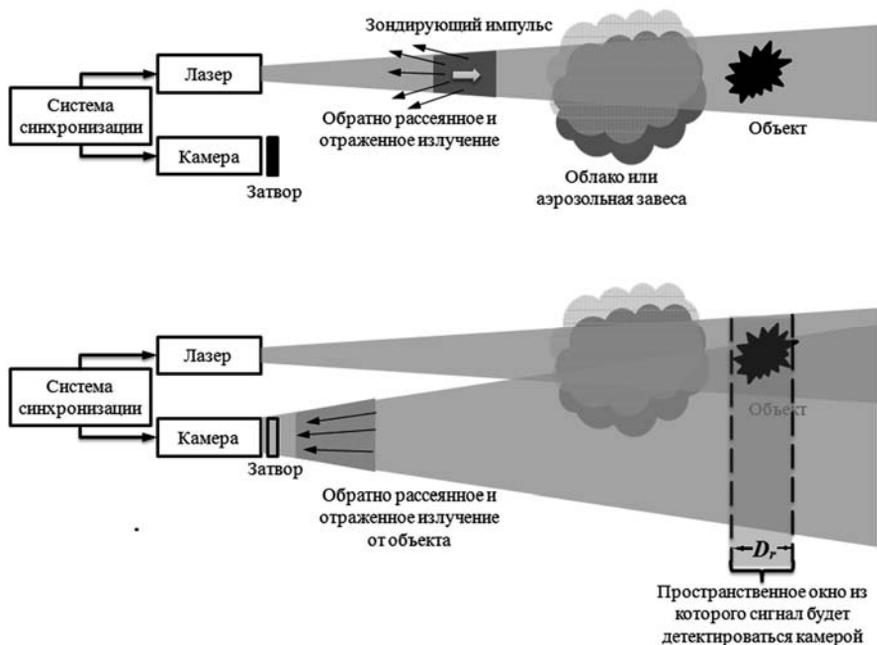


Рис. 21.4

Схема лазерного радара со стробированием по дальности камеры высокого разрешения

Особенностью подобных систем лазерного видения со стробированием камеры по дальности является необходимость использовать лазерные короткие импульсы, поскольку длительность импульса определяет глубину просматриваемого пространства:

$$D_r = \frac{c \cdot \tau_{\text{имп}}}{2}, \quad (21.1)$$

где c – скорость света, $\tau_{\text{имп}}$ – длительность лазерного импульса.

В случае несоответствия длительности импульса и времени экспозиции камеры возможно снижение отношения «сигнал/шум» вследствие потери энергии при $\tau_{\text{экс}} < \tau_{\text{имп}}$ и увеличении фоновых шумов приводящее к снижению контраста цели

при $\tau_{\text{экс}} > \tau_{\text{имп}}$. На рис. 21.5 представлены результаты лазерной съемки удаленного объекта с различной длительностью пространственного окна.



Рис. 21.5
Лазерная съемка объекта при различных длительностях пространственного окна: *a* – 1000 нс; *б* – 50 нс

Дальность до объекта совпадает с серединой пространственного окна D_r . Видно, что контраст цели в случае большого окна значительно меньше, чем при окне, совпадающем по длительности с импульсом лазера. Результаты получены на системе активного видения, с лазерной подсветкой разработанной фирмой BAE Systems.

Получение 3D-картины (угол, угол, дальность) изображаемого пространства осуществляется последовательным смещением следующего кадра на расстояние, обычно, равное длительности пространственного окна. Таким образом, для пространственного окна 20 нс и задержки времени экспозиции 10 мкс получаем глубину кадра 3 метра на расстоянии 1.5 километра.

Анализ полученного изображения может производиться не только в каждом кадре, используется последовательность кадров позволяющая выделить объект при его попадании в пространственное окно, а также силуэт на фоне подсвеченного фона, это позволяет повысить достоверность определения цели.

Импульсы лазерного излучения подсветки, обратно рассеянное и отраженное излучение от объекта, распространяясь в атмосфере, испытывают энергетические потери не только за счет явлений рассеивания и поглощения, но также под влиянием атмосферной турбулентности (см. раздел 17.6).

Для компенсации негативного влияния турбулентности также разработаны алгоритмы обработки изображений в режиме реального времени, позволяющие с помощью методов деконволюции и накопления кадров значительно повысить качество изображения даже в условиях сильной турбулентности. На рис. 21.6 представлены результаты такой обработки изображения.



Рис. 21.6
Обработка искаженных изображений: *а* – единственный кадр;
б – накопление и деконволюция

21.3. ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

Альтернативным подходом к получению изображения цели является использование сканирующего лазерного луча и одноэлементного приемника. При подобном построении оптической системы лазерного локатора построение 3D-картины осуществляется последовательным сканированием пространства лазерным лучом. Каждый импульс лазера соответствует одному направлению, определяемым углами азимута и места. В данном случае изображения получается «сшивкой» полученных массив с каждого углового направления.

Поскольку линейный размер пятна подсветки и приемника имеют размеры, определяемые расходимостью лазерного излучения, то влияние турбулентности на качество получаемой информации о цели ниже, чем при использовании активных систем лазерного видения.

Приборы, которые принято называть лазерными сканерами или «ладарами», можно рассматривать как механическое совмещение двух компонентов – дальнометрического (сканирующего) блока и навигационного комплекса типа «GPS/Глонасс + инерциальная система». Дальнометры, используемые для измерения расстояния до объектов, классифицируются по принципу работы. Для определения дальности в основном используются два типа измерения: времяпролетное, когда дальнометром рассчитывается время отправки и получения отраженного луча, и фазовые методы, когда вычисляется разность фаз посланного лазерного излучения и фазы обратно отраженного сигнала.

Реализация импульсного метода измерения дальности предполагает определение времени распространения короткого лазерного импульса τ_i от источника излучения до объекта и обратно до приемника (рис. 21.7).

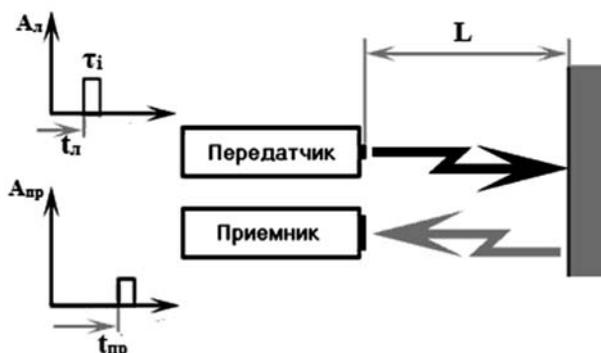


Рис. 21.7

Принципиальная схема ладара при импульсном методе измерения дальности

С учетом постоянства скорости распространения света в атмосфере, $c=3 \times 10^8$ м/с, измеренная продолжительность распространения лазерного импульса (время, измеряемое с момента включения лазера до момента приёма отражённого сигнала) $\Delta t = t_{пр} - t_l$ позволяет определить дальность L по формуле:

$$L = \Delta t / 2c. \tag{21.2}$$

По возможности должна быть обеспечена минимальная длительность зондирующего импульса $\tau_i < \Delta t$ и его максимальная добротность (т.е. максимально крутой передний фронт).

Из представленной выше функциональной схемы импульсного ладара следует еще одно принципиальное ограничение. Видно, что каждый следующий зондирующий импульс может быть излучен только после того, как зарегистрирован предыдущий отраженный импульс. С учетом конечной скорости распространения света можно определить простое соотношение, которое определяет теоретический предел частоты зондирующих импульсов f_{max} в зависимости от высоты или дальности сканирования L , а именно:

$$f_{max} = c/2L. \tag{21.3}$$

Данное принципиальное ограничение в той или иной степени относится и ко всем другим методам активного дистанционного зондирования.

Для осуществления развертки по строкам кадра изображения в 3D-ладарах применяются различные типы сканирующих систем, основные типы и их сравнительный анализ представлен в табл. 2.1 в главе 2.

Системы лазерного сканирования применяются не только для геодезической съемки местности для построения цифровых карт местности, но и для обеспечения безопасности полета в условиях плохой видимости, так как камеры видимого или ИК-диапазона, а также тепловизионные камеры не позволяют с высокой достоверностью и на больших дистанциях получить картину расположения опасных объектов и их параметров.

В настоящее время существует несколько разработанных систем лазерных сканеров применяющихся в авиации и используемые для обеспечения обнаружения опасных препятствий типа проводов при полете вертолетов.

Чтобы на километровых дистанциях заметить тонкие (несколько миллиметров) провода для таких сканеров характерны очень высокие требования по пространственному разрешению, вступающие в противоречия с ограничением по частоте зондирующих импульсов. В таком случае можно применить несколько одновременно работающих лазеров с отличающимися друг от друга длинами волн. Использование известных в волоконно-оптической технике мультиплексов и демультиплексов позволяет улучшить разрешающую способность лазерных сканеров (рис. 21.8).

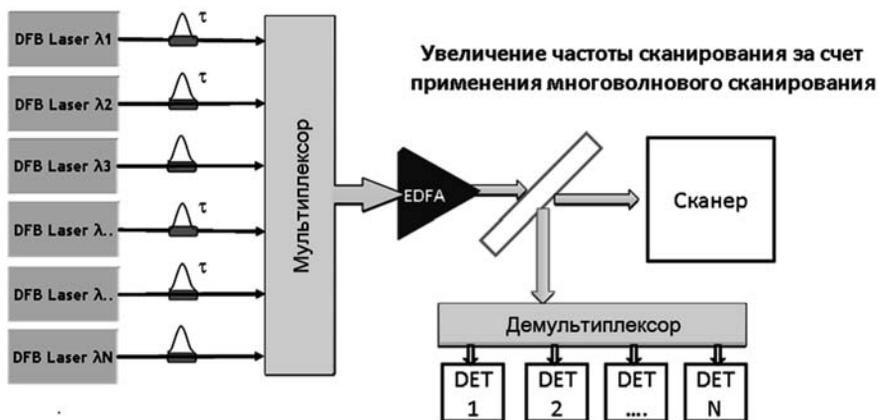


Рис. 21.8

Схема многоволнового уплотнения оптических сигналов

На рис. 21.9 показана схема работы и результаты оптического зондирования вертолетного 3D сканера высокого разрешения. Там же приведен внешний вид такой системы со снятой защитной крышкой, установленной на гиросtabilизированную платформу.

Для определения дальности до объекта в лазерных сканерах используется в основном пороговый метод, который заключается в определении сигнала выше детерминированного уровня и вычислении дистанции до этого сигнала. Схема порогового метода показана на рис. 21.10.

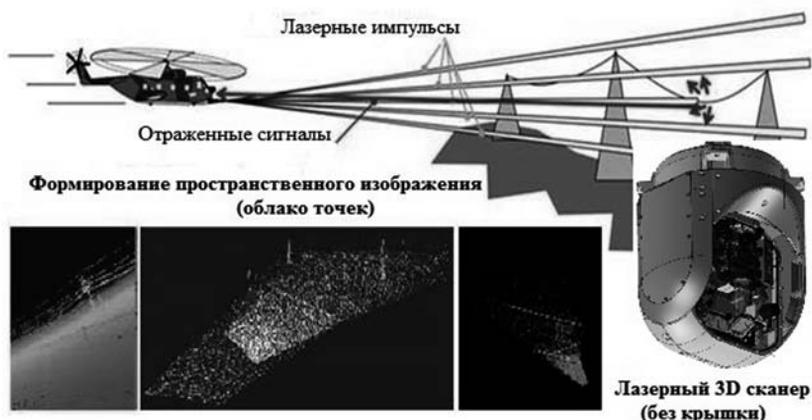


Рис. 21.9

3D-сканирование с высоким разрешением (предоставлено НПП «Лазерные системы»)

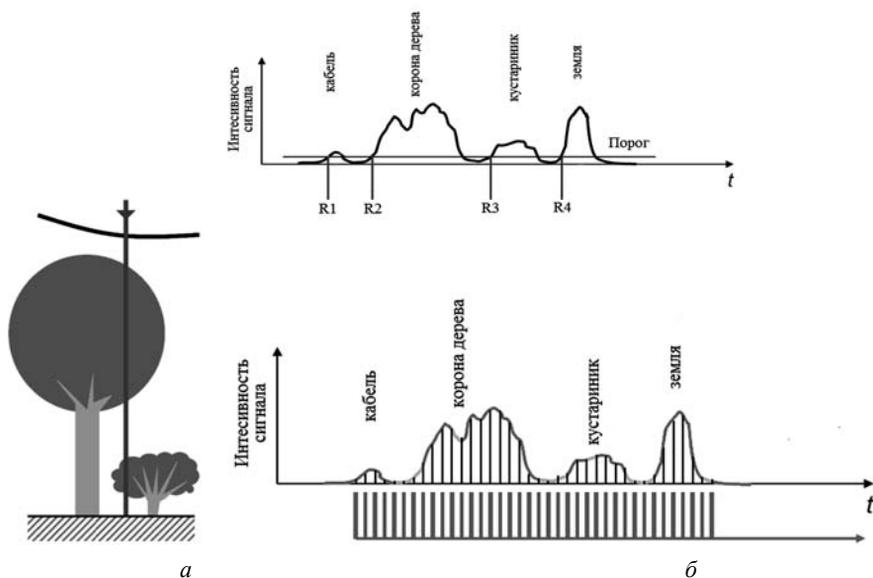


Рис 21.10

Методы анализа данных лазерного сканирования: *а* – линия сканирования; *б* – пороговый метод определения дальности и оцифровка видеосигнала

Использование порогового метода позволяет определить до четырех значений дальности, что при решении некоторых прикладных задач является недостаточным. В случае оцифровки всего сигнала с высокой частотой (~ 1 ГГц и выше) появляется возможность разрешить детали исследуемого объекта с точностью до нескольких сантиметров. На рис. 21.11 представлены результаты сканирования лесного массива с полной обработкой полученных данных.

Метод полной оцифровки данных позволяет получать детальную информацию об объектах находящихся за кронами деревьев, кустарниками или другими помехами. 3D-ладар также хорошо подходит для идентификации, навигации автономных транспортных средств и топографии. Такие системы могут использоваться для обнаружения целей, спрятанных под камуфляжной сеткой и листвой. Так, с помощью лазерного сканера можно обнаружить скрытый за камуфляжной сеткой объект, в том числе и человека (рис. 21.12).

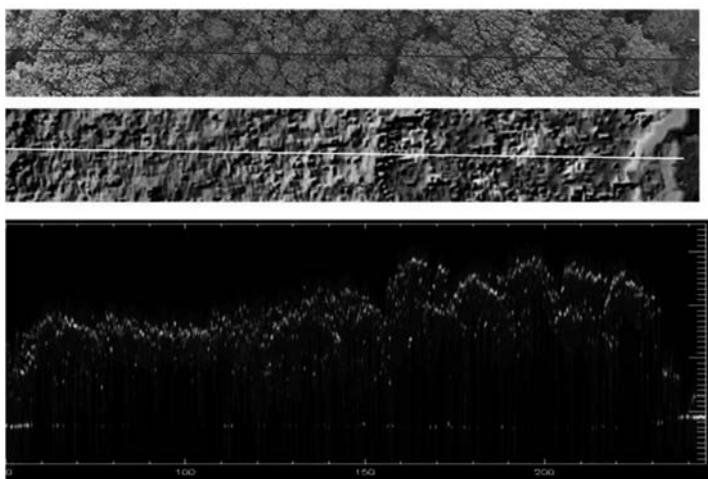


Рис. 21.11

Пример данных при полной оцифровке сигнала



Рис. 21.12

Фото камуфляжной сетки и изображение человека, скрывающегося за ней, полученное с помощью 3D-ладара фирмы Teledyne Optech

21.4.

ЛАДАРНЫЕ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ (ЛСН)

Помимо задач обнаружения скрытых целей и построения карт лидары нашли применение в ладарных системах наведения, используемых в основном в сочетании с другими системами наведения в боеголовках стратегических ракет для того, чтобы отличить ложные цели от назначенной точки прицеливания. ЛСН могут обнаруживать и идентифицировать специфические цели с очень высокой четкостью – с разрешением в несколько сантиметров на расстоянии нескольких километров. Алгоритм автоматического целеуказания обрабатывает кадры для сравнения изображения с 3D-шаблонами, хранящимися в памяти, и точной идентификации цели. Такие ЛСН обычно используются в беспилотных барражирующих системах, которые смотрят на целевой объект с разных углов для его идентификации и выбора наилучшей позиции для атаки.

На рис. 21.13 приведено фото многорежимной ЛСН компании Lockheed Martin. Она может работать как в автономном полуактивном лазерном режиме целеуказания (см. раздел 20.3), так и в ладарном режиме, а также одновременно использовать оба эти режима для идентификации, захвата и сопровождения цели. Система наведения предназначена для проведения поиска в широкой области и выявления фактических или потенциальных целей, в том числе замаскированных при помощи камуфлирующей сетки или листвы.

Рис. 21.13
Многозадачная система
лазерного целеуказания
(Lockheed Martin)



Подобные ЛСН были успешно использованы при испытании автоматических барражирующих ракет. С помощью ЛСН такая ракета производит поиск на большой площади и передает информацию о местоположении различных мишеней в командный центр, где эти цели ранжируются в зависимости от задачи.

В случае приоритетной цели можно приказать прекратить свою поисковую миссию и, переключившись в режим целеуказания, немедленно атаковать цель.

21.5. ЛИДАРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

В настоящее время в технологии дистанционного определения химического загрязнения окружающей среды существует ряд методов детектирования и идентификации опасных химических веществ распределенных в атмосфере в различной фазе. Активные методы детектирования подразумевают использование источника излучения с заданными исходными свойствами, при взаимодействии этого излучения с атмосферными объектами происходит количественное и качественное изменение первоначальных характеристик излучения. Анализируя полученные данные можно определить количественные характеристики загрязняющих веществ распределенных в заданном секторе.

Загрязняющие вещества в атмосфере могут присутствовать как в газовой, так и конденсированной (твердой или жидкой) фазе, причем, как правило, они взаимосвязаны. Выброс вредных газовых реагентов в результате взрывов, пожаров и других техногенных или природных явлений, как правило, сопровождается большим количеством мелкодисперсных частиц дыма и других продуктов деструкции, а распыление отравляющих химических веществ всегда происходит через аэрозольную фазу.

Поэтому диагностика опасных веществ в атмосфере происходит в два этапа. На первом проводится непрерывный мониторинг заданного сектора воздушного пространства с целью выявления области загрязнения, обычно ассоциирующейся с аэрозольным облаком. Для этих целей используется аэрозольный лидар, предназначенный для диагностики конденсированных частиц в «подозрительном» облаке. Схема его работы приведена на рис. 21.14.

Долго находиться во взвешенном состоянии в атмосфере могут только частицы микронного и субмикронного размеров, поэтому для получения информации о размерах и концентрации таких частиц используются аэрозольные лидары видимого и ближнего инфракрасного диапазона, чаще всего построенный на основе Nd:YAG-лазера. При этом лазер работает на любой из четырех гармоник (266–1064 нм) с частотой повторения импульсов 10–25 Гц. Энергия импульса составляет ~ 0.5–1 Дж на основной гармонике. В качестве приемников излучения используются ФЭУ (видимый и УФ-диапазоны) и лавинные фотодиоды (1.064 мкм).

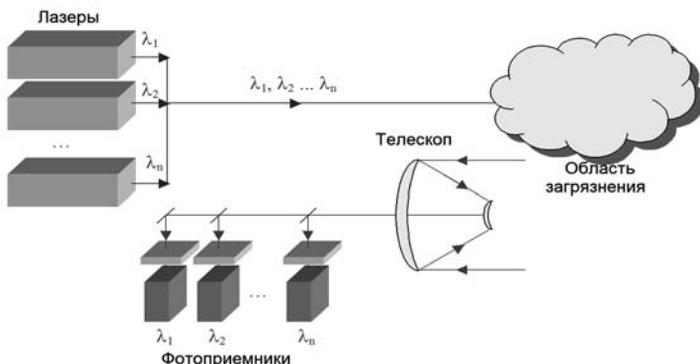


Рис. 21.14
Принцип работы аэрозольного лидара

Если по результатам анализа данных аэрозольного лидара принимается решение о потенциальной опасности обнаруженного облака, начинается мониторинг области загрязнения с помощью химического лидара, называемого также лидаром дифференциального поглощения. Принцип работы такого лидара показан на рис. 21.15.

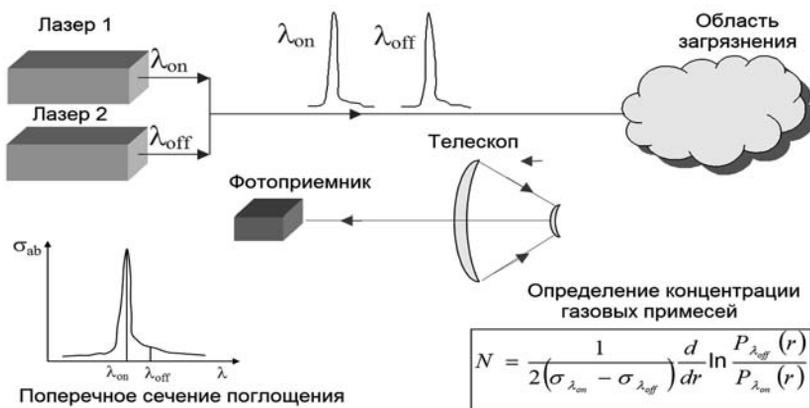


Рис. 21.15
Принцип работы химического лидара

Основные трудности дистанционного мониторинга газовых примесей заключается в их многообразии, а следовательно, в очень широком диапазоне характерных длин волн спектральных линий поглощения. В таких случаях используются разные типы перестраиваемых лазеров, работающих в различных спектральных диапазонах.

Коротковолновый лидар дифференциального поглощения используется в основном для измерения концентраций окислов азота, серы и любых других газов, спектры поглощения которых имеют особенности в рабочих диапазонах двухканального перестраиваемого лазера на сапфире с титаном: 700–960 нм, 350–480 нм, 230–310 нм.

Длинноволновый гетеродинный лидар дифференциального поглощения (ДВ-DIAL) используется для измерения концентраций высокомолекулярных веществ. Он построен на основе одночастотных импульсных ТЕА-СО₂-лазеров, непрерывных одночастотных СО₂-лазеров и широкополосного матричного КРТ-приемника. Лазерные излучатели обеспечивают перестройку на любую из 60 линий VR-спектра СО₂ в диапазоне 9–11 мкм.

Примером комплексного решения задачи дистанционного мониторинга химических загрязнений атмосферы является мобильный лидарный комплекс «Смуглянка 1Л», разработанный компанией НПП «Лазерные системы» в интересах Министерства обороны РФ.

Лидарный комплекс предназначен для оперативного дистанционного определения физического и химического состава атмосферы в мегаполисах, крупных промышленных центрах, в районах экологических катастроф или военных действий с возможным применением химических отравляющих веществ и включает следующие подсистемы:

1. Аэрозольный лидар видимого и ближнего инфракрасного диапазона, построенный на основе Nd:YAG-лазера.

2. Коротковолновый лидар дифференциального поглощения на базе двухканального перестраиваемого титан-сапфирового лазера: 700–960 нм, 350–480 нм, 230–310 нм.

3. Длинноволновый гетеродинный лидар дифференциального поглощения, построенный на основе одночастотных импульсных ТЕА-СО₂-лазеров, непрерывных одночастотных СО₂-лазеров и широкополосного матричного КРТ-приемника. Лазерные излучатели обеспечивают перестройку на любую из 60 линий VR-спектра СО₂ в диапазоне 9–11 мкм.

4. Ветровой когерентный доплеровский лидар, построенный на той же элементной базе, что и длинноволновый химический лидар, и отличающийся лишь методикой обработки лидарного сигнала. Измерение доплеровского сдвига частоты рассеянного излучения позволяет измерять скорость ветра в диапазоне до 20 м/с.

5. Турбулентный лидар, работающий на длине волны 532 нм и позволяющий измерять высотный профиль структурной постоянной атмосферной турбулентности. Принцип работы основан на измерении размера фокального пятна в фокусе приемной оптической системы для определенного набора измерительных трасс.

6. Флуоресцентный лидар, предназначенный для определения природы атмосферного аэрозоля по спектру флуоресценции. Возбуждение осуществляется импульсами лазерного излучения на длине волны 266 нм. Спектр флуоресценции измеряется однорешеточным монохроматором на основе 32-элементного ФЭУ в диапазоне 300–500 мкм.

7. Поляризационный лидар используется для определения физических характеристик аэрозольных частиц (формы, агрегатного состояния). В качестве зондирующего излучения используется вторая гармоника Nd:YAG-лазера (532 нм).

Оптическая схема лидарного комплекса приведена на рис. 21.16.

Мобильный лидарный комплекс представляет собой транспортируемый модуль на носителе, в котором размещается оборудование лидарной системы и кабина управления (рис. 21.17, ил. 15).

Комплекс представляет собой полностью автономную и высоко автоматизированную систему, имеющую собственное энергоснабжение и климатическую установку. Дизель-генератор располагается вне модуля и выполнен в виде автономного транспортируемого модуля, установленного на колесную базу.

В транспортируемом модуле размещены многофункциональная лидарная система, TV-система, система сбора и обработки информации и другие вспомогательные системы. Комплекс оснащен Nd:YAG-лазером (с удвоением, утроением и учетверением частоты) и двумя перестраиваемыми одномодовыми одночастотными ТЕА CO₂-лазерами.

Комплекс позволяет:

- определять местоположение и отслеживать эволюцию естественных и искусственных аэрозольных образований в атмосфере (аэрозольный лидар);

- измерять концентрацию газов в атмосфере, линии поглощения которых совпадают с диапазоном излучения лазеров (DIAL);

- дистанционно определять скорость и направление ветра (CO₂-гетеродинный лидар);

- определять биологические составляющие в атмосфере.

На рис. 21.18 приведены картины представления данных на операторском мониторе мобильного лидарного комплекса и его технические характеристики.

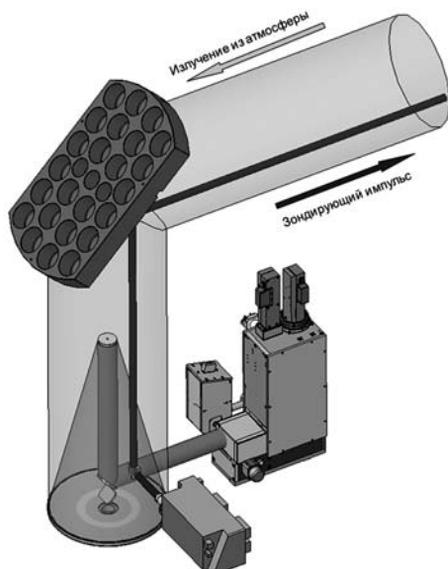


Рис.21.16

Оптическая схема лидарного комплекса

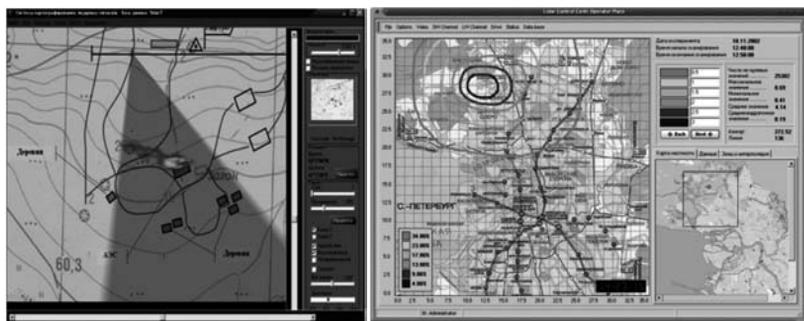


а

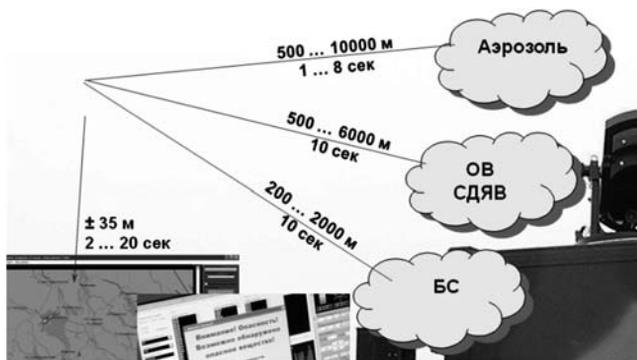
б

Рис. 21.17

Мобильный лидарный комплекс «Смулянка 1Л» (предоставлено НПП «Лазерные системы»): а – внешний вид комплекса; б – пульт управления



а



б

Рис. 21.18

Представление данных (а) и технические характеристики (б) мобильного лидарного комплекса

21.6.

ЛАЗЕРНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Гидрографическая разведка и навигационная картография имеют первостепенное значение для безопасной навигации в прибрежных водах. Это важно не только для торговых, промысловых и пассажирских судов, но и для военного применения. Для этих целей используют методы акустической и лазерной батиметрии.

Лазерная батиметрия – это методика измерения глубины, как правило, относительно мелководных прибрежных вод, с помощью сканирующего импульсного лазерного луча. Измерительная аппаратура, как правило, устанавливается на борту вертолета или самолета, поэтому данный метод называют воздушной лазерной батиметрией (ВЛБ). Лазерная батиметрия использует принцип лазерного сканирования с использованием длин волн попадающих в полосу пропускания воды.

Поглощение чистой водой обусловлено поглощением молекулами H_2O , $NaCl$, $MgCl_2$, Na_2SO_4 , $CaCl_2$, и KCl , которые обладают полосами и линиями поглощения в оптическом диапазоне, оставляя, однако, область сравнительно низкого поглощения в голубо-зеленой (400–500 нм) части спектра (рис. 21.19).

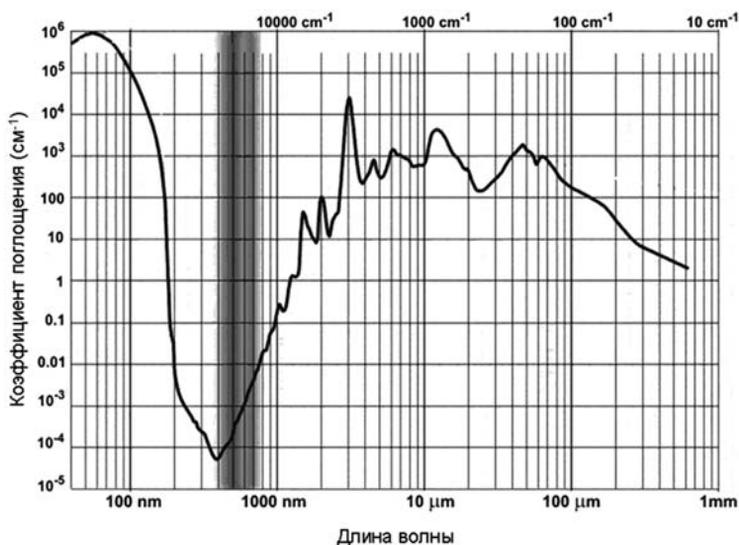


Рис. 21.19

Спектр поглощения чистой воды

Физические свойства океанской воды изменяются в зависимости не только от географического расположения, но и вертикальной глубины. Естественная вода

разделяется на два типа: океанскую (голубую) и прибрежную. В свою очередь эти два типа делятся на три подгруппы (I–III): I – очень чистая океанская вода, II – тропическая и субтропическая вода, III – среднеширотная вода.

Тем не менее, основной вклад в ослабление проходящего через воду излучения оказывает присутствие в ней разного рода частиц органического и неорганического происхождения. В зависимости от степени замутненности пропускание воду можно разделить на и группы с 1-й по 9-ю соответственно. На рис. 21.20 представлено относительное пропускание для разного содержания и видов частиц на 10 метров приповерхностной воды в зависимости от длины волны.

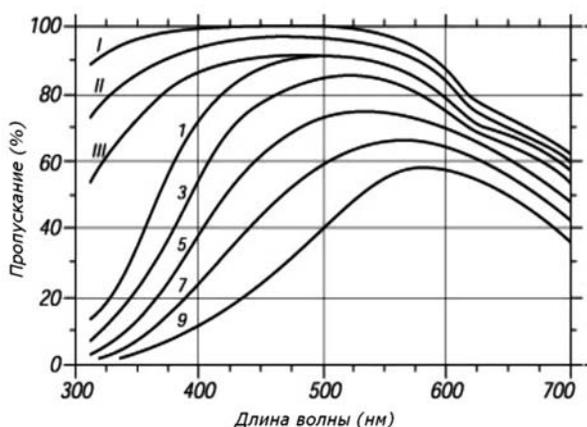


Рис. 21.20

Относительное пропускание морских вод

Максимальная измеримая лазером глубина зависит от прозрачности воды, и, как правило, в три раза больше глубины Секки. Глубина Секки – старый эмпирический метод количественной оценки прозрачности воды. Она равна глубине, на которой стандартный черно-белый диск становится не виден невооруженным глазом.

Ослабление оптического излучения в воде обусловлено поглощением самой водой, растворенными веществами, органическими составляющими и рассеянием на молекулах воды, растворах и частицах как органической, так и неорганической природы. Коэффициент оптического ослабления различен для каждого типа воды, и меняется в пределах 0.02 до 3 м^{-1} . Вследствие сильного ослабления лазерного излучения в воде глубина проникновения лазерного излучения невелика. Максимальная глубина измерения системы составляет $40\text{--}50 \text{ м}$ в прозрачных океанских водах, $20\text{--}40 \text{ м}$ в прибрежных и менее 20 м в более мутных внутренних водах. Другие факторы, которые ограничивают глубину измерения и точность системы, включают в себя высокие поверхностные волны, густой туман и осадки, солнеч-

ный блеск, наличие густой придонной растительности и иловых отложений. На рис. 21.21 схематично представлены типичные глубины проникновения лазерного излучения в толщу воды, в зависимости от длины волны.

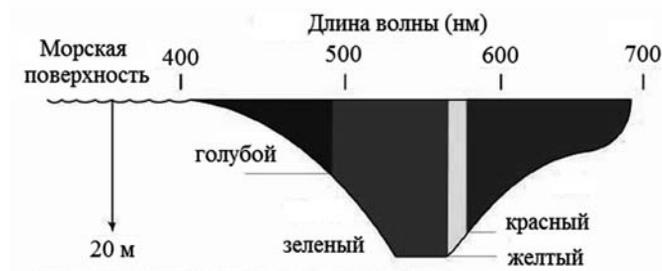


Рис. 21.21

Глубина проникновения лазерного излучения в морскую воду

Наблюдение подводных объектов осложняется мощным рассеянием мутной подводной среды. При подсветке объектов мощными непрерывными источниками света рассеянное излучение, возникающее в ближней зоне, маскирует сравнительно слабое излучение, отраженное (или рассеянное) самим объектом наблюдения. Поэтому, несмотря на наличие в энергетическом спектре изображения достаточной энергии излучения, рассеянной объектом, дальность действия таких систем ограничена рассеянием самой среды в ближней зоне.

Принципиальным решением, позволяющим избежать вредного влияния рассеяния ближней зоны, является применение импульсной лазерной подсветки в сочетании со стробированием наблюдающей камеры. При этом используется то обстоятельство, что рассеяние из ближней зоны и рассеяние от объекта наблюдения разделены во времени. Для видео- или фотосъемки объекта, расположенного на расстоянии, когда естественного освещения или излучения самого объекта недостаточно, в условиях малой видимости водной среды для надежного выделения на фоне необходимо использовать дополнительную подсветку.

При использовании в качестве источника подсветки мощной лампы существует опасность сильной засветки камеры. Подобного ситуации можно избежать, разнеся источник и камеру на достаточное расстояние. Однако в некоторых случаях, например требующих скрытности или невозможности разнесения источника подсветки и камеры, такой подход оказывается не эффективным.

Другой вариант – использовать импульсные лазеры и стробируемые видеокамеры с наносекундной экспозицией. Их устройство схематично представлено на рис. 21.22. Излучение от объекта испытывает в данном случае двойное преобразование фотон → электрон → фотон. Спектральная чувствительность камеры зависит от материала фотокатода и флуоресцентного экрана (рис 21.23).



Рис. 21.22
Устройство ICCD камеры

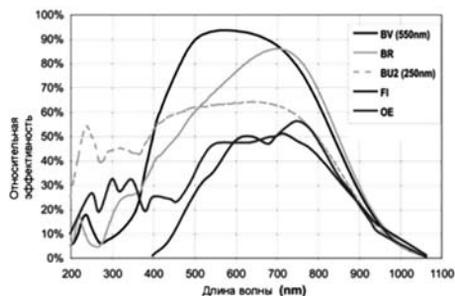


Рис. 21.23
Относительная спектральная эффективность камер для подводного зрения

На рис. 21.24 показаны примеры изображений подводного объекта получаемых при использовании обыкновенной и стробируемой камерой. Таким образом, применение стробируемых нанокамер и импульсных лазеров подсветки позволяет значительно повысить контраст подводного объекта.

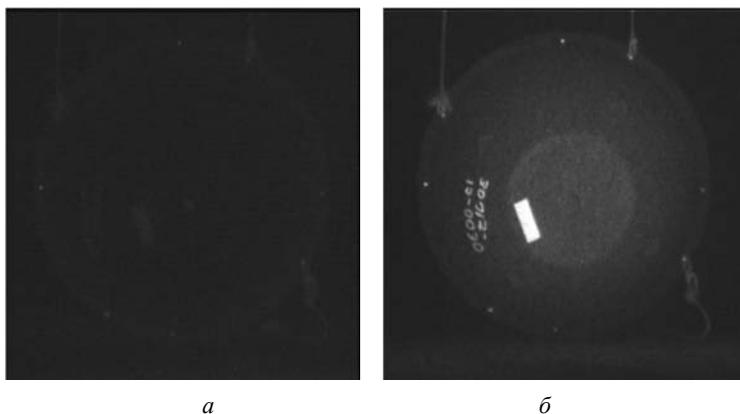


Рис. 21.24
Изображение, получаемое обычной (а) и стробируемой (б) камерой

Использование лазерного сканера, установленного на подводном аппарате, позволяет получать детальную картину морского дна (рис. 21.25). В случае зеленого лазера на длине волны 532 нм, большая часть излучения проникает в толщу воды. Часть импульса зеленого лазера, достигнув дна, подвергается рассеянному отражению. Рассеянно отраженное излучение проходит обратно сквозь воду и лишь малая его часть достигает приемника в пределах его поля зрения. Приемник

измеряет интенсивность и момент времени прихода отраженного импульса, сравнивает с временем исходящего импульса. Глубина воды вычисляется как разница между временем прямого – обратного распространения отраженного от поверхности лазерного луча на длине волны 532 нм.

Вооруженные силы во всем мире оснащены лазерными батиметрическими системами воздушного базирования.

Например, аналогичными приведенной на рис. 21.26 авиационными батиметрическими сканирующими системами HawkEye III. Там же можно наблюдать и результат сканирования прибрежной зоны.

Цветом указаны относительные высоты и глубины. Система обеспечивает точность измерения глубины порядка 20 см и горизонтальную точность порядка 1.5 м. В режиме сканирования может обеспечить непрерывное топографическое и батиметрическое отображение береговой линии.

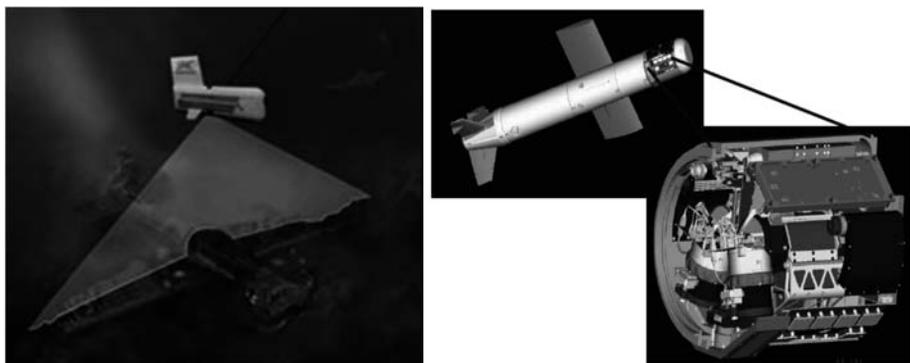


Рис. 21.25

Вариант сканирующего лазерного модуля, установленного на подводном аппарате



Рис. 21.26

Авиационная батиметрическая сканирующая система HawkEye III (слева) и результат сканирования прибрежной зоны (справа)

Батиметрические лидарные системы могут быть использованы не только для профилирования морского дна, но и для поиска объектов на дне и в толще воды, например плавучих мин или пловцов. Например, лазерная батиметрическая система ALMDS, разработанная компанией Northrop Grumman (рис. 21.27), устанавливается на вертолет и позволяет оператору получить трехмерное изображение водной поверхности и водной толщи, тем самым позволяя обнаруживать плавающие и якорные мины.



Рис. 21.27

Система обнаружения плавающих и якорных мин ALMDS (Northrop Grumman), установленная на MH-60 Black Hawk

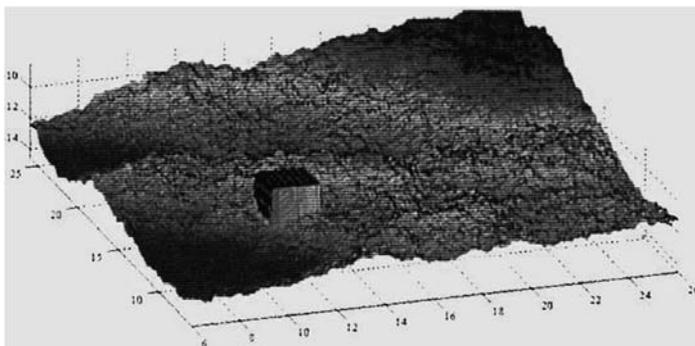


Рис. 21.28

Подводный объект, расположенный на дне водоема и обнаруженный с помощью батиметрического лидара

На рис. 21.28 представлен результат сканирования подводного объекта (ящика), расположенного на дне с помощью батиметрического лидара, установленного на воздушной платформе.

Таким же образом, используя сканер, установленный на подводном аппарате, можно обнаруживать объекты, находящиеся на глубинах, значительно превышающих те, которые достижимы с использованием систем воздушного базирования.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 21

21.1. Принципиально новые возможности открывает использование лазеров в локационных системах и для ситуационного контроля непосредственно во время боевых действий в режиме реального времени

21.2. Лидар – устройство для получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеяния в прозрачных и полупрозрачных средах.

21.3. Неотъемлемой частью лидара является система сбора обратно отраженного излучения и система управления зондирующим лучом, которая позволяет сканировать заданный сектор пространства. При обработке полученных данных сканирования сектора можно построить 3D-картину исследуемого пространства.

21.4. Для компенсации негативного влияния турбулентности также разработаны алгоритмы обработки изображений в режиме реального времени позволяющие с помощью методов деконволюции и накопления кадров значительно повысить качество изображения даже в условиях сильной турбулентности.

21.5. Приборы, которые принято называть лазерными сканерами или «ладарами», можно рассматривать как механическое совмещение двух компонентов – дальномерного (сканирующего) блока и навигационного комплекса типа «GPS/Глонасс + инерциальная система».

21.6. Системы лазерного сканирования применяются не только для геодезической съемки местности для построения цифровых карт местности, но и для обеспечения безопасности полета в условиях плохой видимости, так как камеры видимого или ИК диапазона, а также тепловизионные камеры не позволяют с высокой достоверностью и на больших дистанциях получить картину расположения опасных объектов и их параметров.

21.7. Лазерная батиметрия – это методика измерения глубины, как правило, относительно мелководных прибрежных вод, с помощью сканирующего импульсного лазерного луча.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 21

21.1. Раскройте основные принципы 3D-лазерной локации.

- 21.2. Дайте определение широкоапертурного лидара.
- 21.3. Каким образом осуществляется компенсация помех обратного рассеяния?
- 21.4. В чем заключается метод лазерного сканирования? Каковы отличия лидара от лидара?
- 21.5. Дайте описание и принцип работы систем дистанционного зондирования атмосферы.
- 21.6. Объясните цели и задачи лазерной батиметрии.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 21

- 21.1. Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие. – СПб.: «Лань». – 2016.
- 21.2. Anil K. Maini. Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications. – John Wiley and Sons Ltd., London – Delhi. – 2013.
- 21.3. Рубаненко Ю.В. Военные лазеры России. Научное издание. М.: Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2013. – 390 с.
- 21.4. Энциклопедия XXI век «Оружие и технологии России». Том XI, «Оптико-электронные системы и лазерная техника». – М.: ИД «Оружие и технологии», 1999. – 720 с.
- 21.5. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.
- 21.6. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 510 с.
- 21.7. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 550 с.

ЧАСТЬ VII

**ПЕРСПЕКТИВЫ
ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ**

А. С. Борейшо, С. В. Ивакин, М. Ю. Ильин, С. Ю. Страхов, А. В. Федин

ВВЕДЕНИЕ К ЧАСТИ VII

В предыдущих разделах были рассмотрены применения лазеров и лазерной техники в различных отраслях народного хозяйства, как правило, там, где они уже занимают определенное место, способствуя решению конкретных практических задач.

Настоящая часть посвящена самым перспективным направлениям развития науки и технологий, в развитии которых лазеры могут сыграть решающую роль, обеспечив в ближайшие годы новые прорывные достижения. Естественно, что такой взгляд не может не быть субъективным, отражающим наш скромный опыт и знания в такой исключительно широкой области, как лазерные технологии.

Можно видеть, что развитие самих лазеров по некоторым параметрам уже подошло к естественным пределам, устанавливаемым фундаментальными законами природы. Однако и в таких ситуациях пытливая мысль ученых и инженеров позволяет «заглянуть за горизонт», расширяя возможности лазерной техники. Не менее интересной представляется и возможность технологических прорывов с помощью самых «обычных» лазеров.

Это показывает, что хотя основным трендом расширения роли лазеров в народном хозяйстве в ближайшей перспективе будет усовершенствование лазерной техники и технологий в традиционных, уже освоенных направлениях, в то же время можно с большой долей уверенности ожидать появление и реализацию принципиально новых идей в самых неожиданных областях.

ГЛАВА 22

ЛАЗЕРЫ И РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

22.1. СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ДИАПАЗОНЫ МИКРОПРОЦЕССОВ

Применение лазеров дает мощнейший толчок развитию новых и совершенствованию старых методов исследования вещества. Стало возможным с помощью импульсов малой длительности изучать динамику быстрых процессов, протекающих в атомах, молекулах, веществе в различных состояниях, биологических системах.

На рис. 22.1 схематически показаны характерные временные масштабы некоторых атомных, молекулярных и твердотельных физических процессов.



Рис. 22.1

Характерные спектральные временные масштабы микропроцессов

Из рис. 22.1 можно видеть, что пико- и фемтосекундное разрешение позволяет изучать колебательное и вращательное внутримолекулярное движение, динамику

носителей в полупроводниках (и полупроводниковых наноструктурах), фазовые переходы в твердых телах, формирование и разрыв химических связей и т. д.

В последние десятилетия были разработаны способы генерации пикосекундных и фемтосекундных импульсов, что открыло перед наукой казавшиеся ранее невероятными возможности. Однако дальнейшее уменьшение длины импульса в оптическом диапазоне принципиально невозможно. Период электромагнитного колебания в световой волне – около фемтосекунды, а получить лазерный импульс короче одного периода никак не получится. Поэтому для дальнейшего сокращения лазерного импульса приходится использовать более высокочастотное излучение – ультрафиолет или мягкий рентген. Получение сверхкоротких ультрафиолетовых или рентгеновских импульсов с длительностью в аттосекундном диапазоне – сама по себе сложнейшая задача; физики смогли ее решить лишь в 2000-е годы (рис. 22.2).

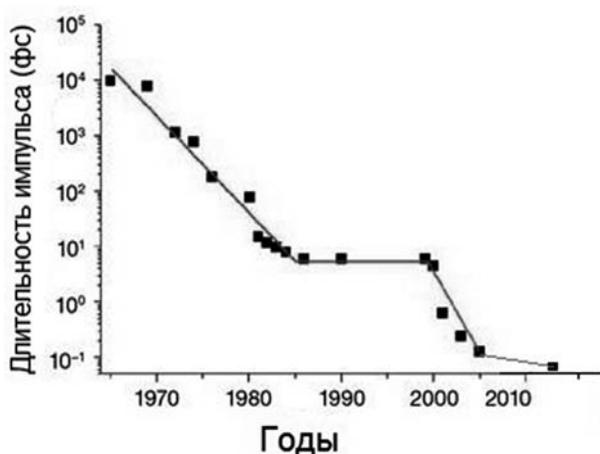


Рис. 22.2

Развитие технологий получения сверхкоротких лазерных импульсов

Решение заключается в конвертации части энергии коротких фемтосекундных импульсов оптического диапазона в более коротковолновое излучение (генерация высоких гармоник – излучения с частотой, кратной частоте начального импульса) с использованием сверхбыстрых нелинейных оптических эффектов (см. «Лазеры: устройство и действие», часть 3).

Известный на сегодня самый короткий лазерный импульс жесткого ультрафиолетового излучения длительностью 67 аттосекунд был получен в 2012 году в США. Это открытие стало первым значимым прорывом в области лазерных импульсов за последние четыре года.

Однако дальнейшее уменьшение длительности лазерных импульсов связано с разработкой лазерных технологий рентгеновского диапазона, что является серьезной научно-технической задачей.

22.2.

ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ

22.2.1.

ФЕМТОХИМИЯ

Воздействие лазерными ультракороткими фемтосекундными импульсами длительностью 10^{-15} – 10^{-12} с позволило осуществить прорыв в изучении кинетики элементарных химических взаимодействий. Продолжительность такого импульса гораздо меньше периода колебаний атомов в молекулах (10^{-13} – 10^{-11} с). Благодаря такому соотношению времен с помощью фемтосекундных лазеров можно детально изучать процессы, происходящие в ходе химических реакций — как перемещаются во времени и в пространстве атомы, когда молекулы-реагенты преобразуются в молекулы продуктов.

За работы в этой области Ахмед Зевейл получил Нобелевскую премию по химии 1999 г. с формулировкой: «За исследования химических реакций в реальном масштабе времени с помощью фемтосекундной спектроскопии». Главный результат работ состоит в том, что появилась возможность непосредственно наблюдать за протеканием элементарных химических реакций, и тем самым создан новый раздел химии — *фемтохимия*.

Применение фемтосекундных лазеров позволяет не только обеспечивать высокое временное разрешение для наблюдения за поведением молекул, но и управлять этими процессами: образовывать когерентные колебательно-вращательные волновые пакеты, осуществлять многофотонные процессы поглощения, воздействовать на поверхность потенциальной энергии. Принципиальная схема изучения процессов с фемтосекундным разрешением показана на рис. 22.3.

На выходе из лазера луч разделяется на два: возбуждающий (воздействующий на изучаемый объект) и зондирующий, при этом энергия импульса первого луча может значительно превышать энергию второго.

Далее возбуждающий луч направляется непосредственно на объект, а зондирующий проходит через линию задержки, позволяющую обеспечить временное разрешение вплоть до нескольких фемтосекунд. Поскольку $1 \text{ мкм} \approx c \times 3.3 \text{ фс}$ (c — скорость света), пространственное разрешение в таких исследованиях находится на микронном уровне.

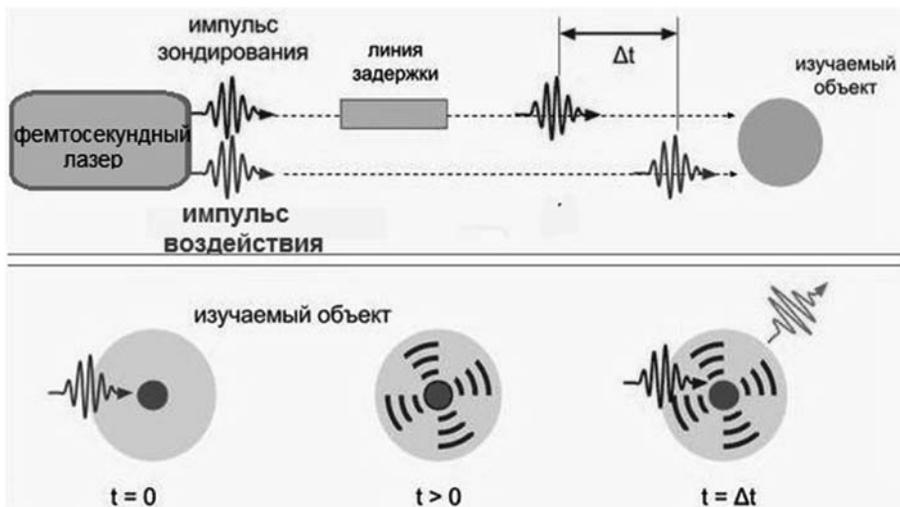


Рис. 22.3

Схема «воздействие-зондирование» с фемтосекундным разрешением

Однократный импульс даст мало информации. Но если раз за разом повторять эксперимент с разными значениями задержки Δt , а потом соединить все эти данные, можно увидеть, как разворачивается во времени отклик атома или молекулы в ответ на внешнее воздействие.

В качестве отклика регистрируют фотоиндуцированное поглощение, флуоресценцию, поворот плоскости поляризации и т.д. Возбуждающими импульсами могут быть также ультракороткие импульсы электронов и рентгеновского излучения. Таким образом можно осуществлять детальное микроскопическое изучение химических процессов и управление ими на фемтосекундной шкале времени.

Изучением элементарных реакций занимается специальный раздел химии – *химическая динамика* – высшая, элитарная часть химической кинетики. Основная задача химической динамики – определить структуру переходного состояния и проследить динамику его образования и распада в реальном времени.

Классическим примером реакции, динамика которой была прослежена на фемтосекундном масштабе времени, может служить развал молекулы иодида натрия при поглощении света (рис. 22.4).

Сразу после поглощения возбуждающего импульса лазерного излучения молекула переходит в промежуточное возбужденное состояние, в котором ионы натрия и иода колеблются с периодом в сотни фемтосекунд, и лишь спустя некоторое время молекула разваливается. График слева показывает количество вылетевших атомов натрия через определенное время после поглощения света.

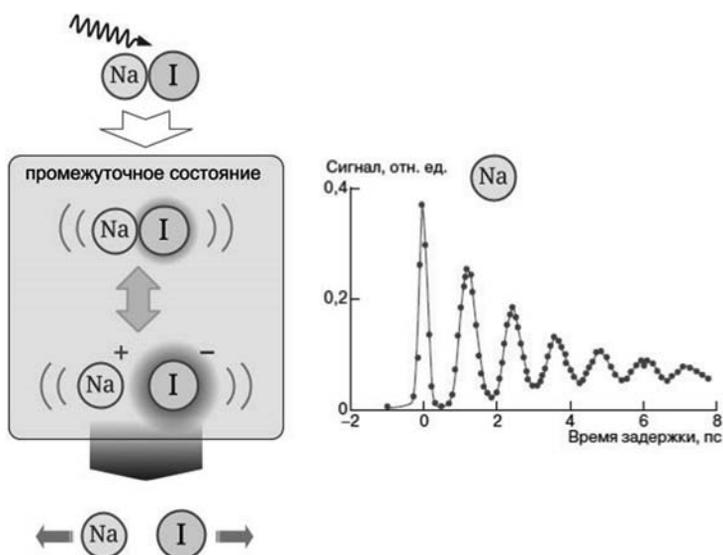


Рис. 22.4

Диссоциация молекулы иодида натрия при поглощении света

Времена 10–100 фс настолько малы по отношению к периоду колебаний ядер, что за это время ядра почти неподвижны и сохраняют свои положения. В этом случае фемтосекундный импульс может захватывать ансамбли молекул с определённым межатомным расстоянием и фазой движений и переносить их в новый потенциал почти мгновенно.

По законам квантовой механики спектральная ширина фемтосекундного импульса связана с его длительностью известным соотношением (см. «Лазеры: устройство и действие», часть 1), т. е. чем короче импульс, тем больший диапазон энергий возбужденного состояния он может охватить. Поэтому, как правило, фемтосекундный импульс позволяет когерентно возбуждать сразу несколько колебательных состояний. Такой тип возбужденного состояния называется когерентным волновым пакетом, который представляет собой нестационарное состояние молекулы.

В этом новом потенциале атомы начинают новое, теперь уже когерентное, синхронное движение. Таким образом, фемтосекундный импульс создаёт волновой пакет – ансамбль молекул-осцилляторов с фиксированной фазой колебаний, заданным межатомным расстоянием и определённой энергией. Другими словами, фемтохимия открыла пути создания когерентных волновых пакетов и стала базой *когерентной химии*.

Высокое разрешение по времени и длине позволяет осуществлять мониторинг движения отдельных ядер на потенциальной поверхности, в том числе на вершине барьера, т.е. изучать элементарные переходные процессы. То, что ранее было объ-

ектом только теоретического анализа, теперь становится предметом экспериментальных исследований. Фемтохимия измеряет время движения реагирующих систем на потенциальной поверхности, используя экспериментальную химическую динамику для изучения химической кинетики.

Осуществляя мониторинг движения ядер, можно вмешиваться в динамику переходного состояния, производя его энергетическую или фазовую накачку, изменяя направления реакции уже самого переходного состояния; можно сказать, что фемтохимия есть химия переходного состояния.

Таким образом, применение лазеров раздвинуло горизонты химии и внесло в химию новые идеи. И это не просто новый для химии язык; это новый уровень мышления, новый уровень технологии химического исследования. В когерентной химии случайное, статистическое поведение молекул заменяется поведением организованным, упорядоченным, синхронным: хаос становится порядком.

22.2.2. ФЕМТОБИОЛОГИЯ

Успехи, достигнутые при использовании фемтосекундных импульсов, привели к открытию другой науки – *фемтобиологии*. Теперь возможно проводить исследования не только в газовой, но и в конденсированной фазе (растворы, межфазные границы, полимеры и др.), а также и в мезоскопической фазе (кластеры, наночастицы, нанотрубки и др.).

Внутри живого организма также постоянно идут химические реакции. Собственно жизнь – это и есть идущие одновременно повсюду химические, атомные и электронные процессы внутри живых клеток. Среди жизненно важных явлений – фотоиндуцированные (т. е. вызванные светом) процессы в светочувствительных биологических молекулах. На этих процессах работает фотосинтез, зрение и некоторые другие биологические реакции на свет. В ходе эволюции появились сложные молекулярные комплексы способные преобразовывать энергию света для выполнения своих биологических функций (например, фотосинтез, зрение).

Помимо исследования реакций простых химических систем, можно изучать органические молекулы и даже биомолекулы (ДНК, гемоглобин и др.). Особый интерес представляет фемтобиология фотобиологических реакций, которые играют огромную роль в природе. В частности, были проведены исследования первичных процессов фотосинтеза, фотоактивируемого протонного насоса бактериородопсина, а также зрительного пигмента родопсина.

В состав родопсина входит интегральный мембранный белок (опсин) и хромофорная группа (11-*цис*-ретиналь). Зрительный пигмент интересен не только как белок, позволяющий нам получать информацию о внешнем мире, но и как модельный объект для исследования других ретиналь-содержащих белков и рецепторов, сопряженных с G-белками. Под действием света происходит реакция изо-

меризации 11-*цис*-ретиная полностью в *транс*-форму. Благодаря фемтосекундной спектроскопии удалось обнаружить, что фотоизомеризация в белке происходит всего за 200 фс с высоким квантовым выходом (0.65), что в несколько раз превосходит скорость и квантовый выход изомеризации свободного ретиная в растворе. Таким образом, белковое окружение играет ключевую роль в динамике этой реакции.

Квантово-механическая реакция молекул и движение волнового пакета по поверхности потенциальной энергии вдоль координаты реакции показаны на рис. 22.5.

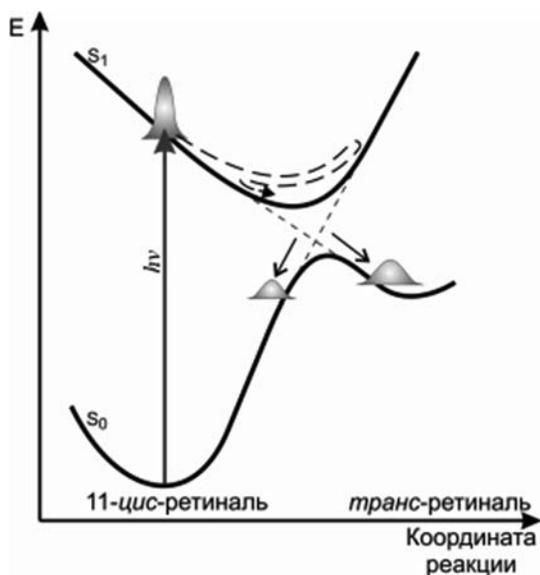


Рис. 22.5

Сечение поверхности потенциальной энергии по координате реакции

При поглощении фемтосекундного импульса света в молекуле создается волновой пакет, в котором движения ядер синхронизированы, а энергия возбуждения локализована в определенном месте молекулы. В обычных реакциях синхронизация движения ядер быстро теряется, а энергия возбуждения расплывается по молекуле, и движение ядер становится стохастическим (несинхронизованным). Однако если возбуждать молекулу родопсина лазерным излучением, то фотохимическая реакция протекает в когерентном режиме и происходит быстрее процессов в обычных условиях. Сохранение волнового пакета в течение нескольких пикосекунд, позволяет реакции протекать с рекордной скоростью.

Образованный волновой пакет двигается по поверхности потенциальной энергии первого возбужденного электронного состояния, а затем разделяется на два

подпакета. Один подпакет образуется на поверхности основного электронного состояния за 200 фс после возбуждения и соответствует продукту реакции с изомеризованным транс-ретином (справа), а другой подпакет возвращается в потенциальную яму основного состояния реагента, содержащего 11-цис-ретиналь (слева).

Структура волнового пакета зависит от свойств возбуждающего лазерного импульса, а именно от амплитудно-фазовых характеристик спектральных компонент излучения, которое создал этот волновой пакет, а форма волнового пакета может приводить к изменению динамики и выхода реакции. Таким образом, меняя характеристики лазерного излучения (длительность, интенсивность, частоту колебаний электрического поля), можно влиять на ход реакции можно управлять выходом реакции, не меняя температуру, давление и не используя другие обычные способы управления реакциями. Локализуя лазерную энергию в нужном месте молекулы можно осуществить разрыв определенной связи и получить желаемый продукт. Такой новый способ управления называют когерентным или квантовым управлением.

Современные методы управления лазерным излучением позволяют изменять амплитудно-фазовые характеристики возбуждающего фемтосекундного импульса. Импульс простого вида раскладывают на отдельные частоты, а затем определенные частоты усиливают, а другие ослабляют или удаляют, и получают импульс с заданными характеристиками. Сначала реакцию запускают обычным импульсом и анализируют отношение выходов целевого и побочных продуктов, затем изменяют параметры возбуждающего импульса, и реакцию проводят снова. Так продолжают до тех пор, пока не достигнут максимального выхода желаемого продукта (рис. 22.6). При помощи такого подхода были получены прекрасные результаты управлением реакцией фотоизомеризации бактериородопсина. Удалось изменить квантовый выход продукта реакции на 20% как в большую, так и в меньшую сторону.

Современная лазерная техника позволяет в ходе эксперимента неоднократно возбуждать систему. Например, существует схема «нагрузка-разгрузка» (pump-dump), изображенная на рис. 22.6, в. Возбуждающий импульс создает волновой пакет в возбужденном состоянии, который движется вдоль координаты реакции. Когда достигается область продуктов, второй импульс переводит систему в основное состояние, соответствующее желаемым продуктам. Помимо форм импульсов здесь появляется новый управляющий параметр – время задержки между импульсами.

Возможны и другие схемы когерентного управления фотохимическими реакциями в макромолекулах, которые используют другие управляющие параметры (например, зависимость спектральных компонент возбуждающего импульса от времени) или их совокупность.

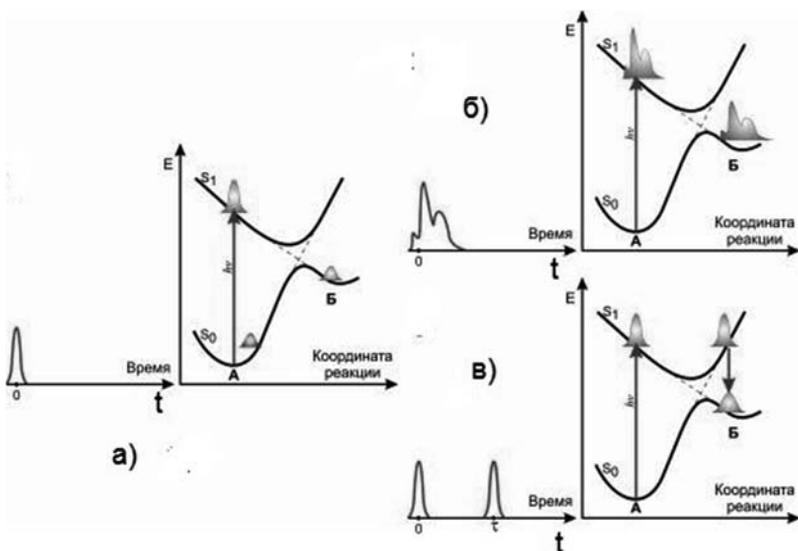


Рис. 22.6

Схемы управления химическими реакциями:

a – эксперимент без управления, *б* – управление при помощи амплитудно-фазовых характеристик импульса, *в* – схема «нагрузка-разгрузка» (*t* – время прихода возбуждающего импульса, S_0 , S_1 – схемы потенциальных поверхностей и образование волновых пакетов; Б – желаемый продукт)

Другой пример, который активно изучается в последнее время, это поразительная эффективность фотосинтеза в некоторых бактериях. Эксперименты надежно показывают, что эти бактерии могут преобразовывать поглощенный свет в энергию с помощью промежуточного возбуждения электронов за исключительно короткое время, порядка сотни фемтосекунд. Похоже, эти бактерии научились использовать квантовые свойства электронов для наискорейшей передачи электронного возбуждения непосредственно от фоторецепторов к самой клетке.

Исследование биологических систем в фемтосекундном масштабе времени позволяет раскрывать механизмы необычайно быстрых и селективных реакций в биомолекулах, а также управлять ими для повышения выхода желаемых продуктов или купирования нежелательных процессов.

Таким образом, применение современных лазеров в биологии и использование сверхскоростных управляемых реакций в биологических системах может привести к принципиально новым решениям для создания новых технологий, в перспективе и дополнить достижения эволюции.

22.3. АТТОФИЗИКА

В отличие от химических и биологических процессов, управлять которыми на микроуровне можно с помощью лазерных импульсов в десятки и сотни фемтосекунд, для изучения поведения электронов в атоме такие времена слишком медленные. Для атомарного уровня нужны еще более короткие световые импульсы длительностью в единицы фемтосекунд и даже аттосекунды. Поэтому для изучения физических процессов нужно использовать более высокочастотное излучение – ультрафиолет или даже мягкий рентген.

Аттофизикой называют область физики, связанную с исследованием быстропротекающих физических процессов с аттосекундными временным разрешением (в диапазоне от 10^{-18} до 10^{-15} с). В получении аттосекундного светового импульса может помочь движение электронов в атоме. Идея этого метода и основные процессы, характерные для взаимодействия фотона с атомом иллюстрируются рис. 22.7.

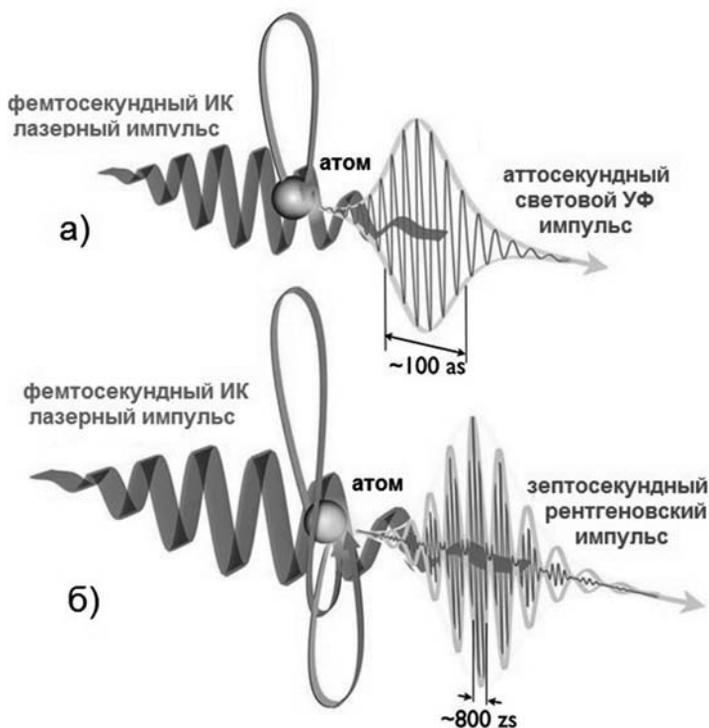


Рис. 22.7

Взаимодействие атома с высокоэнергетическим фотоном

Сначала на атом направляют лазерный импульс фемтосекундной длительности. Если оптический импульс достаточно мощен и хорошо сфокусирован (плотность мощности порядка 10^{15} Вт/см² и выше), то напряженность электрического поля, действующего на атомы, становится сопоставима с внутриатомным электрическим полем (порядка 10^9 В/см), т.е. становится достаточной, чтобы вызвать ионизацию атома за счет подавления кулоновского барьера. Излучение с достаточно высокой энергией может выбить электрон с внутренних электронных оболочек атома. Освобожденный из атома электрон совершает колебательное движение в поле лазерного импульса; поскольку поле сильно, электрон может приобрести при этом большую кинетическую энергию.

В результате на этой электронной оболочке образуется вакансия. Образовавшаяся вакансия может заполниться либо безызлучательным способом, когда избыток энергии передается одному или нескольким электронам, либо при испускании фотона, называемого характеристическим и попадающего обычно в рентгеновскую область спектра.

Процесс безызлучательного заполнения вакансий во внутренних электронных слоях атомов и ионов называется эффектом Оже. В результате эффекта Оже и за счёт эффекта стряхивания внешних электронов из атома часто выбрасывается не один, а много электронов (автоионизация). Эффект Оже преобладает для лёгких элементов первой половины периодической системы Менделеева, а характеристические фотоны испускаются с большей вероятностью после ионизации внутренних слоев более тяжелых элементов.

В таком случае электрон не «улетает» далеко от атома, а начинает совершать колебания в сильном переменном электрическом поле светового импульса. Через полпериода электрон возвращается обратно и с большой энергией взаимодействует с другими электронами атомной оболочки, в результате чего рождается сверхкороткая вспышка электромагнитного излучения. Таким образом, за короткое время (много меньшее оптического периода возбуждающего импульса) происходит генерация коротковолнового излучения длительностью импульса в сотни аттосекунд.

Применяемый сегодня вариант такой спектроскопии (рис. 22.7, *а*) может использовать лишь ту часть электронов, которая после обращения фазы лазерного излучения и изменения направления электрического поля на противоположное сталкивается с атомом. Однако многие электроны с ядром не сталкиваются, избегая участия в процессе, который заканчивается вспышкой излучения.

Новый подход, активно обсуждаемый сейчас учеными-физиками, позволяет задействовать также электроны, не сразу сталкивающиеся с ядрами атомов (рис. 22.7, *б*). Основная идея заключается в том, что при вторичном обращении направления электрического поля в облучаемом облачке атомов электроны, в первый раз «промахнувшиеся» мимо ядер своих атомов, всё ещё могут столкнуться-

ся с ними. При этом электроны, попавшие в цель со второй попытки, будут порождать рентгеновское излучение слегка другой длины волны, что позволит наблюдателю отделить одни электроны от других.

Ещё более важно то, что электроны «второй волны попаданий» будут сталкиваться с ядрами быстрее. Следовательно, любой аттосекундный импульс породит целую цепочку рентгеновских микровспышек, каждая из которых продлится всего несколько сотен зептосекунд ($1 \text{ зс} = 10^{-21} \text{ с}$). Хотя пока продемонстрировано, как генерировать импульсы, отделяющиеся друг от друга, по меньшей мере 800 зептосекундами, вероятно достижимы и куда меньшие промежутки, причём нижний предел временного разрешения такой техники пока остаётся неясным.

Сейчас эта идея активно разрабатывается и совершенствуется. Улучшенная версия этой же идеи позволит генерировать импульсы рентгеновского излучения с длительностью сотни зептосекунд. Такой инструмент может стать одним из самых эффективных средств для экспериментального изучения микромира.

С помощью аттофизики ученые уже сейчас могут не только отслеживать сверхбыстрые перемещения электронов в молекулах (перестройку их электронных оболочек с временным разрешением 100 аттосекунд), но и управлять такими перемещениями. Эти процессы – ключ к пониманию химических и биохимических реакций, поскольку образование новых химических связей и заключается в «перераспределении» электронов.

Такие возможности были продемонстрированы в эксперименте с молекулами йодацетилена (HCCI), которые представляют собой вытянутые цепочки из четырех атомов – водорода, двух атомов углерода и атома йода. Под действием мощных и очень коротких лазерных импульсов конфигурация электронной оболочки молекулы менялась: в ней возникала «вакансия», которая затем начинала колебаться, перемещаясь от одного конца молекулы к другому с характерным временем порядка 100 аттосекунд (рис. 22.8).

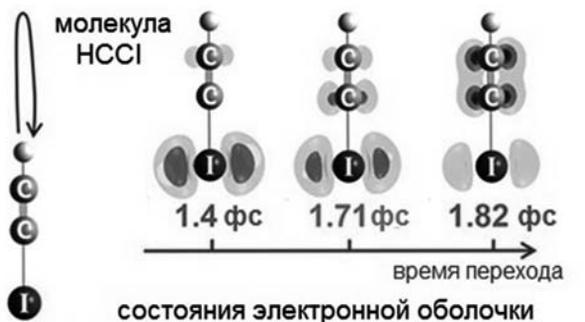


Рис. 22.8

Изменение состояния электронной оболочки молекулы HCCI под действием сверхкороткого мощного лазерного импульса

Облучая ориентированные молекулы мощными лазерными импульсами, можно получить спектры высоких гармоник, которые отражают состояние электронной оболочки молекулы. Таким образом, впервые был получен весь набор информации, включая относительные фазы гармоник, необходимый для восстановления динамики перемещения «вакансий». Кроме того, имеется возможность влияния на динамику перестройки в электронной оболочке молекулы лазерным полем, что может помочь управлять химическими реакциями.

22.4. ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ АТОМОВ

Для новых открытий в современной науке не обязательно должны использоваться лазеры с экстремальными характеристиками. Интереснейшие и очень перспективные результаты могут получаться с помощью «обычных» лазеров. В 1997 г. Нобелевская премия по физике была присуждена двум американским (У. Филлипс и С. Чу) и французскому (К. Коэн Таннуджи) ученым «за развитие методов лазерного охлаждения атомов».

Атом в лазерном поле может поглощать фотоны, переходя при этом в возбужденное состояние, при этом фотоны передают ему свои импульсы. Возвращаясь в основное состояние, атом переизлучает фотоны по всем возможным направлениям (рис. 22.8).

В результате атом испытывает световое давление в направлении распространения лазерного луча. Возбуждение атома происходит в том случае, когда частота света близка к частоте оптического перехода атома.

Атом с частотой перехода ν_0 , двигаясь вдоль оси лазерного луча частоты ν , испытывает максимальное световое давление при резонансной скорости $V=(\nu-\nu_0)\lambda$ (эффект Доплера), где λ – длина волны лазерного излучения.

Если $\nu < \nu_0$, то резонанс возникает, когда атом движется против распространения луча и в этом случае атом замедляется.

Если атомарный газ со всех сторон облучать лазерным светом с частотой меньше частоты атомного

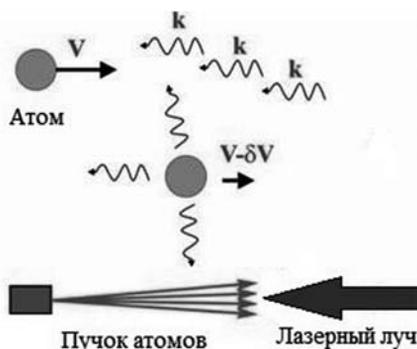


Рис. 22.8

Принципиальная схема возникновения светового давления на атом

перехода, то в газе увеличивается количество медленных атомов, что и означает уменьшение его температуры. Минимальная температура атомарного газа при лазерном охлаждении составляет 10^{-6} К.

Усилия ученых по охлаждению атомов позволили уменьшить энергию нейтральных атомов до таких величин, при которых стала возможной их пространственная локализация с помощью электрических, магнитных и лазерных полей. Это открыло новые экспериментальные возможности для резкого снижения температуры уже «холодных» атомов и начался новый этап исследований по более глубокому лазерному охлаждению.

В настоящее время, используя различные методы лазерного охлаждения нейтральных атомов, удаётся снизить температуру атомных ансамблей с 1000 К до 100 нК, т. е. на 10 порядков. На рис. 22.9 продемонстрирован прогресс в развитии методов лазерного охлаждения атомов, начавшийся с работ, выполненных в Институте спектроскопии РАН в 1981 г.

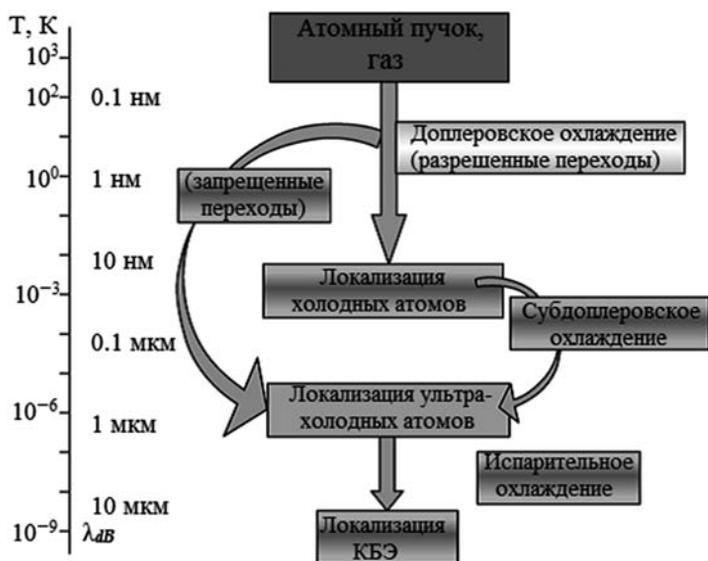


Рис. 22.9

Основные физические механизмы лазерного охлаждения нейтральных атомов

Навигация на «холодных» атомах обеспечивает на много порядков большую точность по сравнению с текущим уровнем лазерной навигации. В настоящее время навигация на «холодных» атомах находится на уровне прикладной разработки, а появление первых реальных систем, соответствующих шестому уровню технологической готовности, прогнозируется к 2019 г. для использования на крупных платформах (кораблях, больших самолетах) (рис. 22.10).

Чип с часами на «холодных» атомах также необходим для более малых, менее стабильных платформ, таких как баллистические ракеты, спутники и небольшие беспилотные аппараты. Достижение такой технологии ожидается к 2023 г.



Рис. 22.10

Ошибка позиционирования инерциальных навигационных систем на «холодных» атомах

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 22

22.1. Пико- и фемтосекундные импульсы лазерного излучения позволяют изучать колебательное и вращательное внутримолекулярное движение, динамику носителей в полупроводниках (и полупроводниковых наноструктурах), фазовые переходы в твердых телах, формирование и разрыв химических связей и т.д.

22.2. Фемтосекундный импульс может когерентно возбуждать сразу несколько колебательных состояний. Такой тип возбужденного состояния называется когерентным волновым пакетом, который представляет собой нестационарное состояние молекулы.

22.3. С помощью фемтосекундных лазеров можно управлять внутримолекулярными процессами: образовывать когерентные колебательно-вращательные

волновые пакеты, обеспечивать многофотонные процессы поглощения, воздействовать на поверхность потенциальной энергии.

22.4. Высокое разрешение по времени и длине позволяет осуществлять мониторинг движения отдельных ядер на потенциальной поверхности, в том числе на вершине барьера, т.е. исследовать элементарные переходные процессы.

22.5. Изменяя характеристики лазерного излучения (длительность, интенсивность, частоту колебаний электрического поля), можно влиять на ход химических и биологических реакций, управлять выходом реакции, не меняя температуру, давление и не используя другие обычные способы управления.

22.6. Локализуя лазерную энергию в нужном месте молекулы можно осуществить разрыв определенной связи и получить желаемый продукт. Такой новый способ управления называют когерентным или квантовым управлением.

22.7. Применение современных лазеров в биологии и использование сверхскоростных управляемых реакций в биологических системах должно привести к принципиально новым решениям для создания новых технологий.

22.8. Изучение поведения электронов в атоме требует световых импульсов длительностью в единицы фемтосекунд и даже аттосекунды. Поэтому для изучения физических процессов нужно использовать более высокочастотное излучение – ультрафиолет или даже мягкий рентген.

22.9. Использование сверхмощных фемтосекундных лазерных пучков, синхронизованных с внутриатомными процессами энергообмена, открывает пути реализации световых импульсов длительностью в аттосекунды и даже зептосекунды.

22.10. Если атомарный газ со всех сторон облучать лазерным светом с частотой меньше частоты атомного перехода, то в газе увеличивается количество медленных атомов, что и означает уменьшение его температуры.

22.11. В настоящее время, используя различные методы лазерного охлаждения нейтральных атомов, удаётся снизить температуру атомных ансамблей с 1000 К до 100 нК, т. е. на 10 порядков.

22.12. Навигация на «холодных» атомах обеспечивает на много порядков большую точность по сравнению с текущим уровнем лазерной навигации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ГЛАВЕ 22

- 22.1. Назовите диапазоны частот вращательного и колебательного движения молекул.
- 22.2. Какое расстояние пролетает свет за одну фемтосекунду?
- 22.3. Что такое волновой пакет в фемтохимии?
- 22.4. Что изучает когерентная химия?
- 22.5. Что такое когерентное или квантовое управление химическими реакциями?

22.6. Почему для изучения атомарных процессов нужно использовать УФ и рентгеновское излучение?

22.7. Как можно получить световые импульсы длительностью порядка одной фемтосекунды?

22.8. Как получают медленные или холодные атомы?

22.9. Для каких технологий нужны холодные атомы?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 22

22.1. Образовательный проект «Масштабы: времена». Электронный ресурс. URL: <http://elementy.ru/time/>

22.2. Зевайл, Ахмед Х. Фемтохимия. Изучение динамики химической связи в атомном масштабе времени с использованием ультракоротких лазерных импульсов: нобелевская лекция/ Нобелевские лекции на русском языке/ Химия. – Москва, 2006. С. 11-187.

22.3. Саркисов О.М., Уманский С.Я., Фемтохимия / Успехи химии. – 2001. – Т. 70. – №6. – С. 515-538.

22.4. Шувалов В.А., Саркисов О.М. Фемтобиология: первичные процессы фотосинтеза // Вестник Российской академии наук. – 2011. – Т. 81. №6. – С. 556-561.

22.5. Онищенко Е. Первые шаги аттофизики. Электронный ресурс. URL: <http://www.scientific.ru/journal/attophysics.html/>

22.6. Балькин В.И., Атомная оптика и ее приложения // Вестник РАН, 2011. – Т. 81. – №4 – С. 291–315.

22.7. Глобальные горизонты /Развитие глобальной науки и технологий // Итоговый доклад ВВС США, Релиз SAF/PA №2013-0434. Перевод с английского НПП «Лазерные системы», 2013. – 55 с.

ГЛАВА 23

ЛАЗЕРЫ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время характерной чертой развития лазерной техники является её масштабная интеграция в системы и комплексы различного назначения. В предыдущих главах книги было продемонстрировано применение лазеров в промышленности, IT, медицине, военном деле и др.

Развитие науки и техники обуславливает совершенствование как лазеров и лазерных систем, так и требования к построению и применению конечных комплексов – интеграторов технологий. Как следствие, во всё большем количестве областей человеческой деятельности становятся востребованными лазерные системы и технологии фотоники, благодаря своим уникальным возможностям, таким как:

- функционирование в широчайшем диапазоне масштабной шкалы: от фемто- до макро- размеров и времён, от локальных приложений до дистанционных;
- преобразование и распространение лазерной энергии с ультравысокими скоростями и частотами, формирование и восстановление формы импульсов;
- управление процессами в максимальном приближении к самим процессам за счёт значительного роста быстродействия сенсоров и пропускной способности линий связи.

23.1.

ЛАЗЕРЫ В КОСМОСЕ

По мере развития лазерных технологий всё большее внимание разработчиков устремлялось в сторону космических приложений. К настоящему времени отработаны (прошли лётные испытания) и штатно применяются в составе бортовой аппаратуры космических комплексов:

- системы лазерного сканирования для обеспечения сближения и стыковки КА (космических аппаратов) (рис. 23.1);

– научная аппаратура на базе лазерных технологий для анализа состава и параметров различных сред:

- атмосферы гермообъёма пилотируемых космических аппаратов,
- земной атмосферы (рис. 23.2);
- грунта и атмосферы космических объектов;
- исследуемых сред, сформированных при проведении космических экспериментов на МКС (Международной космической станции);

– лазерные локационные системы для контроля положения и синхронизации космических аппаратов ГНСС (глобальной навигационной спутниковой сети) и сети наземных геодезических станций;

– аппаратура лазерной связи КА – КА, КА – Земля, Земля – КА.

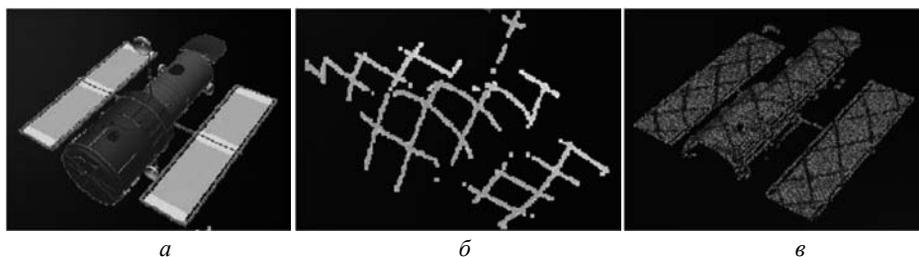


Рис. 23.1

Принцип действия лазерной системы обеспечения сближения и стыковки КА:

- a* – трёхмерная модель объекта сближения (телескоп Хаббл);
- б* – облако точек, получаемое при быстром сканировании объекта;
- в* – результат точного сканирования объекта при достаточном к нему приближении



Рис. 23.2

- a* – космический аэрозольный лидар Calipso (запущен в 2006 г.);
- б* – космический ветровой лидар ADM-Aeolus (запуск планируется в 2017 г.)

Указанные приложения не исчерпывают многообразия задач, для выполнения которых уже используются или планируются к разработке и внедрению системы на базе лазерных технологий. Рассмотрим подробнее несколько наиболее перспективных направлений применения лазеров в космическом пространстве.

23.1.1. БОРЬБА С КОСМИЧЕСКИМ МУСОРОМ И АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТЬЮ

Активное освоение околоземного космического пространства (ОКП) характеризуется высокой скоростью его загрязнения (рис. 23.3). Неконтролируемые космические аппараты (КА), отработанные ступени и разгонные блоки ракет-носителей, обломки столкнувшихся между собой или взорвавшихся космических объектов пересекают траектории полётов действующих КА и орбитальных станций, являясь постоянной угрозой технике и экипажам.

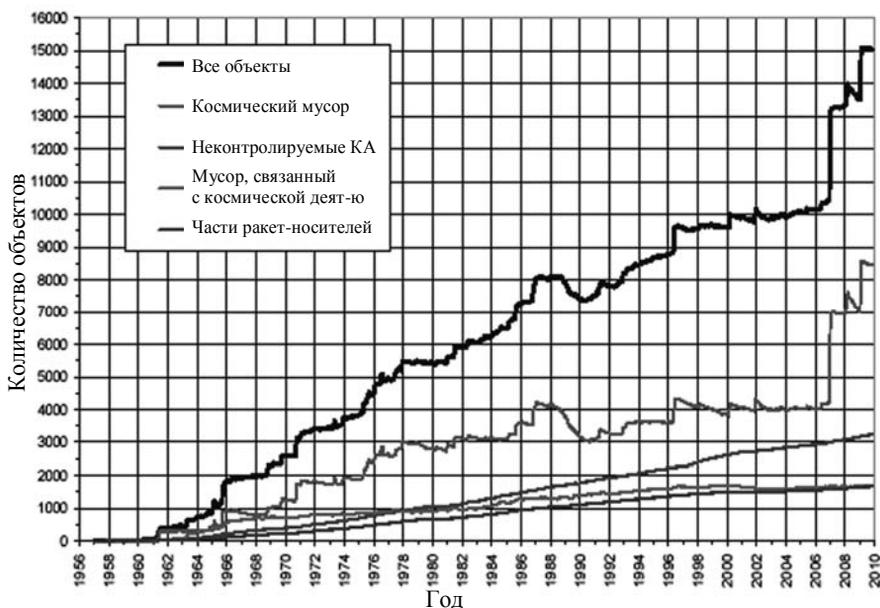


Рис. 23.3

Динамика роста количества объектов космического мусора в ОКП

При этом особую опасность представляют частицы космического мусора размером $10^{-6} \dots 10^{-2}$ м из-за их ненаблюдаемости (и, как следствие, некаталогизированности), а также возрастания концентрации частиц в экспоненциальной зависимости при уменьшении размеров (рис. 23.4, а).

Силовые элементы обшивки КА позволяют эффективно защищаться от объектов диаметром до 1 см. Защита от космических объектов больших размеров тре-

бует увеличения толщины обшивки, что приводит к неприемлемому увеличению её веса и стоимости. Эффективным способом защиты от «космического мусора» диаметром более 10 см является маневрирование КА, однако этот способ неприемлем для защиты от объектов размером 1...10 см, из-за повышенной сложности их детектирования.

В дополнение следует упомянуть опасность т. н. «каскадного эффекта». Согласно этой гипотезе, при достижении определенной критической плотности мусора (рис. 23.4, б) в некоторой области ОКП в результате столкновений объектов космического мусора будут образовываться вторичные осколки, которые, в свою очередь, вызовут рост количества столкновений и новообразованных осколков.

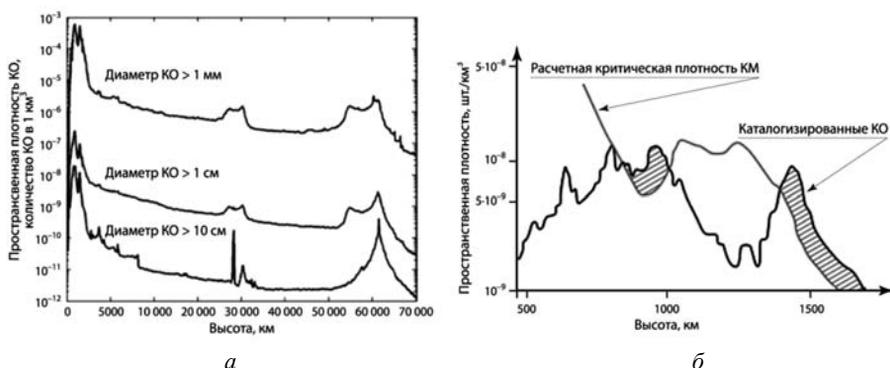


Рис. 23.4

Распределение концентрации объектов космического мусора различных размеров по высотам орбит (а); расчётная (данные 1990 г.) критическая плотность космического мусора (КМ) в низкоорбитальной области, достаточная для возникновения «каскадного эффекта» (б)

Перспективным решением проблемы засорения ОКП становится дистанционное воздействие на объекты космического мусора лазерным излучением в режиме абляции (рис. 23.5). При таком режиме воздействия объекту придаётся реактивный импульс в направлении, перпендикулярном его поверхности, что позволяет корректировать траекторию его движения. Тем самым возможно направить объекты космического мусора в плотные слои атмосферы, где произойдёт их сгорание, либо направить эти объекты на орбиты захоронения, откуда их сможет забрать КА-сборщик.

Абляционный режим связан с быстрым плавлением и испарением материала мишени под действием высокоэнергетических коротких лазерных импульсов, сопровождающимся взрывным формированием парогазового (пароплазменного) облака, движущегося нормально к облучаемой поверхности (рис. 23.6, а). Физические основы и основные расчётные соотношения (рис. 23.6, б) лазерного абля-

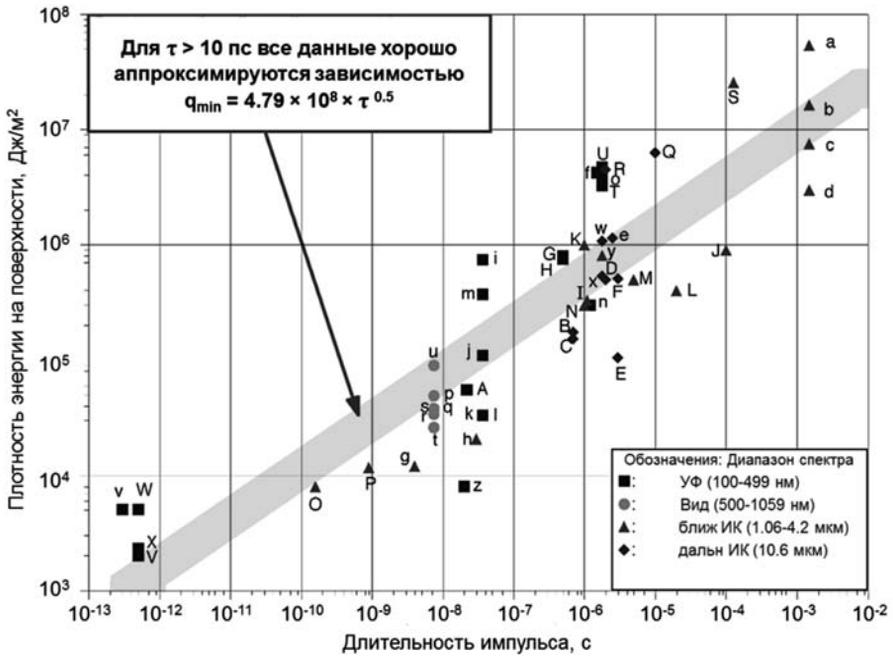


Рис. 23.7
 Зависимость плотности энергии на мишени от длительности импульса, требуемой для достижения режима лазерной абляции

Приращение скорости мишени от воздействия однократного лазерного импульса можно оценивать по формуле:

$$V \approx c_m \cdot E_{\text{имп}}/M. \tag{23.2}$$

Приведённые на рис. 23.6, б величины коэффициента c_m [Н·с/Дж] хорошо совпадает с результатами экспериментальных исследований, согласно которым для широкого круга материалов и различных значений энергии импульса c_m имеет значения в диапазоне $10^{-5} \dots 10^{-4}$ [Н·с/Дж], например, для алюминия $c_m \approx 10^{-4}$ Н·с/Дж.

К одним из наиболее подходящих для реализации абляционного воздействия на космический мусор относятся твердотельные широкоапертурные лазеры. Критериями выбора являются энергетическая эффективность, а также одновременное сочетание высокой мощности в импульсном режиме генерации и высокого оптического качества излучения, обеспечивающего его расходимость, близкую к дифракционному пределу.

Следует отметить целесообразность космического базирования лазерной установки, что позволяет избежать негативного влияния атмосферной трассы и погод-

ных условий при наземном размещении комплекса, а также увеличить оперативные дистанции воздействия.

Согласно расчётам, снижение скорости объекта космического мусора массой 10 г, площадью 10 см² под воздействием 50 лазерных импульсов энергией 500 Дж и длительностью 5 нс составит ~3 м/с на дистанциях 200 км при апертуре передающего телескопа 1.5 м. Этому соответствует снижение высоты орбиты объекта на ~10 км. Достаточным является спуск объектов космического мусора на орбиты высотой 200 км, время жизни на которых составляет порядка двух недель.

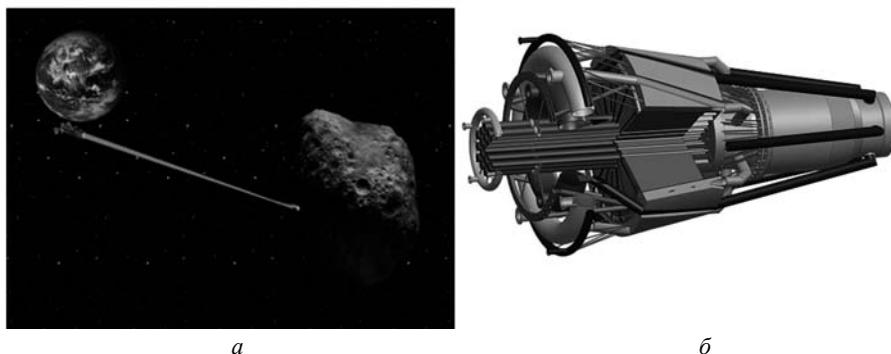
Реальную опасность для нашей планеты представляет возможность столкновения с крупным космическим телом: астероидом или кометой (рис. 23.8).



Рис. 23.8
Лазерное абляционное воздействие:
а – на астероид; *б* – на комету

Лазерное абляционное воздействие позволяет замедлить небольшой астероид на время, достаточное для избежания столкновения. Согласно расчётам, однократный лазерный импульс длительностью 5 нс и энергией 25 кДж при реализации режима лазерной абляции (плотность мощности $W > 1$ Дж/см²) на дальностях до 1200 км изменяет скорость астероида массой 300 кг на ~0.5 см/с.

В перспективе, используя космический ядерный энергетический модуль ТЭМ мощностью 2 МВт для питания 150 киловаттной лазерной системы, получаем возможность эффективного воздействия на астероиды массой в десятки тонн на расстояниях, достигающих 3000 км (см. рис. 23.9). При воздействии на астероид массой 30 т в течение одного часа его скорость изменится на ~1 м/с.

**Рис. 23.9**

Лазерное воздействие на удалённый крупный астероид (*а*);
ТЭМ (транспортный энергетический модуль) – ядерная энергетическая установка
космического базирования мощностью до 2 МВт (*б*)

23.1.2.

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Одной из наиболее сложных и востребованных задач применения технологий направленной передачи энергии является дистанционное энергоснабжение космических аппаратов (КА), позволяющее улучшить характеристики его системы энергообеспечения.

В настоящее время, несмотря на снижение удельного веса устройств хранения и преобразования энергии, масса систем энергообеспечения КА составляет значительную (если не большую) часть от общей массы аппарата. Использование лазерных технологий дистанционной передачи энергии позволит

- значительно снизить массу КА при сохранении уровня энергообеспечения бортовых систем аппарата;
- продлить срок активного существования КА, скомпенсировав деградацию солнечных (фотоприёмных) панелей и накопителей энергии.

Дистанционное энергоснабжение КА рационально осуществлять с помощью лазерных технологий, обеспечивающих подзарядку аккумуляторов спутников во многом схожим образом с технологиями энергопитания путём преобразования солнечного излучения. Отличием является то, что луч лазера намного интенсивнее, чем поток солнечного излучения, а значит, для передачи значительного количества энергии не требуется больших площадей фотоприёмных элементов. Используя лазер, можно осуществлять энергоснабжение КА кратковременными сеансами по мере необходимости.

Одним из наиболее востребованных направлений данных технологий является дистанционное энергоснабжение низкоорбитальных КА, сложность энергообеспечения которых обусловлена рядом причин, среди которых следует выделить наиболее значительные:

- значительное относительное время нахождения КА в тени на низких орбитах;
- высокое аэродинамическое сопротивление выносных панелей солнечных батарей;
- малые размеры панелей солнечных батарей, отсутствие или низкая точность системы ориентации панелей солнечных батарей на Солнце, связанные с экономией массы и энергии.

Кроме того, перспективным направлением является развитие низкоорбитальных кластерных космических систем, которое в ближайшее время может стать одним из наиболее приоритетных. Наиболее близкие к практической реализации разработки низкоорбитальных кластерных космических систем (рис. 23.10), использующих лазерные технологии дистанционного энергоснабжения, в настоящее время имеются в США в агентстве DARPA.



Рис. 23.10

Кластерная космическая группировка. Состоит из нескольких космических модулей различного назначения: вычислительного, оптического, радиолокационного и энергетического с установкой лазерного энергоснабжения

Рассмотрим задачу дистанционного энергоснабжения низкоорбитальной кластерной группировки КА. В общем случае базовый КА (донор) и подпитываемые КА (акцепторы) движутся по орбитам с разными параметрами (высота перигея и апогея, наклонение, аргумент широты перигея, долгота и время прохождения восходящего узла). Дистанции, на которых дистанционная передача энергии возможна к осуществлению с приемлемым уровнем эффективности, достигают 100...200 км (рис. 23.11).

Согласно баллистическим оценкам, у каждой пары донор–акцептор для данных условий будет не более 30 секунд единожды в течение нескольких десятков

часов, когда расстояние между объектами будет находиться в заданных пределах, т. е. базовый КА может заряжать аккумуляторную батарею одного КА-акцептора всего не более одного раза за сутки.



Рис. 23.11

Встреча пары "донор – акцептор" на скрещивающихся низких орбитах.
Происходит не чаще одного раза за сутки

Альтернативой представленному выше варианту служит концепция расположения базового и подпитываемых КА на близких по параметрам орбитах (рис. 23.12). В этом случае необходимое для передачи энергии расстояние сохраняется в течение срока активного существования системы. Базовый КА, оснащённый маршевой двигательной установкой, может совершать корректирующие маневры для поддержания заданного положения относительно «роя».



Рис. 23.12

Базовый КА (донор) расположен внутри «роя» КА-акцепторов

Предложенная концепция имеет следующие особенности и достоинства:

- лазерный комплекс располагается в составе «роя», дистанция до каждого КА-акцептора не превышает 100...200 км, что обеспечивает высокую эффективность передачи энергии;
- периодичность перезарядок ограничивается только солнечной засветкой телескопа и энергетическими параметрами пары «донор–акцептор»;
- наведение на КА-акцептор реализуется, в том числе, оптоэлектронными методами с использованием отражённого от объекта излучения;
- задача наведения облегчена ввиду низких относительных скоростей пары «донор–акцептор».

Функциональная структурная схема лазерного комплекса дистанционного энергоснабжения представлена на рис. 23.13.



Рис. 23.13

Принципиальная схема лазерного комплекса дистанционного энергоснабжения космических аппаратов

Лазерный комплекс КА-донора состоит из бортовой лазерной установки, накопителя энергии, панелей солнечных батарей (или альтернативного источника питания), а также телескопа с интегрированной системой поиска и наведения на КА-акцептор.

Энергетическая аппаратура подпитываемого спутника представляет собой систему, состоящую из нескольких фотоэлектрических преобразователей солнечного и лазерного излучения в электричество, а также аккумуляторной Li-Ion батареи для компактного накопления энергии.

Комплексный подход, обязательный при разработке ракетно-космической техники, приводит к поставке задачи комплексирования энергоинформационного обмена между КА кластерной группировки (рис. 23.14).



Рис. 23.14

Вариант построения энергоинформационного обмена
кластерной группировки космических аппаратов

Возможность создания в ближайшей перспективе действующих опытных образцов космических лазерных комплексов для дистанционной передачи энергии обеспечивается разработкой к настоящему времени (и дальнейшим их развитием) следующих составных частей комплексов:

- твердотельных (в т. ч. волоконных) лазеров с КПД до 20%, обеспечивающих одновременное сочетание высокой мощности и высокого оптического качества (минимальной расходимости) излучения;
- гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии с коэффициентом полезного действия более 29% и фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения – с КПД более 40 %, позволяющих эффективно преобразовать потоки энергии с плотностью мощности до 200 Вт/см^2 ;
- литий-ионных аккумуляторных батарей с удельной энергией до 800 кДж/кг ($222 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$), а в ближайшей перспективе до 1 МДж/кг ($277 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$), и суперконденсаторов;
- современных оптико-электронных систем наведения, обеспечивающих точность наведения не хуже $1''$.

23.2.

ЛАЗЕРЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ

В будущем мощные лазерные системы будут играть важную роль в производстве электроэнергии и её доставке потребителю. Лазерное индуцирование ядерного синтеза исследуют в качестве альтернативы другим

типам термоядерных реакторов. Лазерные технологии передачи энергии развиваются в интересах энергоснабжения БПЛА (беспилотных летательных аппаратов) и других автономных энергоёмких систем.

23.2.1. ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Идея использования лазеров для индуцирования термоядерной реакции синтеза обсуждалась академиками Н. Г. Басовым и О. Н. Крохиным ещё в начале 60-х годов прошлого столетия. Это направление исследований, получившее название лазерного термоядерного синтеза, активно исследуется по всему миру вплоть до настоящего времени, оставаясь в ранге «перспективных».

Термоядерная реакция – это процесс синтеза (слияния) ядер легких элементов в более тяжелые (рис. 23.15). Интерес к ядерному синтезу связан с тем, что в результате этой реакции, наряду с образованием более тяжёлых элементов, происходит выделением значительной энергии в виде кинетической энергии продуктов реакции, а также γ -излучения.

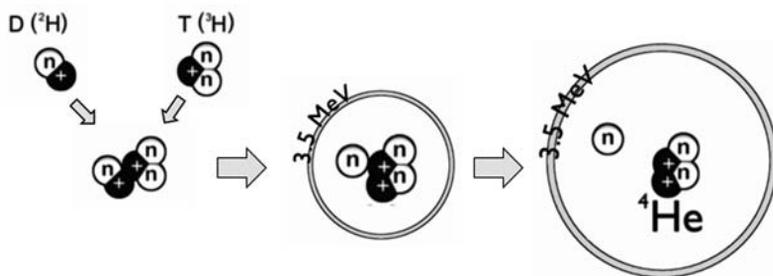


Рис. 23.15

Термоядерный синтез дейтерий-тритиевой смеси, имеющей наименьшую из всех возможных температуру инициирования реакции синтеза

Синтез ядер легких элементов является одной из наиболее энергетически эффективных реакций и несколько выигрывает по энергетическому выходу сравнительно с реакциями деления тяжелых ядер, на базе которых функционируют действующие атомные электростанции. Кроме того, в качестве топлива для термоядерного синтеза используется дейтерий – тяжёлый изотоп водорода, запасы которого в мировом океане практически неисчерпаемы. По оценкам экспертов, переработка всего 1 тонны морской воды обеспечит получение ~ 500 МВт энергии в результате термоядерного синтеза.

Ядерный синтез является основным источником энергии в звездах. В земных условиях основная трудность осуществления реакции синтеза связана с необхо-

димостью преодоления действия кулоновских сил отталкивания одноименно заряженных ядер при их сближении до расстояний менее 10^{-14} м, на которых вступают в действие ядерные силы.

Наиболее естественным способом обеспечения условий для начала реакции синтеза является повышение кинетической энергии движения частиц относительно друг друга до величины, превышающей кулоновский барьер, составляющий для ядер водорода $\sim 1.6 \cdot 10^{-15}$ Дж. Средняя кинетическая энергия $E_{\text{кин}}$ теплового движения частиц пропорциональна абсолютной температуре среды T :

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT, \quad (23.3)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Отсюда следует, что для преодоления электрических сил отталкивания необходима высокая температура среды $T \geq 10^9$ К.

Из-за естественного распределения частиц по скоростям критическая температура может быть снижена на порядок, поэтому реальная температура, при которой обеспечиваются условия инициирования термоядерной реакции, составляет сто миллионов градусов (10^8 К), а средняя скорость ядер превышает 10^6 м/с. Именно из-за высоких скоростей разлета плазмы (ионизированного газа) процесс термоядерного синтеза носит взрывной характер.

Требуемая температура в 10^8 К возникает при взрыве водородной бомбы, что подтвердили проведённые в начале 50-х годов XX века испытания термоядерного оружия, основанного на неуправляемой реакции синтеза лёгких ядер. С этих времён внимание учёных и инженеров было нацелено на осуществление реакции синтеза в управляемом виде с целью производства энергии.

Особенность термоядерных реакций, происходящих на Солнце и других звёздах, заключается в действующих в них огромных гравитационных силах, которые способствуют удержанию плазмы. В отличие от Солнца, в условиях Земли слабые гравитационные силы не могут оказать никакого влияния на условия протекания реакций синтеза лёгких ядер.

Для осуществления на Земле термоядерного синтеза, эффективного в энергетическом отношении, но еще не носящего характер разрушительного взрыва, необходимо вместе с нагревом дейтерий-тритиевой плазмы (такая смесь имеет наименьшую из всех возможных температуру инициирования реакции синтеза) до температуры $T \approx 10^8$ К удерживать эту плазму в течение определенного времени Δt от соприкосновения со стенками реактора для того, чтобы при заданной концентрации плазмы n большая её часть успела вступить в реакцию с выделением энергии, превышающей энергию, затраченную на её нагрев.

Это условие носит название критерия Лоусона и выражается соотношением:

$$n \cdot \Delta\tau > 10^{20} \text{ [с/м}^3\text{]}. \quad (24.4)$$

Например, при давлении газа порядка 1 Па время $\Delta\tau$ должно превышать 1 с.

Таким образом, требуемый нагрев термоядерной мишени приводит к проблеме удержания реагирующего вещества (в состоянии плазмы) из-за пропорционального роста давления. Одним из решений стало использование мощных магнитных полей для удержания и термоизоляции высокотемпературной плазмы с низкой плотностью ($n = 10^{20} \dots 10^{21} \text{ м}^{-3}$) течение сравнительно длительного времени ($\Delta\tau = 1 \dots 10 \text{ с}$).

На основе этой идеи были созданы многочисленные экспериментальные установки, самыми известными из которых являются замкнутые тороидальные системы «Токамак» (сокр. от «тороидальная камера с магнитными катушками»). Установки «Токамак» (рис. 23.16) и подобные им предназначены для работы в непрерывном (а точнее, в квазинепрерывном) режиме, работы по их совершенствованию продолжают.

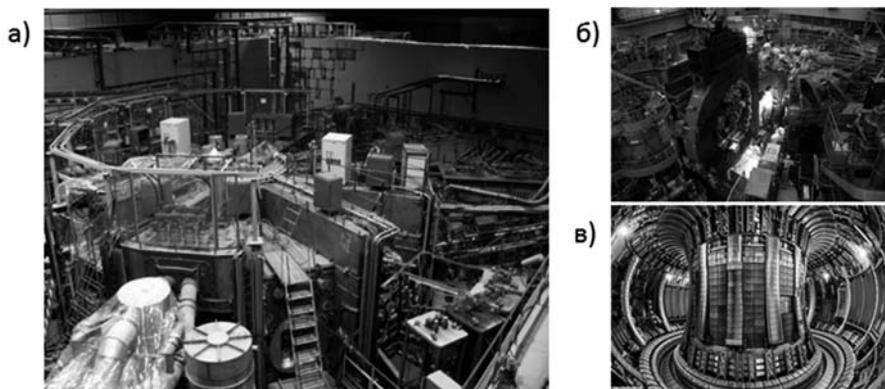


Рис. 23.16

a – фотография российского термоядерного реактора токамак Т-15 с магнитным удержанием плазмы; *b* – токамак JT-60SA, Япония; *в* – камера европейского токамака JET

В противовес к описанному выше подходу, в рамках лазерного термоядерного синтеза достижение критерия Лоусона осуществляется не за счёт длительного удержания плазмы, а за счёт увеличения её плотности в результате сжатия смеси.

Для дейтерий-тритиевой смеси, сжатой до состояния плотной плазмы с $n \approx 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ (соответствует сжатию в ~ 100 раз сравнительно с плотностью твёрдого водорода), требуемая длительность удержания составляет $\tau \sim 10^{-9} \text{ с}$. Для обеспечения температуры $T \approx 10^8 \text{ К}$ необходим мгновенный нагрев плотной плазмы

с помощью ультракоротких ($\tau_{\text{имп}} < 10^{-9}$ с) высокоэнергетических ($E_{\text{имп}} > 10^5$ Дж) лазерных импульсов. Нагретая таким образом, плазма начинает разлетаться, при этом за время разлёта в ней должно пройти такое количество реакций синтеза, чтобы выделившаяся энергия превысила ту, которая была затрачена.

Описанный механизм удержания плазмы получил название инерциального, а реализующее его направление термоядерных исследований было именовано как лазерный термоядерный синтез (ЛТС).

Задача достижения высоких степеней сжатия веществ в интересах ЛТС может решаться разными путями, один из которых получил название режима прямого сжатия. В этом режиме сферическая мишень, наполненная термоядерным топливом, со всех сторон «равномерно» облучается многоканальным лазером (рис. 23.17).

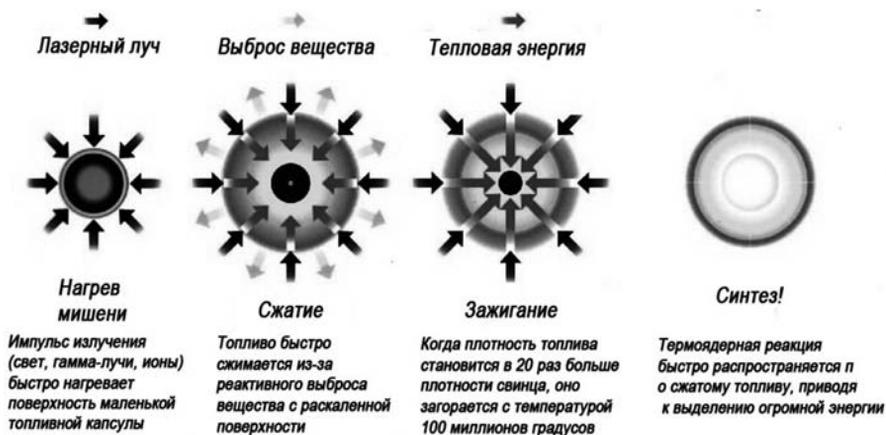


Рис. 23.17

Режим прямого сжатия в процессе лазерного термоядерного синтеза

В ЛТС сферическая мишень содержит ряд концентрических оболочек. Внешняя оболочка, называемая аблятором, под действием лазерного излучения испаряется, ионизуется и превращается в плазму. Расширение этой плазмы формирует на внутренней границе аблятора импульс так называемого абляционного давления, складывающегося из теплового давления и реактивного давления разлетающейся плазмы, которое может достигать 10^6 атм. и более.

Следующий за аблятором слой предназначен для аккумуляции кинетической энергии неиспаренной части мишени при её движении к центру, что и приводит к сжатию термоядерного горючего. Центральная часть мишени содержит дейтериево-тритиевую смесь в виде льда или газа под давлением до нескольких сотен атмосфер. Она может быть окружена теплоизолирующими слоями, облег-

чающими инициирование термоядерных реакций за счет сохранения и замедления в ней частиц – продуктов реакции синтеза.

Эксперименты по достижению высоких плотностей сжимаемого топлива в режиме прямого сжатия начались в середине 70-х годов в Физическом институте им. П. Н. Лебедева, где на установке «Кальмар» с энергией 200 Дж была достигнута плотность сжимаемого дейтерия 10^4 кг/м³. В дальнейшем программы работ по ЛТС активно развивались в США (установки «Шива», «Нова» в Ливерморской национальной лаборатории, «Омега» в Рочестерском университете), Японии («Гекко-12»), России («Дельфин» в ФИАНе, «Искра-4», «Искра-5» в Арзамасе-16) на уровне энергии лазеров 1... 100 кДж. Устройство ЛТС-реактора и некоторых из перечисленных установок иллюстрирует рис. 23.18.

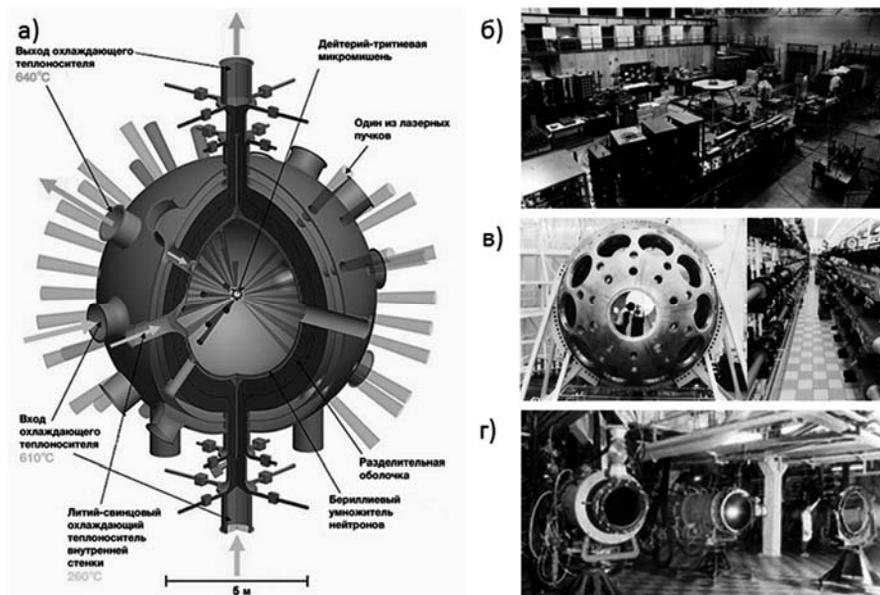


Рис. 23.18

Устройство реактора для лазерного термоядерного синтеза (а);
фотографии экспериментальных установок для ЛТС «Дельфин» (Россия) (б),
«NOVA» (США) (в) и «Искра-5» (Россия) (з)

Альтернативой прямому методу достижения высоких степеней сжатия термоядерного топлива является режим непрямого сжатия. К преимуществам такой схемы относятся возможность достижения более высокой однородности распределения поглощённой энергии по поверхности мишени, упрощение схемы многоканального лазера и условий фокусировки. К недостаткам следует отнести неизбежные потери, связанные с преобразованием излучения в рентгеновское.

Принципиальная схема эксперимента в режиме непрямого сжатия приведена на рис. 23.19. Излучение лазера заводится в кювету, фокусируясь на внутренней поверхности её оболочки, состоящей из вещества с большим атомным номером, например, золота. До 80% лазерного излучения трансформируется в мягкое рентгеновское излучение, которое нагревает и сжимает внутреннюю оболочку мишени с термоядерным топливом.

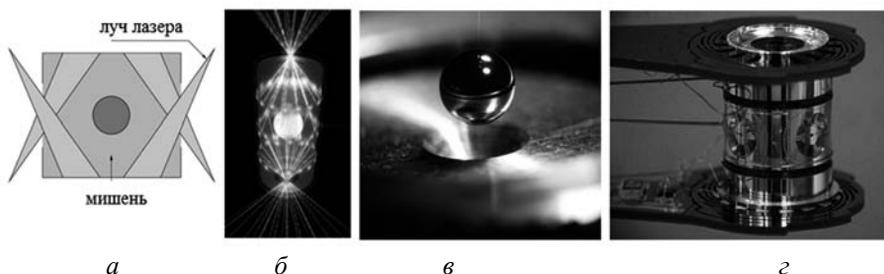


Рис. 23.19

Схема непрямого сжатия термоядерного топлива (а); иллюстрация образование рентгеновского излучения в кювете (б); капсула с термоядерным топливом (в); металлический цилиндр, внутрь которого помещают мишень (г)

Задача превышения выделившейся термоядерной энергии над доставленной в реактор в виде лазерного излучения была впервые экспериментально продемонстрирована только в 2013 г. в США на установке NIF (National Ignition Facility). В начале 2014 года соотношение полученной в термоядерной реакции энергии к подведённой удалось довести до 2.6.

Сама установка NIF для лазерного термоядерного синтеза представляет собой комплекс зданий и сооружений (рис. 23.20), включающий в себя лазерную установку мощностью 500 ТВт, обеспечивающую энергию в импульсе (суммарную для 192 каналов усиления), равную 1.8 МДж (рис. 23.21).

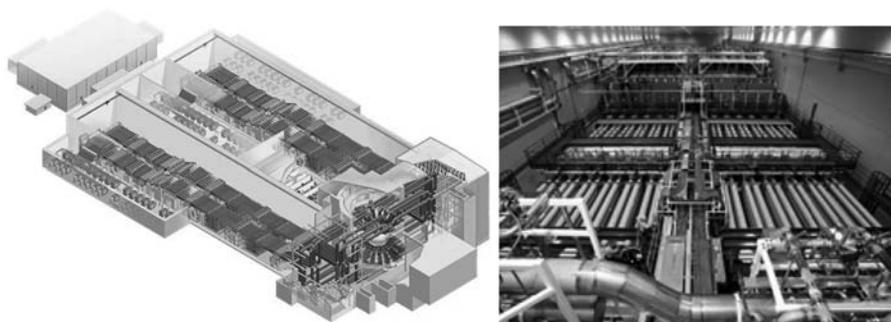


Рис. 23.20

Схема комплекса для лазерного термоядерного синтеза NIF – National Ignition Facility, г. Ливермор, Калифорния, США (1.8 МДж, 192 лазерных канала)

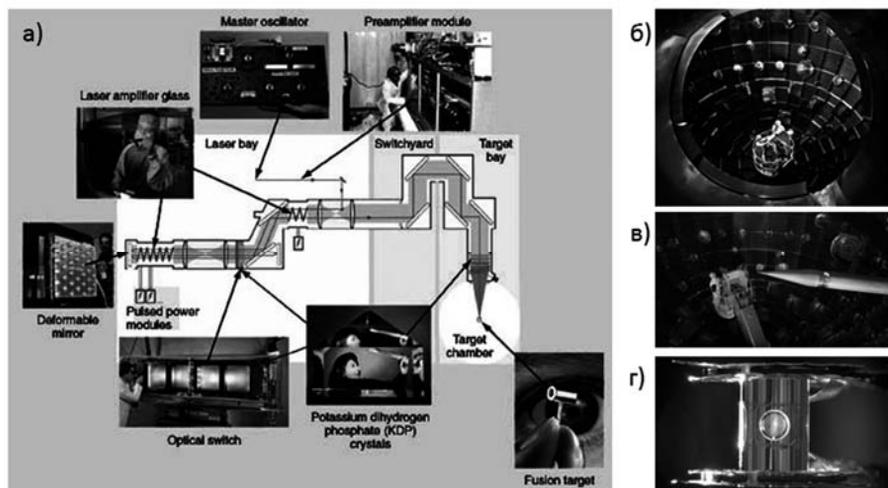


Рис. 23.21

а – схема лазерного канала ЛТС-установки NIF;
б, в – зал с выходами лазерных каналов и термоядерной камерой в центре;
г – цилиндр, в котором расположена кювета с термоядерной мишенью

До 2020 г. планируется введение в эксплуатацию сразу нескольких комплексов для лазерного термоядерного синтеза по всему миру:

- французский проект Laser Megajoule, строящийся близ Бордо (2 МДж, 240 лазерных каналов);
- европейский проект High Power Laser Energy Research Facility (HiPER);
- российский проект, строящийся в г. Саров, мощнейшая в мире установка двойного назначения УФЛ-2М (2.8 МДж, 192 лазерных канала).

В заключение следует отметить, что определённый интерес представляют гибридные проекты, комбинирующие два основных направления термоядерного синтеза: с магнитным и инерциальным (лазерным) удержанием плазмы. В гибридной термоядерной технологии с помощью замагничивания плазмы достигается снижение её теплопроводности и времени разлёта. Характерное время протекания данного эффекта, единицы микросекунд, представляется достаточным для получения положительного энергетического выхода в результате лазерного термоядерного синтеза.

23.2.2. ЛАЗЕРЫ В СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Идея дистанционной передачи электрической энергии с помощью направленного электромагнитного излучения активно прорабатывается в нашей стране с 70...80-х годов прошлого века, при этом подавляющее количество полученных научных результатов относится к проблемам создания больших солнечных элек-

тростанций космического базирования, преобразующих солнечную энергию в электрическую с последующей её передачей при помощи лазерного или СВЧ-излучения на Землю (рис. 23.22).

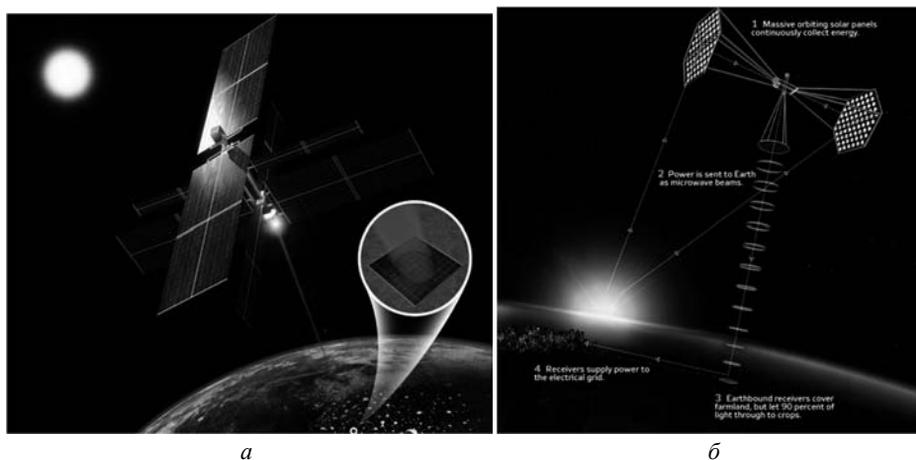


Рис. 23.22

Проекты космических солнечных электростанций, в которых канал передачи энергии на Землю реализован с помощью *а* – лазерного, *б* – СВЧ-излучения

Эффективность космической солнечной электростанции определяется к. п. д. систем преобразования солнечного излучения в электрическую энергию и к. п. д. канала передачи энергии на Землю. К последнему предъявляются следующие требования:

- высокая эффективность преобразования полученной электроэнергии в монохроматическое электромагнитное излучение;
- формирование узкой диаграммы направленности потоков электромагнитной энергии;
- высокий уровень мощности излучения передатчика;
- спектральные характеристики используемого излучения должны попадать в окна прозрачности атмосферы;
- используемое излучение не должно приводить к плазмообразованию в атмосфере и нелинейным взаимодействиям с ней;
- выбранный тип излучения должен иметь элементные базы высокоэффективного преобразования в электроэнергию.

В качестве альтернативы лазерному излучению следует рассмотреть СВЧ-диапазон излучения, также позволяющий реализовать канал дистанционной передачи энергии, удовлетворяющий предъявленным требованиям. Сравнительный анализ этих двух технологий приведён в табл. 23.1.

Таблица 23.1

**Сравнительный анализ СВЧ- и лазерного канала
дистанционной передачи энергии**

№ п.п.	Фактор	Тип изл-я	Влияние фактора	Оценка
1	Влияние атмосферы на прохождение электромагнитного излучения	СВЧ	Потери незначительные в широком диапазоне длин волн от 2.4 до 8 ГГц	+++
		Лазер	Спектральная зависимость (есть окна прозрачности)	++
2	Мощностные характеристики, к. п. д.	СВЧ	Мощность – высокая; КПД высокий	+++ +++
		Лазер	Мощность – высокая, КПД средний	+++ ++
3	Габаритные параметры излучающего устройства	СВЧ	Ламповые – значительные; Полупроводниковые – незначительные; Антенны – значительные	+ ++ +
		Лазер	Полупроводниковые – незначительные; Волоконные – незначительные; Оптика – незначительные размеры	+++ +++ ++
4	Антенна / оптика	СВЧ	Значительные размеры	+
		Лазер	Небольшие размеры	+++
5	Приёмная система (ректенна / фотоэлектрический преобразователь)	СВЧ	Значительные размеры; высокая эффективность преобразования	+ +++
		Лазер	Средние размеры; средняя эффективность	++ ++

К наиболее существенным проблемам, требующим решения для реализации космических солнечных электростанций, следует отнести:

- необходимость развёртывания сверхкрупноразмерных конструкций фотопреобразователей;
- необходимость реализации высокоэффективного канала передачи энергии с точностью наведения не хуже 0.5 угл. сек.;
- необходимость обеспечения оптимального теплового режима высокоомощной, крупноразмерной космической солнечной электростанции.

С учётом достигнутого уровня научно-технического развития технологию космических электростанций с последующей доставкой энергии на Землю следует отнести к реализуемым в средне- и долгосрочной перспективе. По оценкам специалистов, общая энергетическая эффективность таких систем может достигать 20% (рис. 23.23).



Рис. 23.23

Эффективность космической солнечной электростанции с каналом передачи энергии на Землю

Рациональным уже в ближнесрочной перспективе применением лазерных технологий передачи энергии являются системы дистанционного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Подзарядка аккумуляторов последних по лазерному лучу позволяет значительно увеличить автономность (длительность) полёта. Натурный эксперимент (рис. 23.24) по лазерной подпитке БПЛА на расстояниях до 600 метров был проведён кампанией Laser Motive в 2012 г.

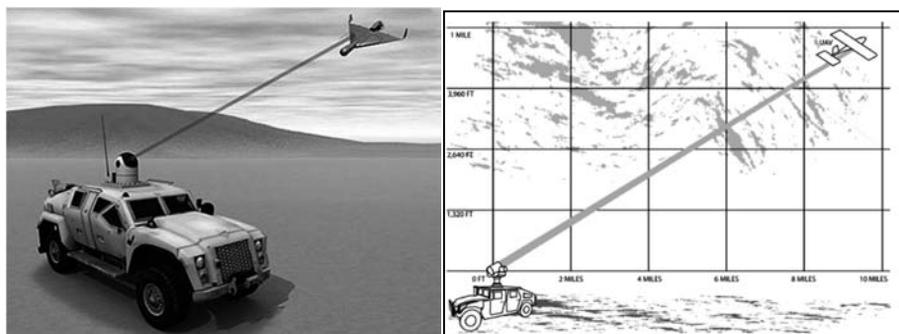


Рис. 23.24

Питание БПЛА с помощью волоконного лазера

В эксперименте использовался лазер с длиной волны $\lambda = 1550$ нм. Наведение лазерного луча осуществлялось с сантиметровой точностью на фотоприёмное устройство движущегося БПЛА. Достигнутый коэффициент передачи энергии в цепочке «источник электропитания лазера – источник электропитания беспилотного аппарата» составил 10%. Следует отметить, что удельная мощность электроустановки беспилотного аппарата составила 800 Вт в пересчете на 1 кг веса, что превышает это параметр для использованных в проекте литий-ионных батарей (до 500 Вт/кг).

23.3.

ЛАЗЕРЫ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

В современных условиях возрастающих требований к показателям качества и эффективности высокотехнологичных устройств фотоники большое значение приобретают средства, реализующие уникальные особенности наночастиц благородных металлов по возможности концентрации, усиления и перенаправления оптического излучения, регистрации изменений показателя преломления и химического состава внешней среды, усиления рамановского рассеяния и флуоресценции.

Как следствие, в настоящее время ведется активная разработка методов получения устойчивых наночастиц благородных металлов и функциональных материалов на их основе для применения в ряде высокотехнологичных областей:

– в медицине и биологии в интересах создания плазмонных технологий секвенирования ДНК, маркировки и визуализации отдельных клеток, например раковых;

– в *солнечной энергетике* в интересах создания более эффективных фотоэлектрических и фототермических преобразователей за счёт использования покрытий с наночастицами, увеличивающими поглощение излучения;

– в *экологии* в интересах создания более совершенных технологий нейтрализации промышленных химических отходов за счёт повышения наночастицами эффективности процессов фотокатализа;

– в *информационных технологиях* в интересах разработки новых видов оптической памяти;

– в *оптике* в интересах создания «традиционных» устройств волоконной и интегральной оптики (дифракционные решётки и т. д.), а также устройств наноплазмоники (волноводов, фильтров, интерферометров, наноплазмонных антенн, резонаторов).

С учетом того, что физико-химические свойства наночастиц и, соответственно, область их применения определяются как морфологией наночастиц, так и свойствами их поверхности, с постановкой всё более сложных комплексных задач возрастают требования к методам получения наночастиц благородных металлов с контролируемыми свойствами.

Развитие физики мощных лазерных импульсов привело к расширению технологий в сторону сверхмалых времен ($10^{-8} \dots 10^{-14}$ с) и сверхвысоких интенсивностей (10^{10} Вт/см²... 10^{14} Вт/см²). Это создало условия для разработки новых видов процессов на основе абляции материала с поверхности без теплового воздействия, при непосредственном разрыве межмолекулярных связей лазерным излучением. Под лазерной абляцией обычно понимают процесс удаления вещества с поверхности твердой мишени под воздействием лазерного излучения.

Лазерную абляцию металлической мишени, как правило, разделяют на две части. К первой части относится получение продуктов лазерной абляции. Ко второй части относится изменение морфологии поверхности мишени после взаимодействия с лазерным излучением.

В связи с этим лазерная абляция (*первая часть технологии*) стала перспективным методом получения функциональных наноматериалов. Для осуществления лазерной абляции излучение высокой мощности фокусируют на поверхность твердой мишени. Воздействие лазера на вещество приводит к быстрому поглощению энергии излучения, нагреву и взрывообразному испарению вещества с поверхности мишени. Процесс сопровождается распространением ударной волны в окружающей среде (рис. 23.25, а).

В зависимости от интенсивности лазерного излучения продуктами абляции могут быть либо атомы, ионы, молекулы вещества, либо сформированные кластеры и наночастицы, вылетающие из зоны воздействия с высокой кинетической энергией (рис. 23.25, б). Причем в условиях высокой температуры атомы аблированного вещества могут взаимодействовать с молекулами окружающей среды и образовывать новые соединения.

На рис. 23.2 изображена схема процесса получения наночастиц при помощи лазерной абляции. На мишени образуется расплавленный поверхностный слой под воздействием излучения импульсно-периодического лазера с образованием жидких капель, которые при прохождении области плазмы разделяются до наночастиц. Образовавшиеся наночастицы можно осаждать на подложку. Процесс ведут обычно в атмосфере аргона при давлении $10^{-4} \dots 10^{-2}$ Па.

При использовании различных материалов мишени и фоновых газов, варьируя параметры лазерной абляции (длина волны лазерного излучения, интенсивность лазерного излучения и длительность импульса), можно получать широкий круг соединений как в виде сплошных пленок, так и наночастиц определенного размера.

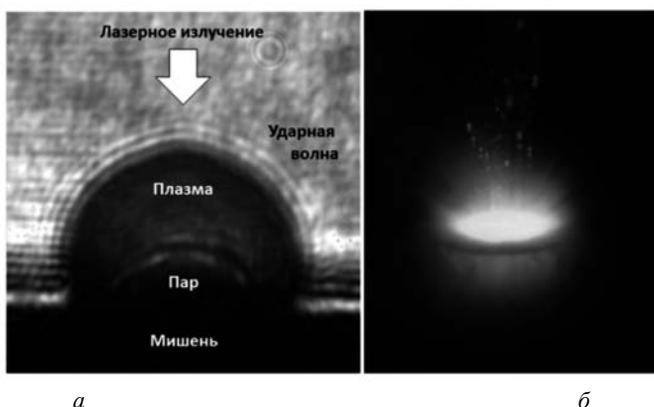


Рис. 23.25

Микрофотография распространения плазмы и ударной волны в среде при импульсной лазерной абляции (а); образование наночастиц, вылетающих с поверхности мишени при лазерной абляции (б)

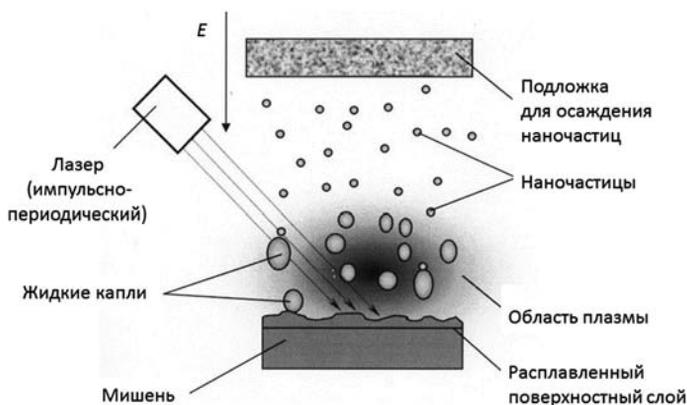


Рис. 23.26

Схема процесса получения наночастиц при лазерной абляции

На рис. 23.27 показаны наночастицы диоксида циркония ZrO_2 , полученные путем лазерной абляции при длительности лазерных импульсов 150 мкс, интенсивности лазерного излучения $6 \cdot 10^9$ Вт/м². Наночастицы обладают сферической формой, а их средний размер составляет порядка 20 ... 100 нм.

Лазерные технологии получения микроструктур и наноструктур на поверхности металлов и сплавов (*вторая часть технологии*) важны для различных применений: при производстве приборов оптоэлектроники и наноэлектроники, в технологиях хранения информации, для управления механическими и оптическими свойствами твердых тел, в биомедицинских и других применениях.

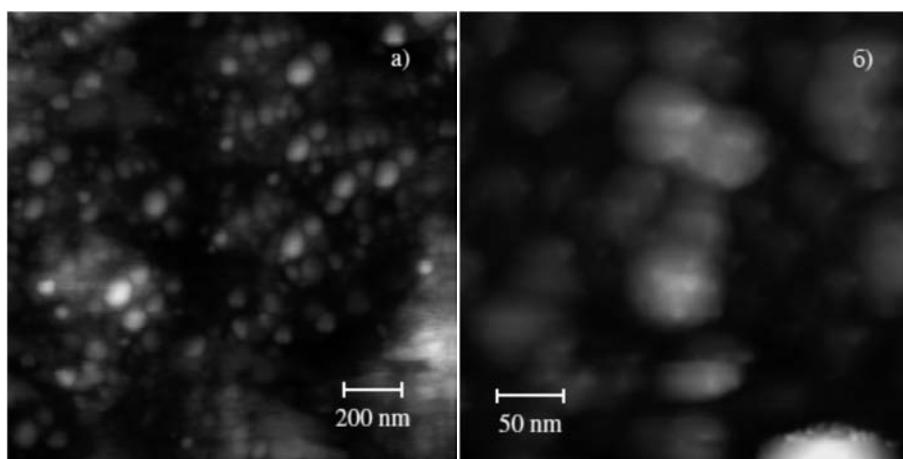


Рис. 23.27

Изображение атомно-силовой микроскопии диоксида циркония ZrO_2 при увеличении: $100\times$ (а); $10000\times$ (б)

Технологии прямого лазерного микроstructuring и наноструктурирования осуществляются под действием одного лазерного пучка без переосаждения разлетающихся частиц, без использования различных экранирующих масок, а также без комбинации нескольких лазерных лучей. При такой модификации поверхности с помощью лазерной абляции существуют ограничения на минимально возможный размер получаемых текстур. Это связано с тем, что минимально достижимый размер структурообразований определяется дифракционным пределом, который соизмерим с длиной волны лазерного излучения.

Для получения структур на поверхности материала с минимальными размерами (десятки нанометров), выбирают режим воздействия ультракороткими лазерными импульсами без абляции с плотностью энергии импульса ниже порога абляции, но выше порога плавления, обеспечивающий процессы сверхбыстрого нагрева, плавления и рекристаллизации поверхности металла. Таким образом, технология создания на поверхности металла структур минимального размера

в наномасштабной области основывается на процессах, приводящих к затвердеванию поверхности вещества при сверхвысоких скоростях охлаждения после окончания воздействия лазерными импульсами.

После окончания воздействия лазерного импульса расплав быстро кристаллизуется за счет теплоотвода вглубь образца. Из-за сверхвысоких скоростей охлаждения (10^9 К/с и более) размер образующихся при остывании кристаллитов может быть сравним с межатомным расстоянием. При этом если скорость охлаждения превышает скорость кристаллизации, то может быть образован аморфный слой. Процессы создания мелкодисперсной кристаллической или аморфной поверхностной структуры под воздействием лазерных импульсов, длительностью от миллисекунд до наносекунд, получили название «лазерное стеклование». Детальное изучение морфологии поверхностной наномодификации различных металлов с использованием лазерных импульсов фемтосекундной длительности позволяет получать различные структуры (зерна, поры, кольца, выпуклости) размером порядка 20 ... 100 нм (рис. 23.28).

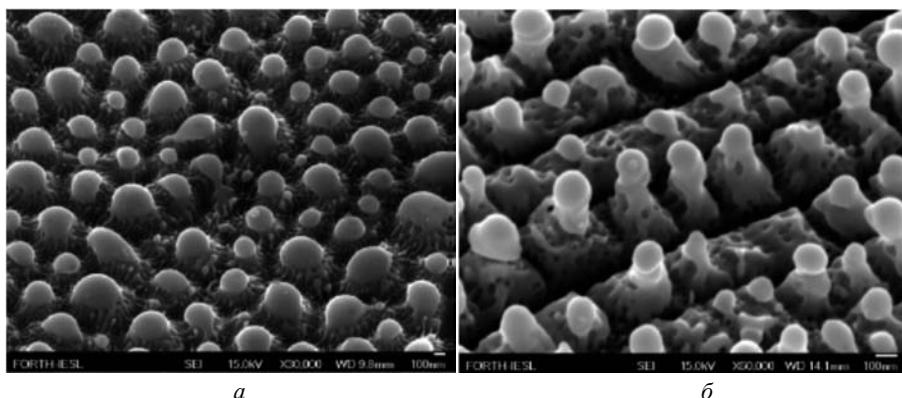


Рис. 23.28

Наноструктурированная поверхность металлов при их лазерной абляции: KrF-лазер, длительность импульса 5 пс (*а*), Ti:sapphire-лазер, 180 фс (*б*)

По сравнению с другими физическими (парофазное осаждение, ионно-плазменное или дуговое напыление и др.) и химическими методами (химическое осаждение, в том числе гидротермальные методы, с применением поверхностно-активных веществ и слабого осаждения, метод лазерной абляции имеет несколько преимуществ:

- простой и химически чистый синтез конечных продуктов, без включения побочных примесей, что позволяет не проводить дополнительную очистку;
- низкая себестоимость экспериментальных установок и простота контроля процесса абляции;

- возможность формирования метастабильных фаз за счет быстрого нагрева и охлаждения аблированного вещества (до 10^{10} К/с) в условиях высокого давления плазменного факела в области воздействия излучения;
- высокая скорость осаждения аблированного вещества (более 10^{15} атом/см²·с);
- возможность испарения многокомпонентных мишеней;
- строгая дозировка подачи материала, в том числе многокомпонентного.

23.4.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В теории систем и системного анализа понятие «комплексирование» достаточно широкое и требует определенного уточнения в зависимости от решаемых технических задач, а также используемого для их решения программно-алгоритмического и аппаратного обеспечения. В рамках настоящего раздела логично остановиться на комплексировании лазерных технологий и описать варианты объединения.

В зависимости от задач, решаемых в рамках комплексирования, можно выделить, во-первых, задачу повышения достоверности и точности информации, получаемой в процессе работы оптико-электронной системы. Во-вторых, комплексирование может обеспечивать расширение условий применения оптико-электронной системы, например, снижать требования по освещенности, обеспечивать всепогодность и т. д. В-третьих, при комплексировании возможно существенное расширение функционала оптико-электронной системы, т. е. возможность получения более широкого спектра информации.

На рис. 23.29 представлена классификация подходов комплексирования по различным признакам. Данная классификация не является исчерпывающей, более того, на практике чаще всего происходит совмещение различных типов комплексирования.

23.4.1.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РАДИО- И ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

Самый распространенный и изученный способ комплексирования подразумевает под собой применение многоволновых систем для параметрического исследования. Здесь надо уточнить, что речь идет о комплексировании на уровне представления информации пользователю с использованием целого ряда устройств, работающих на различных физических принципах. Благодаря природе взаимодействия электромагнитного излучения со средой возникает простор инженерного

творчества и извлечение максимальной пользы со стороны анализа принимаемых данных.



Рис. 23.29

Классификация подходов комплексирования

В качестве примера далее речь пойдет о:

- параметрических исследованиях влияния воздушных масс на тепловой баланс Земли;
- новом поколении метеорологического оборудования;
- картографировании поверхности Земли с высоким показателем информативности;
- перспективе автоматического управления дорожным транспортом;
- квантовых радаров с высоким потенциалом обнаружения «невидимых» целей.

Однако это далеко не полный список сфер деятельности, где используется или планируется использовать объединение лазерного и радиоканалов.

23.4.2.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Целью морской лаборатории ASCOS является определение параметров низкоровневых облаков и их влияния на тепловой баланс Земли.

Для максимально точной количественной оценки изменчивых в широком диапазоне параметров облачности используется ряд инструментов, в т.ч. и лазерные датчики. Такой подход позволяет проводить непрерывные наблюдения вне зависимости от внешних факторов. В ясную или дождливую погоду, днем или ночью такой набор инструментов всегда получает данные с высокой точностью. На рис. 23.30 представлена схема взаимодействия измерительного оборудования с атмосферой.

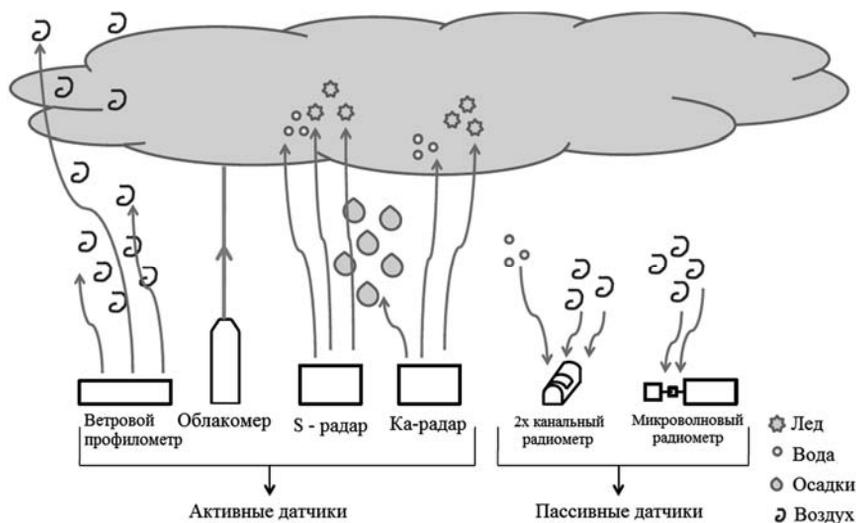


Рис. 23.30
Взаимодействие датчиков с атмосферными частицами

Стоит обратить внимание на то, что каждый конкретный датчик работает только с определенным родом атмосферных частиц. По большей части это связано с характером взаимодействия ЭМИ с атмосферой. Так длинноволновое излучение S диапазона (~10 см) «реагирует» на крупные частицы льда, а коротковолновое излучение лазера (~1.5 мкм) – на очень мелкие частицы. Данное обстоятельство связано с несколькими факторами:

- рассеиванием ЭМИ на частицах,
- спектральным ослаблением излучения,
- высотным градиентом рефракции излучения.

В итоге при использовании широкого диапазона ЭМИ получаем расширение условий применения системы. Данное утверждение позволяет углубиться в определении метеопараметров и с высокой точностью прогнозировать и измерять такие важные для авионавигации параметры как:

- высотный профиль температуры;
- высотный профиль давления;

- высотный профиль ветра (сдвиги ветра, турбулентность, микропорывы);
- параметры нижней и верхней границы облаков;
- параметры видимости;
- параметры определения опасных погодных явлений.

Ни одна из существующих на сегодня метеорологических систем обеспечения авиации не может считаться универсальной и решать весь комплекс задач метеолокации, описанных выше, в различных погодных условиях. И одним из перспективных направлений на пути совершенствования метеорологических комплексов может стать комплексирование лазерных и радиолокационных систем.

Действительно, для функционирования классических радиолокационных систем X-диапазона необходимы специфические погодные условия, когда отражаемость атмосферных объектов не ниже определенного значения, которое зависит от дальности работы, чувствительности приемника, уровня шумов и т.д. В целом можно говорить о том, что отражаемость ясного неба, легкой облачности недостаточна для получения достаточного уровня отраженного сигнала в радиодиапазоне. Если говорить о локаторе оптического диапазона с использованием в качестве источника излучения лазера (лидар), то здесь имеет место обратная ситуация.

На рис. 23.31 продемонстрирована именно эта зависимость.

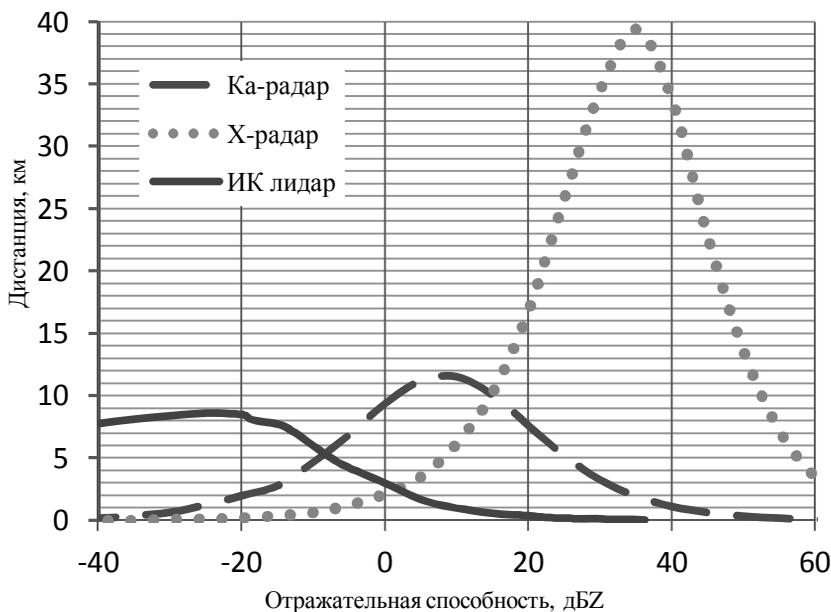


Рис. 23.31

График зависимости максимальной дистанции определения параметров погоды от погодных условий, выраженных в отражательной способности, при использовании ИК-лидара (красный), Ка-радар (синий) и X-радар (зеленый)

Мощность отраженного сигнала здесь интерпретирована в максимально возможную дистанцию обнаружения и зависит от отражательной способности атмосферы. Из-за специфики излучения на каждой длине волны можно подобрать такую их комбинацию, при которой осуществляется перекрытие всевозможных погодных условий, не теряя при этом потенциал определения метеопараметров на дальних дистанциях.

Из соображений, указанных выше, и рис. 23.31 видно, что комбинация Ка-радар, X-радар и ИК-лидара полностью перекрывает весь возможный погодный диапазон. Причем с запасом по дальности в 7...8 км!

В подтверждение теории надо добавить, что существует ряд проектов направленных на всепогодный мониторинг ветровой обстановки в районе аэропортов. Это концепт-проекты многих ведущих предприятий выпускающих оборудование в данной области (рис. 23.32).

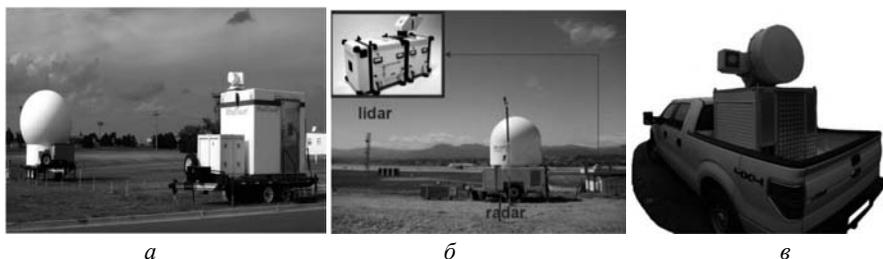


Рис. 23.32

Радар и лидар фирм Selex и Lockheed Martin (а); радар и лидар фирм Thales и Leosphere (б); разработка компании «Лазерные системы» (в)

23.4.3. АВТОМОБИЛИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Беспилотное управление транспортом – это новый виток в развитии в транспортной сфере. Такое управление позволит избавиться от дорожных заторов, регулировать организацию транспортных потоков. Однако такая система нуждается в высокой степени надежности и, по меньшей мере, должна обладать наблюдательностью и реакцией человека. Для достижения этой цели необходимо иметь не один набор «глаз», а целый ряд механических датчиков, акселерометров, лазерных и акустических дальномеров, ИК-камер и камер видимого диапазона, которые должны следить за состоянием машины и окружающим пространством. Такое количество измерительных систем позволит оперативно и с нечеловеческой реакцией, реагировать на происходящее.

На данный период времени известно большое количество международных проектов по разработке беспилотных» автотранспортных средств (БАС). Среди них можно выделить следующие проекты. Беспилотное транспортное средство

под названием «Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr» (кратко АКТИВ) разрабатывают 28 известных европейских компаний. В их число вошли BMW, Siemens, VW, Bosch, Vodafone и еще 23 компании. На рис. 23.33 схематично изображено положение датчиков на автомобиле нового поколения.

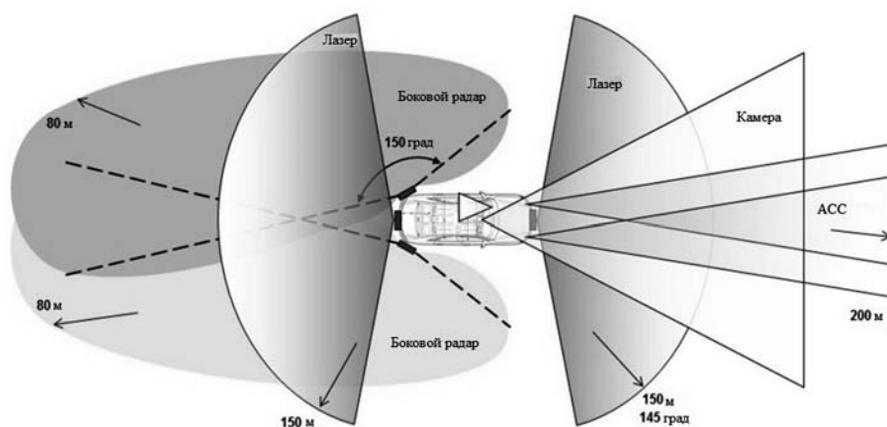


Рис. 23.33

Схематическое расположение автомобильных датчиков

Лазерный дальномер сканирует область вокруг автомобиля на расстоянии более 150 м и создает точную трехмерную картину его окружения. Радары помогают определить положение удаленных объектов по разностному отражению и оценить свойства цели (рис. 23.34). Видеокамера определяет сигналы светофора, распознает знаки дорожного движения и позволяет блоку управления улавливать движущиеся объекты, в т.ч. пешеходов и велосипедистов. Видеокамера располагается на лобовом стекле за зеркалом заднего вида.



Рис. 23.34

Работа нескольких беспилотных авто

Датчик оценки положения фиксирует движение автомобиля и помогает определить его точное местоположение на карте. Инерционный датчик движения измеряет направление ускорения или замедления, продольный и поперечный крен кузова автомобиля, при его движении. Используется датчик системы курсовой устойчивости.

В дополнение к сказанному нужно отметить тот факт, что подобные системы внедряются не только в пассажирский транспорт, но и в сельскохозяйственное производство, внутризаводское производство, грузовые перевозки. В будущем БАС полностью может заменить человеческое управление.

23.4.4. КВАНТОВЫЕ РАДАРЫ

В условиях роста военных технологий, в том числе и технологий «невидимости», стоит задача обнаружения объектов с высоким уровнем скрытности от РЛС. Новое поколение радаров – это гибридная система, использующая явление квантовой корреляции между лучом микроволнового излучения и лучом света (рис. 23.35). По сути, такой метод можно отнести к комплексированию на нижнем уровне, когда вся фильтрация и обработка информации происходит в аналоговом виде.

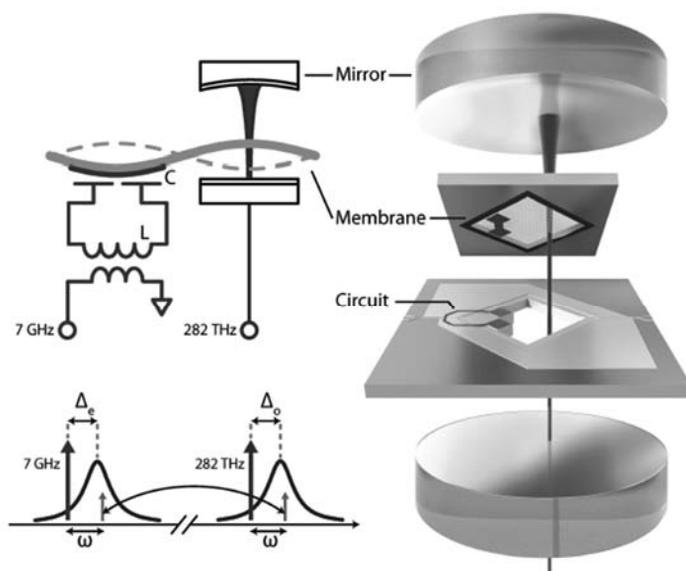


Рис. 23.35

Схема преобразования кванта света в квант радиоизлучения

Высокая чувствительность такого метода позволяет при помощи квантового радара обнаружить объекты с крайне низкой отражающей способностью, такие как самолеты-невидимки для радиолокации или раковые клетки, едва различимые от клеток здоровых тканей в медицине. Квантовый радар способен засечь сигнал, который по амплитуде может быть ниже, чем шум.

Это далеко не полный список возможных объединений оптико-электронных систем. Благодаря изученной природе взаимодействия излучения с окружающей средой и возможностью оценить это взаимодействие в широком диапазоне электромагнитного спектра открывается мир взаимодействия реального, где граница «видимости» и «невидимости» стирается, где сложные параметрические взаимодействия огромных масштабов становятся простыми для интерпретации и понимания, где безопасность и надежность систем стремятся к границе максимума.

23.4.5. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Технология комплексирования находит все более широкое применение в обработке материалов, наиболее яркое – в лазерных аддитивных технологиях. Известная компания DMG MORI SEIKI AG (Германия), впервые интегрировала лазерную технологию в 5-осевой высокотехнологичный фрезерный станок (рис. 23.36, *а*). Это инновационное гибридное решение до сих пор остается уникальным на мировом рынке и позволяет сочетать гибкость технологии лазерного наплавления металла с высокой точностью и качеством обработки при фрезеровании.



Рис. 23.36

Комплекс LASERTEC 65 3D Additive Manufacturing: лазерная аддитивная технология + прецизионное фрезерование (*а*); особенности комбинированной обработки (*б*)

Технология получения заготовок посредством наплавления металла через специальное сопло в 10 раз быстрее обработки в камере с порошком.

До настоящего времени аддитивные технологии ограничивались изготовлением опытных образцов и мелких деталей, которые невозможно изготовить с использованием каких-либо обычных технологий. Благодаря комбинации аддитивной обработки и обработки резанием на одном станке, аддитивная технология дополняет и расширяет традиционные методы обработки (рис. 23.36, б).

Кроме того, объединение аддитивных технологий с традиционными методами обработки на одном станке позволяет значительно расширить область применения. Например, сочетание двух этих методов является экономичным способом обработки крупногабаритных заготовок с большой величиной припуска. Автоматический переход от лазерной обработки к фрезерным операциям обеспечивает эффективную фрезерную обработку участков, которые невозможно обработать на готовой детали.

Принцип обработки осуществляется следующим образом (рис. 23.37):

- порошок материала послойно приваривается к базовому материалу (полученный наплавлением материал не имеет пор и разломов (трещин));
- таким образом, металлический порошок наплавляется на базовую поверхность, образуя высокопрочное соединение;
- защитный газ в зоне резания препятствует окислению в процессе наплавления материала;
- после охлаждения полученные слои материала могут быть обработаны механически.

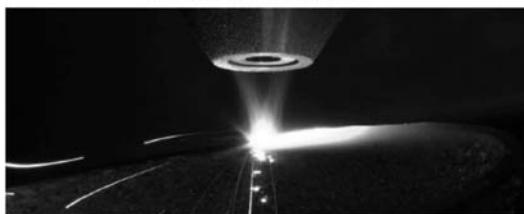
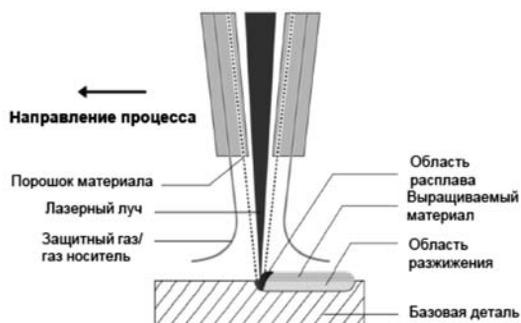


Рис. 23.37

Схема комбинированной обработки

В качестве примера реализации принципа комплексной обработки на рис. 23.38 показаны этапы создания, а на рис. 23.39 – готовый корпус турбины из нержавеющей стали.



Рис. 23.38

Этапы создания корпус турбины из нержавеющей стали методом комбинированной обработки: п. п. 1, 2, 5-9 – этапы лазерного выращивания; п. п. 3, 4, 10-12 – этапы механообработки (сверление, фрезерование)

Одно из основных преимуществ технологии комплексирования – экономия металла. Аддитивная технология позволяет наращивать металл и локально – только на отдельных участках заготовки. Если затем его обработать механически (фрезой), в стружку уйдет не более 5% металла. То есть можно постепенно слой за слоем наносить металл, получать изделия с тонкими стенками и очень сложной геометрией. В зависимости от мощности лазера и формы сопла их толщина может

составлять от 0.1 до 5 мм. Благодаря такому сочетанию технологических возможностей открываются совершенно новые перспективы серийного производства конструктивно сложных изделий больших размеров, в частности, для нужд аэрокосмической промышленности.

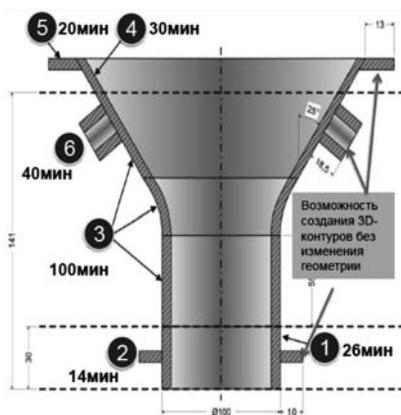


Рис. 23.39

Корпус турбины из нержавеющей стали,
изготовленный методом комбинированной обработки

Также упрощается и выполнение технологически очень сложной операции по восстановлению рабочей поверхности пресс-форм. Комплексированная технология позволяет наращивать на ней слои металла с учетом каналов охлаждения произвольной конфигурации, чего нельзя было сделать при обычных методах наплавки и мехобработки. Дополнительно необходимо отметить, что свойства металла, получаемого наплавкой обычной сваркой, отличаются от свойств металла деталей штампа, тогда как аддитивная технология дает абсолютно идентичный сплав, практически ничем не отличающийся от основного.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 23

23.1. Перспективным решением проблемы засорения околоземного космического пространства становится дистанционное воздействие на объекты космического мусора лазерным излучением в режиме абляции.

23.2. Под лазерной абляцией обычно понимают процесс удаления вещества с поверхности твердой мишени под воздействием лазерного излучения.

23.3. Абляционный режим связан с быстрым плавлением и испарением материала мишени под действием высокоэнергетических коротких лазерных импульсов, сопровождающимся взрывным формированием парогазового (пароплазменного) облака, движущегося нормально к обрабатываемой поверхности.

23.4. Дистанционное энергоснабжение космических аппаратов рационально осуществлять с помощью лазерных технологий, обеспечивающих подзарядку аккумуляторов спутников. Луч лазера намного интенсивнее, чем поток солнечного излучения, а значит, для передачи значительного количества энергии не требуется больших площадей фотоприёмных элементов.

23.5. Термоядерная реакция – это процесс синтеза (слияния) ядер легких элементов в более тяжелые.

23.6. Наиболее естественным способом обеспечения условий для начала реакции синтеза является повышение кинетической энергии движения частиц относительно друг друга до величины, превышающей кулоновский барьер, составляющий для ядер водорода $\sim 1.6 \cdot 10^{-15}$ Дж.

23.7. Эффективность космической солнечной электростанции определяется КПД систем преобразования солнечного излучения в электрическую энергию и КПД канала передачи энергии на Землю.

23.8. Технологии прямого лазерного микроstructuring и наноструктурирования осуществляются под действием одного лазерного пучка без переосаждения разлетающихся частиц, без использования различных экранирующих масок, а также без комбинации нескольких лазерных лучей.

23.9. Длинноволновое излучение *S*-диапазона (~ 10 см) «реагирует» на крупные частицы льда, а коротковолновое излучение лазера (~ 1.5 мкм) – на очень мелкие частицы.

23.10. Новое поколение радаров – это гибридная система, использующая явление квантовой корреляции между лучом микроволнового излучения и лучом света.

23.11. Благодаря комбинации аддитивной обработки и обработки резанием на одном станке, аддитивная технология дополняет и расширяет традиционные методы обработки.

23.12. Аддитивная технология позволяет наращивать металл и локально – только на отдельных участках заготовки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 23

23.1. Частицы каких размеров представляют особую опасность для техники и экипажа космического аппарата? Чем это обусловлено?

23.2. Что такое абляция? Принцип действия работы абляционного режима.

23.3. Что такое термоядерная реакция?

23.4. Что является продуктами абляции, в зависимости от интенсивности лазерного излучения?

23.5. Какие требования предъявляются к к. п. д. канала передачи энергии на землю?

23.6. Как осуществляется технология создания на поверхности металла структур минимального размера (десятки нанометров).

23.7. Для чего используется объединение аддитивных технологий с традиционными методами обработки?

23.8. Какие параметры для аэронавигации позволяет измерять использование широкого диапазона ЭМИ?

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 23

23.1. Черток Б.Е. Космонавтика XXI века. – М.: Издательство «РТСофт», 2010 г. – 864 с.

23.2. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований / Сост. В.В. Ефанов, И.Л. Шевалев; Под редакцией В.В. Ефанова, К.М. Пичхадзе: В 3-х т. Т.1. – М.: Изд-во МАИ, 2012. – 526 с.

23.3. Вениаминов С.С., Червонов А.М., Космический мусор – угроза человечеству / Под редакцией Р. Р. Назирова, О. Ю. Аксенова. М.: ИКИ РАН, 2012.

23.4. Авдеев А.В., Башкин А.С., Каторгин Б.И., Парфеньев М.В. Анализ возможности очистки околоземного пространства от опасных фрагментов космического мусора с помощью космической лазерной установки на основе автономного непрерывного химического HF-лазера // Квант. электроника. – 2011. – 41 (7). – С. 669–674.

23.5. *Campbell I.W.* Project ORION: Orbital debris removal using ground-based sensors and lasers // NASA Technical Memorandum 108522. – 1996.

23.6. Сысоев В.К., Пичхадзе К.М., Грешилов П.А., Верлан А.А. Солнечные космические электростанции – пути развития. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2013. – 160 с.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Лазерные технологии в настоящее время находятся в периоде своего бурного роста, расширяя возможности в традиционных направлениях и осваивая новые, недоступные, а то и вовсе неизвестные ранее возможности применения лазеров.

Мы заранее понимали принципиальную невозможность «объять необъятное» и описать все известные достижения лазерной техники и поэтому просим извинения, если не смогли в некоторых разделах отметить действительно самые значимые результаты или вообще пропустить какие-то новые и важные тенденции развития.

Насколько нам удалось достичь поставленной задачи – дать целостное и максимально полное представление о применениях лазеров, теперь должны решать читатели этой книги. Авторы могут только надеяться, что знакомство с этой книгой позволит расширить круг специалистов, заинтересованных в расширении областей применения исключительных возможностей лазеров – удивительнейшего создания человеческого таланта и результата напряженного труда тысяч ученых и инженеров во многих странах – для решения все новых самых неожиданных и сложных задач.

Мы будем также искренне благодарны за все советы и замечания, которые могут возникнуть при знакомстве с книгой.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ЛАЗЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

В. С. Лугиня, Н. Ю. Малькова

П.1
ПОВРЕЖДЕНИЯ,
ВЫЗВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Из-за низкой расходимости пучка и результирующей высокой интенсивности даже после того, как излучение переносится на большие расстояния, лазеры могут быть потенциально опасны для глаз при среднем уровне мощности и потенциально опасны для кожи при относительно высоком уровне мощности.

Повреждение глаз лазерным излучением при средних уровнях мощности, составляющих порядка нескольких милливатт, происходит из-за фокусирующего действия хрусталика глаза, концентрирующего энергию лазерного излучения в небольшом пятне на сетчатке. В фокальной точке происходит значительное повышение температуры, что приводит к повреждению фоторецепторов сетчатки.

Повреждение может быть вызвано как тепловыми, так и фотохимическими эффектами от воздействия лазерного излучения. Результатом теплового воздействия может быть термическое повреждение, которое возникает при нагреве ткани до температуры денатурации белков. В случае же фотохимического повреждения лазерное излучение вызывает химические реакции в тканях.

Разные длины волн лазерного излучения производят соответствующие патологические эффекты. Ультракоротковолновые лазеры, излучающие в ультрафиолетовой и синей областях электромагнитного спектра, вызывают фотохимическое повреждение, в то время как видимые и инфракрасные волны вредны из-за наносимого ими термического повреждения. В табл. П.1 перечислены различные диапазоны длин волн и вызываемые ими патологические эффекты соответственно.

Таблица П.1

Патологические эффекты различных диапазонов длин волн

Диапазон длин волн	Патологический эффект
180-315 нм	Фотокератит: воспаление роговицы, эквивалентное солнечному ожогу Эритема (ожог), ускоренное старение кожи, усиление пигментации
315-400 нм	Фотохимическая катаракта. Потемнение кожи, ожог
400-780 нм	Фотохимическое и тепловое повреждение сетчатки, ожог сетчатки, ухудшение зрения Ожог кожи, фоточувствительность кожи (покраснение, воспаление кожи, отек, мелкопузырчатая сыпь)
780-1400 нм	Катаракта, ожог сетчатки. Ожог кожи
1.4-3.0 мкм	Водяная вспышка, катаракта, ожог роговицы. Ожог кожи
3.0-1000 мкм	Ожог роговицы. Ожог кожи

П.2**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ОПАСНОСТИ ЛАЗЕРА**

Основываясь на том, насколько может быть опасен данный лазер для конструкторов, операторов и пользователей устройства, ему присваивается класс безопасности. Классификация основана на концепции доступного предела излучения (AEL), который определяется для каждого из лазерных классов. Есть две системы классификации: американская система, которая была в использовании до 2002 года, и пересмотренная система, которая является частью стандарта IEC 60825 и была включена в ANSI Z136.1 лазерной безопасности стандарта США с 2007 года.

Обозначают класс безопасности римскими цифрами в США и арабскими цифрами в ЕС; пересмотренная система использует арабские цифры во всех юрисдикциях. В обеих классификациях лазеры подразделяются на четыре основных класса и на несколько подклассов с точки зрения максимальной выходной мощности для различных диапазонов длин волн. Отличительные особенности классификаций лазерной безопасности в старом и пересмотренном стандарте приведены в табл. П.2 и П.3, соответственно.

Таблица П.2

Стандарт лазерной безопасности: старая система

Класс безопасности	Описание
I	Класс I – лазер безопасен и нет никакой возможности повреждения глаз из-за низкой выходной мощности после нескольких часов воздействия или в том случае, если лазер содержится внутри корпуса, например, компакт-диска плеера или лазерный принтер.
II	Этот класс относится к лазерам в видимой области спектра с мощностью до 1.0 мВт. Лазеры являются безопасными из-за мигательного рефлекса глаза, если намеренно не смотреть на луч в течение продолжительного периода времени. Большинство лазерных указок принадлежит к этой категории.
IIa	Характеризует лазеры непрерывного воздействия в течение > 1000 с, лазеры на нижней границе питания категории II класса может производить ожог сетчатки.
IIIa	Лазеры с уровнем мощности >1.0 мВт или <5.0 мВт, плотность мощности <2.5 мВт/см ² относятся к классу III a. Эти лазеры опасны, когда используются в сочетании с оптическими приборами, а также опасны для просмотра более чем 2.0 мин невооруженным глазом.
IIIb	Лазеры с уровнем мощности 5.0-500 мВт относятся к классу III b. Просмотр этих лазеров невооруженным глазом может привести к его повреждению. Диффузные отражения, как правило, не опасны, но и непосредственное наблюдение и зеркальное отражение одинаково опасны. Класс III b лазеров большой мощности может представлять опасность пожара или вызвать ожог кожи
IV	Лазеры, принадлежащие к классу IV, имеют уровни мощности >500 мВт. IV класса лазеры могут вызвать повреждения глаз или сжечь кожу даже при использовании без оптического прибора. Диффузное отражение от этих лазеров также может быть опасным для глаз и кожи в зоне номинальной опасности. Многие промышленные, медицинские, научные и военные лазеры категории IV класса

Оценка класса опасности по пересмотренной системе осуществляется на основании расчета MPE – Maximum permissible exposure – максимально допустимой дозы облучения. В Российской Федерации оценка класса опасности лазерного изделия осуществляется на основании расчета ПДУ.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения при однократном воздействии – максимальные уровни излучения, при воздействии которых существует незначительная вероятность возникновения обратимых отклонений в организме работающего.

Таблица П.3

Стандарт лазерной безопасности: пересмотренная система

Класс безопасности	Описание
1	<p>Доступное лазерное излучение не опасно при разумных условиях использования. Класс 1 лазера безопасен при любых условиях нормального использования.</p> <p>Это означает, что излучение лазера 1 класса безопасно во время просмотра невооруженным глазом или с типичной увеличительной оптикой, такой как телескоп или микроскоп; предел MPE не превышен</p>
1M	<p>Доступное лазерное излучение не представляет опасности при условии, что не используются оптические приборы, которые могут, например, фокусировать излучение. Лазер класса 1M является безопасным при всех условиях, за исключением, когда излучение прошло через увеличительную оптику, такую как телескопы и микроскопы.</p> <p>Классификация применима к лазерам с уровнем мощности большим, чем предел, указанный для 1 класса лазеров, при условии, что энергия излучения, входящего в зрачок глаза, не превышает пределы 1 класса лазеров из-за большого его расхождения</p>
2	<p>Доступное лазерное излучение ограничено видимой областью спектра (400-700 нм) и 1 мВт доступной мощности. В связи с наличием мигательного рефлекса глаза это излучение не считается опасным для ограниченного времени воздействия до 0.25 с</p>
2M	<p>Класс 2M лазера также безопасен из-за мигательного рефлекса глаза, с тем дополнительным ограничением, что излучение не рассматривается через оптические приборы.</p> <p>Классификация также применима к лазерным лучам с уровнем мощности >1 мВт при условии, что расхождения пучка достаточно, чтобы предотвратить прохождение через зрачок энергии, выходящей за пределы класса 2 лазеров</p>
3R	<p>Доступное излучение может быть опасным для глаз, но может иметь не превышающую в 5 раз допустимую оптическую мощность класса 2 лазеров в видимой области спектра и класса 1 для других длин волн. MPE может превышать класс 2M лазеров с низким риском травмы</p>
3B	<p>Доступное излучение может быть опасным для глаз и кожи при определенных условиях. Диффузное излучение, рассеянное от диффузной цели, как правило, безвредно. Размер доступной эмиссии 500 мВт для CW видимых лазеров в видимой области спектра и 30 мВт для импульсных лазеров. В случае прямого просмотра класса 3B требуются защитные очки</p>

Продолжение таблицы П.3

4	<p>Доступное излучение лазера класса 4 очень опасно для глаз и для кожи. Свет от диффузных отражений и косвенного просмотра может быть опасным для глаз.</p> <p>4 класс лазеров должен быть оборудован ключевым выключателем и должен иметь встроенный защитный замок. Большинство промышленных, медицинских, научных и военных лазеров относятся к этой категории</p>
----------	--

ПДУ лазерного излучения устанавливаются для двух условий облучения (однократного и хронического) для трех диапазонов длин волн, приведенных в табл. П.4.

Таблица П.4

Диапазоны длин волн

Диапазон I	Диапазон II	Диапазон III
$180 < \lambda \leq 380 \text{ нм}$	$380 < \lambda \leq 1400 \text{ нм}$	$1400 < \lambda \leq 10^5 \text{ нм}$

Нормируемыми параметрами лазерного излучения являются энергетическая экспозиция H и облученность E , усредненные по ограничивающей апертуре. Для определения предельно допустимых уровней $H_{пду}$ и $E_{пду}$ при воздействии лазерного излучения на кожу усреднение производится по ограничивающей апертуре диаметром 1.1×10^3 м (площадь апертуры $S_a = 10^6 \text{ м}^2$).

Для определения предельно допустимых уровней $H_{пду}$ и $E_{пду}$ при воздействии на глаза лазерного излучения в диапазонах I и III усреднение производится также по апертуре диаметром 1.1×10^{-3} м, а в диапазоне II – по апертуре диаметром 7×10^{-3} м.

Наряду с энергетической экспозицией и облученностью нормируемыми параметрами являются также энергия W и мощность P излучения, прошедшего через указанные ограничивающие апертуры.

При оценке воздействия на глаза лазерного излучения в диапазоне II ($380 < \lambda \leq 1400 \text{ нм}$) нормирование энергии и мощности лазерного излучения, прошедшего через ограничивающую апертуру диаметром 7×10^{-3} м, является первостепенным. Указанные выше энергетические параметры связаны соотношениями:

$$H_{пду} = \frac{W_{пду}}{S_a}; E_{пду} = \frac{P_{пду}}{S_a}. \tag{П.1}$$

Допустимые пределы излучений для лазерных изделий представлены в таблицах П.5–П.9.

Таблица П.5

Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 1

Длина волны λ , нм	Длительность излучения t , с											
	$< 10^{-9}$	10^{-9} - 10^{-7}	10^{-7} - 1.8×10^{-5}	1.8×10^{-5} - 5×10^{-5}	5×10^{-5} - 10^{-3}	1×10^{-3} - 3	3- 10	10- 10^3	10^3 - 10^4	10^4 - 3×10^4		
180-302.5	2.4×10^{-5} Дж											
302.5-315	2.4×10^4	$7.9 \times 10^{-7} C_1$ Дж ($t < T_1$)					$7.9 \times 10^{-7} C_2$ Дж ($t < T_1$)		$7.9 \times 10^{-7} C_2$ Дж			
315-400		$7.9 \times 10^{-7} C_1$ Дж						7.9×10^{-3} Дж	7.9×10^{-6} Вт			
400-550	200 C_6 Вт	$2 \times 10^{-7} C_6$ Дж	$7 \times 10^{-4} \times t^{0.75} C_6$ Дж				$3.9 \times 10^{-3} C_6$ Дж		$3.9 \times 10^{-7} C_6$ Вт			
550-700									$3.9 \times 10^{-7} C_3 C_6$ Вт			
700-1050	200 $C_4 C_6$ Вт	$2 \times 10^{-7} C_4 C_6$ Дж	$7 \times 10^{-4} \times t^{0.75} C_4 C_6$ Дж					$1.2 \times 10^{-4} C_4 C_6$ Вт				
1050-1400	$2 \times 10^3 C_6 C_7$ Вт	$2 \times 10^{-6} C_4 C_6$ Дж			$3.5 \times 10^{-3} \times t^{0.75} C_6 C_7$ Дж				$6 \times 10^{-4} C_6 C_7$ Вт			
1400-1500	8×10^5 Вт	8×10^{-4} Дж				$4.4 \times 10^{-3} \times t^{0.25}$ Дж	$5.4 \times 10^{-2} \times t^{0.25}$ Дж	10^{-2} Вт				
1500-1800	8×10^6 Вт	8×10^{-3} Дж					0.1 Дж					
1800-2600	8×10^5 Вт	8×10^{-4} Дж				$4.4 \times 10^{-3} \times t^{0.25}$ Дж	$5.4 \times 10^{-2} \times t^{0.25}$ Дж					
2600-4000	8×10^4 Вт	8×10^{-5} Дж	$4.4 \times 10^{-3} \times t^{0.25}$ Дж									
4000- 10^6	10^{11} Вт \times м $^{-2}$	100 Дж \times м $^{-2}$	$5.6 \times 10^3 \times t^{0.25}$ Дж \times м $^{-2}$					10^3 Вт \times м $^{-2}$				

Примечание: Поправочные коэффициенты и единицы см. таблицу П.9

Таблица П.6

Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 3А

Длина волны λ , нм	Длительность излучения t , с					
	$< 10^{-9}$	10^{-9} - 10^{-7}	10^{-7} - 1.8×10^{-5}	1.8×10^{-5} - 5×10^{-5}	5×10^{-5} - 1×10^{-3}	0.25 - 3
180-302,5					1×10^{-3} - 0.25	10^3 - 3×10^3
302,5-315	$< 10^9$ Вт и 3×10^{10} Вт×м ⁻²				1.2×10^{-4} Дж и 30 Дж×м ⁻²	10^3 - 3×10^3
315-400	1.2×10^5 Вт и 3×10^{10} Вт×м ⁻²	$4 \times 10^6 C_1$ Дж и C_1 Дж×м ⁻² ($< T$)	$4 \times 10^6 C_2$ Дж и C_2 Дж×м ⁻² ($r > T$)			$4 \times 10^6 C_2$ Дж и C_2 Дж×м ⁻²
400-700	$1000 C_6$ Дж и $5 \times 10^6 C_6$ Вт×м ⁻²	$4 \times 10^6 C_1$ Дж и C_1 Дж×м ⁻²				4×10^2 Дж и 10^4 Дж×м ⁻²
700-1050	$1000 C_4 C_6$ Вт и $5 \times 10^6 C_4 C_6$ Вт×м ⁻²	$10^{-6} C_6$ Дж и $5 \times 10^{-3} C_6$ Дж×м ⁻²	$3.5 \times 10^{-3} \times t^{0.75} C_6$ Дж и $18 t^{0.75} C_6$ Дж×м ⁻²			$5 \times 10^{-3} C_6$ Вт и $25 C_6$ Вт×м ⁻²
1050-1400	$10^4 C_6 C_7$ Вт и $5 \times 10^7 C_4 C_7$ Вт×м ⁻²	$10^6 C_4 C_6$ Дж и $5 \times 10^{-3} C_4 C_6$ Дж×м ⁻²	$3.5 \times 10^{-3} \times t^{0.75} C_4 C_6$ Дж и $18 t^{0.75} C_4 C_6$ Дж×м ⁻²			$6 \times 10^{-4} C_4 C_6$ Вт и $3.2 C_4 C_6$ Вт×м ⁻²
1400-1500	$10^4 C_6 C_7$ Вт и $5 \times 10^7 C_4 C_7$ Вт×м ⁻²	$10^5 C_6 C_7$ Дж и $5 \times 10^{-3} C_6 C_7$ Дж×м ⁻²	$1.8 \times 10^{-2} \times t^{0.75} C_6 C_7$ Дж и $90 t^{0.75} C_6 C_7$ Дж×м ⁻²			$3 \times 10^{-3} C_6 C_7$ Вт и $16 C_6 C_7$ Вт×м ⁻²
1500-1800	4×10^9 Вт и 10^{12} Вт×м ⁻²	4×10^3 Дж и 10^3 Дж×м ⁻²	$2.2 \times 10^{-2} \times t^{0.75}$ Дж и $5600 t^{0.75}$ Дж×м ⁻²			$0.27 t^{0.25}$ Дж и $5600 t^{0.25}$ Дж×м ⁻²
1800-2600	4×10^7 Вт и 10^{13} Вт×м ⁻²	4×10^2 Дж и 10^4 Дж×м ⁻²	4×10^{-2} Дж и 10^4 Дж×м ⁻²			0.5 Дж и 10^4 Дж×м ⁻²
2600-4000	4×10^9 Вт и 10^{12} Вт×м ⁻²	4×10^3 Дж и 10^3 Дж×м ⁻²	$2.2 \times 10^{-2} \times t^{0.75}$ Дж и $5600 t^{0.75}$ Дж×м ⁻²			5×10^2 Вт и 10^{13} Вт×м ⁻²
4000-10 ⁶	4×10^5 Вт и 10^{11} Вт×м ⁻²	4×10^4 Дж и 100 Дж×м ⁻²	$2.2 \times 10^{-2} \times t^{0.75}$ Дж и $5600 t^{0.75}$ Дж×м ⁻²			$0.27 t^{0.25}$ Дж и $5600 t^{0.25}$ Дж×м ⁻²
4000-10 ⁶	10^{11} Вт×м ⁻²	100 Дж×м ⁻²	$5600 t^{0.75}$ Дж×м ⁻²			10^3 Вт×м ⁻²

Примечание: Поправочные коэффициенты и единицы см. таблицу П.9

Таблица П.7

Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 2

Длина волны λ , нм	Длительность излучения t , с	ДПИ для класса 2
400-700	$t < 0.25$	Такие же, как ДПИ для класса 1
	$t \geq 0.25$	$C_6 \times 10^{-3}$ Вт

Примечание: Поправочные коэффициенты и единицы см. таблицу П.9

Таблица П.8

Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 3В

Длина волны λ , нм	Длительность излучения t , с		
	$< 10^{-9}$	10^{-9} -0.25	0.25 - $3 \cdot 10^4$
180-302.5	$3.8 \cdot 10^5$ Вт	$3.8 \cdot 10^{-4}$ Дж	$1.5 \cdot 10^{-3}$ Вт
302.5-315	$1.25 \cdot 10^4 C_2$ Вт	$1.25 \cdot 10^{-5} C_2$ Дж	$5 \cdot 10^{-5} C_2$ Вт
315-400	$1.25 \cdot 10^8$ Вт	0.125 Дж	0.5 Вт
400-700	$3 \cdot 10^8$ Вт	0.03 Дж для $t < 0.06$ [с] 0.5 Вт для $t \geq 0.06$ [с]	0.5 Вт
700-1050	$3 \cdot 10^7 C_4$ Вт	0.03 C_4 Дж для $t < 0.06 C_4$ [с] 0.5 Вт для $t \geq 0.06 C_4$ [с]	0.5 Вт
1050-1400	$1.5 \cdot 10^8$ Вт	0.15 Дж	0.5 Вт
1400-10	$1.25 \cdot 10^8$ Вт	0.125 Дж	0.5 Вт

Примечание: Поправочные коэффициенты и единицы см. таблицу П.9

Таблица П.9

Поправочные коэффициенты

Параметр	Спектральный диапазон, нм
$C_1 = 5.610^3 \cdot t^{0.25}$	302.5-400
$T_1 = 10^{0.8 \cdot (\lambda - 295)} \cdot 10^{-15}$ [с]	302.5-315

Продолжение таблицы П.9

Параметр	Спектральный диапазон, нм
$C_2=10^{0.2 \cdot (\lambda-295)}$	302.5-315
$T_2=1010^{0.02 \cdot (\lambda-550)} \cdot [с]$	550-700
$C_3=10^{0.015 \cdot (\lambda-550)}$	550-700
$C_4=10^{0.002 \cdot (\lambda-700)}$	700-1050
$C_4=5$	1050-1400
$C_5=N^{1/4}$	400-1000
$C_6=1$ для $\alpha \leq \alpha_{\min}$	400-1400
$C_6= \alpha / \alpha_{\min}$ для $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$	400-1400
$C_6= \alpha_{\max} / \alpha_{\min}$ для $\alpha > \alpha_{\max}$	400-1400
$C_7=1$	1050-1150
$C_7=10^{0.018 \cdot (\lambda-1150)}$	1150-1200
$C_7=8$	1200-1400

Примечания: $\alpha_{\min}=1.5$ мрад для $t < 0.7$ с; $\alpha_{\min}=2t^{3/4}$ мрад для $0.7 \leq t < 10$ с;
 $\alpha_{\min}=11$ мрад, $\alpha_{\max}=0.1$ мрад для $t \geq 10$ с;
 C_5 применяется только для импульсов с длительностью короче, чем 0.25 с.

П.3 ТРЕБОВАНИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ЛАЗЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Согласно требованиям Санитарных норм и правил устройства и эксплуатации лазеров № 5804-91 должны быть выполнены следующие требования при изготовлении лазерных изделий.

Опытные образцы лазерных изделий должны иметь экспертное заключение по результатам санитарно-эпидемиологической экспертизы класса опасности продукции.

Конструкция лазерных изделий должна обеспечивать защиту персонала от лазерного излучения и других опасных и вредных производственных факторов.

В паспорте (формуляре) на лазерное изделие должно быть указано:

- длина волны излучения,
- выходная мощность (энергия),
- длительность импульса,
- частота следования импульсов,
- длительность серии импульсов,
- начальный диаметр пучка излучения по уровню e^{-2} ,
- расходимость пучка по уровню e^{-2} ,
- класс опасности лазера,
- сопутствующие опасные и вредные факторы.

За определение класса опасности лазеров ответственность несет предприятие-изготовитель.

Контроль за правильностью установления класса лазера возлагается на органы Государственного санитарного надзора.

Лазер, независимо от класса, должен иметь защитный корпус (кожух).

Защитный корпус (кожух) или его части, снимаемые при техническом обслуживании и открывающие доступ к лазерному излучению и высокому напряжению в цепях электропитания, должны иметь защитную блокировку.

Срабатывание блокировки на работающем лазерном изделии или не полностью разряженной батарее конденсатора должно сопровождаться четким визуальным или звуковым сигналом тревоги.

Пульт управления лазерных изделий III и IV классов должен оснащаться съемным ключом.

Лазеры III и IV классов, генерирующие излучение в видимом диапазоне, и лазеры IV класса с генерацией в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах должны снабжаться световыми сигнальными устройствами, работающими с момента начала генерации и до ее окончания. Световой предупредительный сигнал должен быть хорошо виден через защитные очки.

Пульт (панель) управления лазерными изделиями, независимо от класса, должен размещаться так, чтобы при регулировке и работе не происходило облучения персонала лазерным излучением. Конструкция лазерных изделий III, IV классов должна обеспечивать возможность дистанционного управления.

Лазеры III, IV классов должны содержать дозиметрическую аппаратуру.

Лазерные изделия III, IV классов должны иметь прерыватель пучка или аттенуатор для ограничения распространения излучения.

В лазерных изделиях III, IV классов необходимо предусматривать возможность снижения выходной мощности (энергии) излучения при их техническом обслуживании.

Лазерные изделия III, IV классов, генерирующие излучение в невидимой части спектра, должны иметь встроенные лазеры I, II класса с видимым излучением для визуализации основного лазерного пучка.

Все оптические системы наблюдения (окуляры, смотровые окна, экраны) должны обеспечивать снижение энергии (мощности) проходящего через них излучения до предельно допустимых уровней.

Лазерные изделия медицинского назначения должны быть оборудованы средствами для измерения уровня лазерного излучения, воздействующего на пациента и обслуживающий персонал.

Лазерные изделия, в которых используется волоконно-оптическая передача излучения, должны быть обеспечены специальным инструментом для отсоединения систем передачи и механическими ослабителями лазерного пучка на соединителях.

В лазерных изделиях, предназначенных для использования в театральном зрелищных мероприятиях, учебных заведениях, на открытых пространствах (топографическая съемка, лидары, навигационное оборудование, связь), запрещается применение лазеров III, IV класса.

В соответствии с требованиями ГОСТ IEC 60825-4-2014 лазерные изделия должны быть разработаны также с учетом следующих требований.

Конструктивные требования:

- пассивная защита (металлическая панель для отвода тепла, прозрачный лист, не пропускающий излучение на данной волне);

- активная защита (активные сенсоры, регистрирующие перегрев, системы регистрации перепада давления);

- индикаторы опасности (наличие шильд, надписей);

Обоснованный выбор средств защиты:

- определение предпочтительного места расположения защиты, определение ППЭ в зоне защиты;

- наличие системы автоматического мониторинга экспозиции;

- перемещение защиты лазера на большее расстояние от рабочей зоны лазера;

- внесение в конструкцию смотровых окон.

П.4

ЗНАКИ И НАДПИСИ

В соответствии с требованиями Санитарных норм и правил устройства и эксплуатации лазеров № 5804-91 лазерные изделия должны маркироваться в соответствии с приведенными ниже требованиями.

Знаки должны быть четкими, хорошо видимыми и надежно укреплены на изделии. Рамки текста и обозначения должны быть черными на желтом фоне. Если размеры или конструкция изделия не позволяют прикрепить к нему знак или надпись, то они должны быть внесены в паспорт.

Любое лазерное изделие I класса должно иметь пояснительный знак с надписью «ЛАЗЕРНОЕ ИЗДЕЛИЕ КЛАССА I»

Любое лазерное изделие II класса должно иметь предупреждающий знак в соответствии с ГОСТ 12.4.026 и пояснительный знак с надписью «ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. НЕ СМОТРИТЕ В ПУЧОК», «ЛАЗЕРНОЕ ИЗДЕЛИЕ КЛАССА II»

Лазерное изделие III класса должно иметь предупреждающий знак и пояснительный знак с надписью «ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ИЗБЕГАЙТЕ ОБЛУЧЕНИЯ ГЛАЗ», «ЛАЗЕРНОЕ ИЗДЕЛИЕ КЛАССА III».

Лазерное изделие IV класса должно иметь предупреждающий знак и пояснительный знак с надписью «ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ИЗБЕГАЙТЕ ОБЛУЧЕНИЯ ГЛАЗ И КОЖИ ПРЯМЫМ И РАССЕЯННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ», «ЛАЗЕРНОЕ ИЗДЕЛИЕ КЛАССА IV»

Лазерные изделия II-IV класса должны иметь у апертуры, через которую выпускается излучение, пояснительный знак с надписью «ЛАЗЕРНАЯ АПЕРТУРА».

Лазерные изделия, за исключением изделий I класса, должны иметь на пояснительном знаке информацию об изготовителе, максимальной выходной энергии (мощности) лазерного излучения и длине волны излучения.

Панель защитного корпуса (кожуха), при снятии или смещении которой возможен доступ человека к лазерному излучению, должна иметь пояснительный знак с надписью «ВНИМАНИЕ! ПРИ ОТКРЫВАНИИ – ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ»

Лазерные изделия, генерирующие излучение вне диапазона 380–750 нм, должны иметь следующую надпись в пояснительном знаке: «НЕВИДИМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ»

Внешний вид предупреждающего знака для лазерных изделий II-IV классов и пример предупреждающей надписи показан на рис. П.1



Внимание! Лазерное излучение!
Диодный лазер. Класс IIIa

Рис. П.1

Внешний вид предупреждающего знака для лазерных изделий II-IV классов и пример предупреждающей надписи

П.5 СРЕДСТВА ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Некоторые виды средств индивидуальной защиты приведены в табл. П.10-П.12.

Таблица П.10

Защитный лицевой щиток

Марка щитка	Марка светофильтра	Диапазон защиты, нм	Оптическая плотность
НФП2	Л17	10600	2
		10600	4
		от слепящей яркости (для глаза) в диапазоне 400-1100	

Таблица П.11

Защитные очки

Марка очков	Марка светофильтров	Диапазон защиты, нм	Оптическая плотность
ЗН22-72-СЗС22	СЗС22	630-680	3
		680-1200	6
		1200-1400	3
ЗНД4-72-СЗС22-СС23-1	СЗС22	630-680	3
		680-1200	6
		1200-1400	3
	ОС23-1	400-530	6
ЗН62-Л17	Л17	600-1100	4
		530	2
ЗН62-ОЖ	ОЖ	200-510	3

Таблица П.12

Защитные насадки для настройщиков резонаторов газовых лазеров

Марка насадки	Длина волны, нм (тип лазера)	Максимальная мощность, Вт
ЗН-0.441	441 (гелий-кадмиевый)	3-4
ЗН-0.488	488 (аргоновый)	3-4
ЗН-0.51(0.58)	510 и 580 (на парах меди)	3-4
ЗН-0.633	633 (гелий-неоновый)	$5 \cdot 10^{-2}$

П.6

ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПДУ

Одномодовый лазер на молекулярном азоте с длиной волны излучения 337.1 нм генерирует непрерывную последовательность равных по амплитуде импульсов с частотой $F_{\text{и}} = 5 \cdot 10^3$ Гц.

Длительность отдельного импульса $\tau_{\text{и}} = 5$ нс. Диаметр пучка вблизи выходного зеркала равен $d_{\text{и}} = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Средняя мощность излучения $\bar{P}(t) = 0.5$ Вт.

Найти предельно допустимые энергетические параметры излучения и определить класс лазера.

Решение

а) ПДУ однократного облучения глаз.

Для определения ПДУ необходимо знать максимальную длительность воздействия t . При случайном воздействии на глаза излучения диапазона (180–380 нм) эта величина принимается равной 10 с.

Определяем $E_{\text{ПДУ}}^{\text{С}}(t)$ в соответствии с п. 2.7 (табл. П.1) как наименьшее из значений E_1 и E_2 .

$$E_1 = E_{\text{ПДУ}}(t); \quad E_2 = \frac{H_{\text{ПДУ}}(\tau_{\text{и}})}{t} \left(\frac{N}{\xi} \right)^{1/2}.$$

Значения задаются п. 2.2 (табл. П.1) и составляют, соответственно, при $\tau_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-9}$ с

$$H_{\text{ПДУ}}(\tau_n) = 4,4 \cdot 10^3 \sqrt[4]{\tau} = 37 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2};$$

при максимальной длительности воздействия $t = 10 \text{ с}$

$$E_{\text{ПДУ}}(t) = 8 \cdot 10^3 / t = 800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Число импульсов в серии определяется по формуле:

$$N = F_{\text{и}} \cdot t + 1.$$

Величина N округляется до ближайшего, меньшего, целого числа.

Для рассматриваемых условий $N = 5 \cdot 10^4$.

Определяем E_1 и E_2 по вышеприведенным формулам:

$$E_1 = 800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ и } E_2 = 830 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Сравнивая полученные значения, получаем, что предельно допустимое значение облученности при однократном воздействии на глаза серии импульсов рассматриваемого лазерного излучения следует принять равным E_1 (согласно п.2.7.2, табл. П.1).

$$E_{\text{ПДУ}}^c(t) = 800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Соответствующее значение энергетической экспозиции равно

$$H_{\text{ПДУ}}^c(t) = E_{\text{ПДУ}}^c(t) \cdot t = 8 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Для ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра нормируемой величиной является также суточная доза $H_{\text{ПДУ}}^{\Sigma} (3 \cdot 10^4)$. В соответствии с табл. П.2 суточная доза не должна превышать $8 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$.

Так как рассчитанная выше величина $H_{\text{ПДУ}}^c(t)$ равна $H_{\text{ПДУ}}^{\Sigma} (3 \cdot 10^4)$, то условия п.2.1.2 (табл. П.2) выполняется.

б) ПДУ для однократного облучения кожи.

Время случайного воздействия на кожу излучения УФ, в соответствии с действующими международными нормами, принимается равным 10 с.

Таким образом, так же как и для глаз, согласно табл. 1.1,

$$E_{\text{ПДУ}}^c(t) = 800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}; H_{\text{ПДУ}}^c(t) = E_{\text{ПДУ}}^c(t) \cdot t = 8 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

В рассматриваемом случае значение $H_{\text{ПДУ}}^c(t)$ равно суточной дозе, т. е. является предельным. Поэтому повторное облучение кожи недопустимо.

в) ПДУ при хроническом воздействии на глаза и кожу.

В соответствии с п. 2.2 (табл. П.2), при хроническом воздействии предельно допустимое значение облученности составит $80 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, а соответствующее зна-

чение предельно допустимой энергетической экспозиции за время $t = 10$ с составит $800 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$.

Максимальная суточная доза также составляет $800 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$.

Вывод: При рассматриваемых условиях для одного работающего допустимо проведение не более одной производственной операции продолжительностью 10 с в течение суток.

Если рассматриваемый лазер необходимо использовать при проведении 10 технологических операций с временными промежутками большими 10 минут, то, согласно п.2.7.2 (табл. П.2), предельно допустимое значение облученности глаз и кожи составит $E_{\text{ПДУ}}^{\text{C}}(t) = 8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

г) Определение класса лазера.

Для определения класса лазера необходимо сопоставить фактические энергетические параметры генерируемого излучения с нормируемыми предельно допустимыми значениями для однократного воздействия.

Как определено ранее, ПДУ энергетической экспозиции для рассматриваемого лазера при однократном воздействии составляет для глаз и кожи $H_{\text{ПДУ}}^{\text{C}}(t) = 8 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$. Согласно п. 2.7.2, табл. П.2 энергетическая экспозиция для одного импульса при этом равна $H_{\text{ПДУ}}(\tau) = 8 \cdot 10^3 / 5 \cdot 10^4 = 0.16 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$.

Проверяем выполнение условий в соответствии с табл. П.3.

Зная, что средняя мощность излучения $P = 0.5 \text{ Вт}$, для одного импульса из серии получаем

$$H^{\text{C}}(\tau_{\text{и}}) = \frac{P \cdot t}{N} = \frac{0.5 \cdot 10}{5 \cdot 10^4} = 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Проверяем условие для II класса для одиночного импульса:

$$H^{\text{C}}(\tau_{\text{и}}) \leq \pi \cdot 10^{-2} H_{\text{ПДУ}}(\tau_{\text{и}});$$

$$H^{\text{C}}(\tau_{\text{и}}) = 10^{-4} \leq 3.14 \cdot 10^{-2} \cdot 0.16 = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Вывод: данный лазер относится ко II классу.

П.7

ПЕРЕЧЕНЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ И ДРУГИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

ГОСТ 8.357-79 Средства измерения параметров лазерного излучения. Диапазоны энергетические, спектральные, временные.

ГОСТ 12.0.001-82 ССБТ. Основные положения.

ГОСТ 12.0.002-80 ССБТ. Термины и определения.

ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы.

Классификация.

ГОСТ 12.1.001-83 ССБТ. Ультразвук. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.1.002-84 ССБТ. Электрические поля промышленной частоты.

ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.1.004-85 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот.

ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.

ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

ГОСТ 12.1.014-84 ССБТ. Воздух рабочей зоны. Метод измерения концентрации вредных веществ индикаторными трубками.

ГОСТ 12.1.016-79 ССБТ. Воздух рабочей зоны. Требования к методикам измерения концентрации вредных веществ.

ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.

ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.

ГОСТ 12.1.040-83 ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения.

ГОСТ 12.1.042-84 ССБТ. Вибрация. Методы измерения на рабочих местах.

ГОСТ 12.1.043-84 ССБТ. Вибрация. Методы измерения на рабочих местах в производственных помещениях.

ГОСТ 12.2.003-74 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.2.007.0-75 ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.2.007.3-75 ССБТ. Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности.

ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.

ГОСТ 12.2.061-82 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.3.002-75 ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.4.001-80 ССБТ. Очки защитные. Термины и определения.

ГОСТ 12.4.003-80 ССБТ. Очки защитные. Типы.

ГОСТ 12.4.009-83 ССБТ. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.

ГОСТ 12.4.011-87 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

ГОСТ 12.4.012-83 ССБТ. Вибрация. Средства измерения.

ГОСТ 12.4.013-85 ССБТ. Очки защитные. Общие технические условия.

ГОСТ 12.4.023-84 ССБТ. Щитки защитные лицевые. Общие технические требования и методы контроля.

ГОСТ 12.4.026-76 ССБТ. Цвета сигнальные и знаки безопасности.

ГОСТ 12.4.115-82 ССБТ. Средства индивидуальной защиты работающих. Общие требования к маркировке.

ГОСТ 12.4.120-83 ССБТ. Средства коллективной защиты от ионизирующего излучения.

ГОСТ 12.4.123-83 ССБТ. Средства коллективной защиты от ИК излучения. Общие технические требования.

ГОСТ 12.4.125-83 ССБТ. Средства коллективной защиты работающих от воздействия механических факторов. Классификация.

ГОСТ 12.4.153-85 ССБТ. Очки защитные. Номенклатура показателей качества.

ГОСТ 7601-78 Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин.

ГОСТ 9411-81Е. Стекло цветное оптическое. Технические условия.

ГОСТ 15093-75. Изделия квантовой электроники. Лазеры и устройства управления лазерным излучением. Термины и определения.

ГОСТ 16948-79. Источники света искусственные. Методы определения плотности потока энергии УФ излучения.

ГОСТ 19605-74. Организация труда. Основные понятия. Термины и определения.

ГОСТ 20445-75. Здания и сооружения промышленных предприятий. Метод измерения шума на рабочих местах.

ГОСТ 24286-88. Фотометрия импульсная. Термины и определения.

ГОСТ 24453-80. Измерения параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин.

ГОСТ 24469-80. Средства измерения параметров лазерного излучения. Общие технические требования.

ГОСТ 24940-81. Здания и сооружения. Метод измерения освещенности.

ГОСТ 25811-83. Средства измерений средней мощности лазерного излучения. Типы. Основные параметры. Методы измерений.

ГОСТ 26086-84. Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения.

ГОСТ 26148-84. Фотометрия. Термины и определения.

СН 245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий.

Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87.

Санитарные нормы ультрафиолетового излучения N 4557-88.

Санитарные нормы микроклимата производственных помещений N 4080-86.

СНиП П-4-79. Нормы проектирования. Естественное и искусственное освещение.

Санитарные правила работы с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения N 1860-79.

Санитарные нормы допустимых уровней шума на рабочих местах N 3223-85.

Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ). Москва. Атомиздат. 1972.

Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей (ПТБ). Москва. Атомиздат. 1972.

Mainster M.A., Sliney D.H., Belcher C.D. 3rd, Buzney S.M. Laser photodisrupters; damage mechanisms, instrument design and safety // Ophthalmology. 1983. Vol. 90. pp. 973–991.

П.8

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

1. **Номинальная опасная для глаз зона** (Nominal Ocular Hazard Distance [N.O.H.D.]) может быть определена как:

$$N.O.H.D. = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{4P_0}{\pi \cdot MPE} - (2w)^2}, \quad (\text{П.2})$$

где θ – угол расходимости, P_0 – мощность источника, w – диаметр Гауссова пучка, M.P.E – Maximum Permissible Exposure.

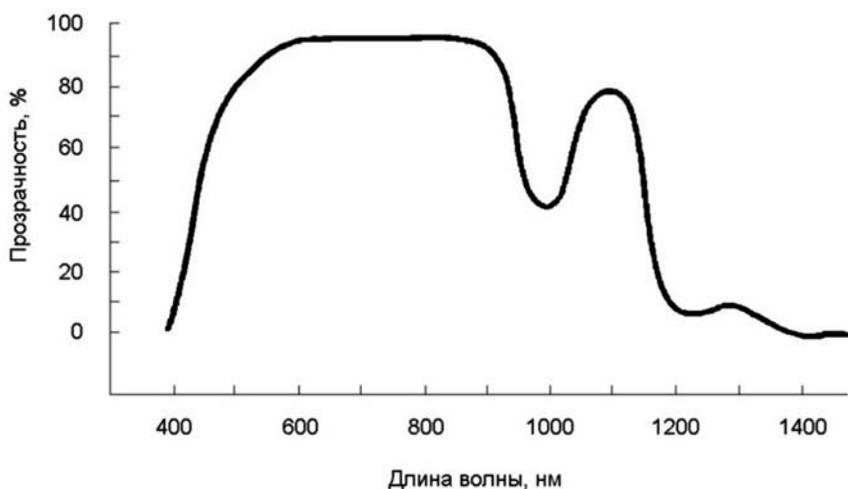
При использовании оптической системы, следует учитывать фокусировку луча:

$$N.O.H.D. = f + \frac{1}{\text{tg } \alpha} \sqrt{\frac{P_0}{\pi \cdot MPE}}, \quad (\text{П.3})$$

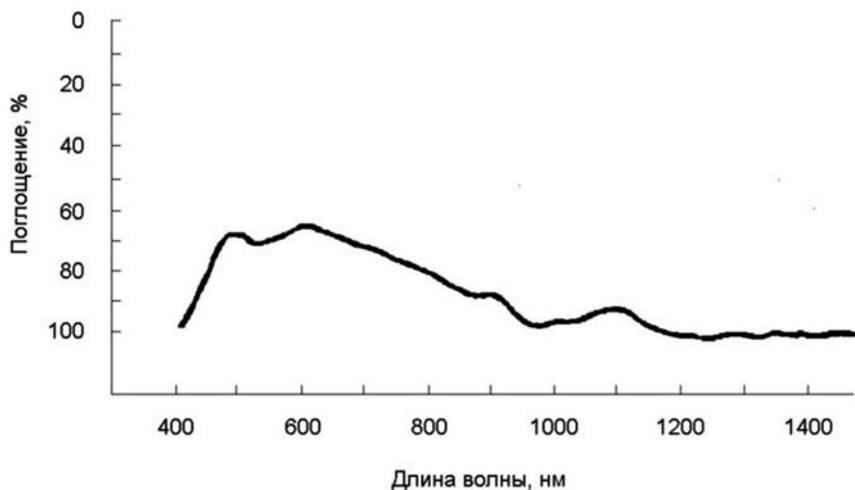
где f – фокусное расстояние оптической системы, α – половинный угол апертуры луча.

2. Спектральные характеристики глаза.

При оценке безопасности лазерного излучения необходимо учитывать спектральные характеристики глаза. На рис. П.1 представлена спектральная зависимость для прозрачности глазных сред от длины волны лазерного излучения, а на рис. П.2 спектральная зависимость для поглощения тканей глазного дна с учетом пропускания глазных сред.

**Рис. П.1**

Спектральная зависимость для прозрачности глазных сред от длины волны лазерного излучения

**Рис. П.2**

Спектральная зависимость для поглощения тканей глазного дна с учетом пропускания глазных сред

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....3

ЧАСТЬ I

ЛАЗЕРЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Введение к части I.....5

Глава 1

Измерение расстояний.....7

1.1. Лазерная дальнометрия7

1.2. Триангуляционный метод10

1.3. Времяпролетный импульсный метод.....12

1.3.1. Различные типы импульсных лазерных дальномеров18

1.4. Метод фазового сдвига.....21

1.4.1. Бытовые фазовые дальномеры.....23

1.5. Метод модуляции частоты24

1.4. Интерферометрические методы измерения расстояний.....27

Глава 2

Получение объёмных изображений.....31

2.1. 3D-сканеры на основе «структурированного света»31

2.2. Лазерные сканеры с механической разверткой33

2.3. Сканирующий лидар для получения информации в режиме реального времени.....	34
2.3.1. Лазерное сканирование в геодезии и картографии	35
2.3.2. Батиметрия – зондирование дна водоемов	39
2.4. Флэш-лидары.....	43

Глава 3

Оптические методы измерения скорости	47
3.1. Расчёт скорости по измерению расстояния до объекта	47
3.2. Доплеровские методы измерения скорости	48
3.2.1. Доплеровские лидары	48
3.2.2. Лазерная доплеровская анемометрия	49
3.3. Метод цифровой трассерной визуализации	50
3.4. Оптические гироскопы	52
3.4.1. Сравнение гироскопов различных типов	52
3.4.2. Принцип действия оптических гироскопов.....	54
3.4.3. Основные характеристики гироскопов.....	55
3.4.4. Кольцевой лазерный гироскоп	56
3.4.5. Волоконно-оптический гироскоп	59

Глава 4

Метрология времени, частоты и длины.....	65
4.1. Оптический эталон длины.....	65
4.2. Оптические методы измерения времени.....	66
4.3. Единый эталон единиц времени-частоты-длины.....	68

ЧАСТЬ II

ЛАЗЕРЫ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Введение к части II	72
----------------------------------	-----------

Глава 5

Оптические каналы связи.....	73
5.1. Передача данных в оптическом диапазоне	73
5.1.1. Проблемы электроники при передаче сигнала на большие расстояния	73
5.2. Линии связи с открытой оптикой.....	75
5.2.1. Наземные (атмосферные) оптические каналы связи.....	76
5.2.2. Космическая лазерная связь	79
5.2.3. Подводная оптическая связь.....	80
5.3. Волоконно-оптические системы связи.....	83
5.3.1. Принцип работы оптического волокна.....	84

5.3.2. Дисперсия и затухание, типы оптически волокон.....	87
5.3.3. Волоконные усилители.....	92
5.3.4. Перспективы развития.....	97

Глава 6

Хранение и обработка информации.....	101
6.1. Запись и хранение данных.....	101
6.1.1. Лазерные диски.....	102
6.1.2. Голограммы.....	106
6.2. Оптическая обработка информации.....	108

ЧАСТЬ III

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Введение к части III.....	124
----------------------------------	------------

Глава 7

Поверхностная лазерная обработка.....	125
7.1. Основные методы лазерной поверхностной обработки.....	125
7.1.1. Операции, применяемые в лазерной поверхностной обработке.....	127
7.1.2. Установки для лазерной поверхностной обработки.....	129
7.2. Лазерная маркировка и гравировка.....	130
7.2.1. Принцип работы.....	131
7.2.2. Способы лазерной маркировки и гравировки.....	131
7.2.3. Лазеры для маркировки и гравировки.....	132
7.3. Лазерная микрообработка.....	133
7.3.1. Операции, применяемые в лазерной микрообработке.....	134
7.3.2. Лазеры для микрообработки.....	136
7.3.3. Методы лазерной микрообработки.....	136
7.4. Лазерная фотолитография.....	139
7.4.1. Основные принципы действия.....	139
7.4.2. Лазеры для фотолитографии.....	143
7.5. Лазерная очистка поверхности.....	144
7.5.1. Основной принцип.....	145
7.5.2. Основные механизмы лазерной очистки.....	149
7.5.3. Оборудование для лазерной очистки.....	150

Глава 8

Глубокая лазерная обработка.....	155
8.1. Основы лазерной глубокой обработки.....	155
8.2. Лазерная резка.....	156
8.2.1. Основной принцип.....	156

8.2.2 Способы лазерной резки	157
8.2.3. Устройство станков для лазерной резки.....	159
8.3. Лазерная сварка	161
8.3.1. Лазеры, используемые для сварки.....	163
8.3.2. Преимущества лазерной сварки	164
8.4. Лазерное сверление.....	164
8.4.1. Основные принципы	165
8.4.2. Способы лазерного сверления	165
8.4.3. Лазеры, используемые для сверления	167
8.4.4. Преимущества лазерного сверления.....	168

Глава 9

Лазерные аддитивные технологии	171
9.1. Основные принципы и виды аддитивных технологий	171
9.2. Спекание пластиковых материалов.....	175
9.3. Спекание металлических материалов	177
9.4. Аддитивные технологии в авиа- и ракетостроении	180
9.5. Преимущества аддитивных технологий.....	185

ЧАСТЬ IV

ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Введение к части IV	188
----------------------------------	------------

Глава 10

Принципы лазерного зондирования	189
10.1. Методы дистанционного лазерного зондирования	189
10.2. Схемы лидаров	192
10.3. Лидарное уравнение	197
10.4. Решение лидарного уравнения	200
10.4.1. Метод логарифмической производной.....	201
10.4.2. Метод Клетта.....	201

Глава 11

Зондирование атмосферных аэрозолей.....	205
--	------------

Глава 12

Контроль химического состава атмосферы	217
---	------------

Глава 13

Измерение метеорологических параметров атмосферы.....	231
--	------------

13.1. Лидары для диагностики ветровых полей.....	232
13.1.1. Принцип измерения скорости ветра	232
13.1.2. Методы лидарного измерения скорости ветра	233
13.2. Когерентные доплеровские лидары	235
13.2.1. Лидар Windcube	236
13.2.2. Лидар ZephIR	237
13.2.3. Лидар Galion.....	241
13.2.4. Лидар WindTracer.....	241
13.3. Российские когерентные доплеровские лидары	244
13.4. Доплеровские лидары с прямым детектированием	251
13.5. Лидар для контроля облачности и динамики приземного слоя.....	259

ЧАСТЬ V

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

Введение к части V.....	272
--------------------------------	------------

Глава 14

Воздействие света на биоткани.....	273
14.1. Физические процессы.....	273
14.2. Виды воздействия света на биологические ткани.....	276
14.3. Эффекты воздействия лазерного излучения на биоструктуры.....	279
14.3.1. Фотохимические эффекты	281
14.3.2. Фототермические эффекты	281
14.3.3. Фотомеханические эффекты.....	283

Глава 15

Лазерная медицинская диагностика.....	286
15.1. Диагностика <i>in vivo</i> и <i>in vitro</i>	286
15.2. Преимущества лазерной диагностики.....	287
15.3. Методы оптической диагностики <i>in vivo</i>	288
15.3.1. Визуализация в оптическом диапазоне.....	288
15.3.2. Оптическая когерентная томография	291
15.3.3. Конфокальная визуализация.....	294
15.3.4. Флуоресцентная спектроскопия и визуализация.....	296
15.3.5. Рамановская спектроскопия.....	298

Глава 16

Лазерные лечебные технологии	302
16.1. Физиотерапия низкоинтенсивным лазерным излучением.....	302
16.2. Фотодинамическая терапия.....	304
16.2.1. Основные факторы, влияющие на ФДТ.....	304

16.2.2. Применение ФДТ	305
16.2.3. Инструменты и приборы для фотодинамической терапии	307
16.3. Общая и сосудистая хирургия	308
16.3.1. Хирургия ЖКТ, остановка кровотечений	308
16.3.2. Лазерное лечение онкологических заболеваний	309
16.3.3. Эндовазальная лазерная коагуляция (ЭВЛК)	310
16.3.4. Лазерная ангиопластика	311
16.4. Дерматология	313
16.4.1. «Винное» пятно	314
16.4.2. Пигментные пятна и татуировки	315
16.4.3. Лазерная эпиляция	316
16.4.4. Лазеры для дерматологии	317
16.5. Офтальмология	318
16.5.1. Рефракционная хирургия	319
16.5.2. Лечение глаукомы	321
16.5.3. Хирургия катаракты	322
16.5.4. Лечение отслоения сетчатки (ретинопексия)	324
16.5.5. Лечение пролиферативной диабетической ретинопатии	324
16.6. Лазерная стоматология	326
16.6.1. Лечение кариеса	326
16.6.2. Лазеры для стоматологии	327

ЧАСТЬ VI

ВОЕННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

Введение к части VI	334
----------------------------------	------------

Глава 17

Оценки воздействия лазерного излучения	335
17.1. Воздействие на элементы ракетно-космических систем	335
17.2. Воздействие на элементы конструкций БПЛА	338
17.3. Воздействие на мины и боеприпасы	340
17.4. Воздействие на органы зрения	341
17.5. Точность прицеливания	343
17.6. Учет расходимости лазерного излучения в атмосфере	344

Глава 18

Лазерные системы поражения	351
18.1. «Стратегические» лазерные системы	352
18.2. Разработка и испытания лазерных систем	352
18.3. «Тактические» лазерные системы	359
18.4. Вспомогательные лазерные системы направленного действия	365

18.5. Нелетальное лазерное оружие	366
---	-----

Глава 19

Конструктивные схемы лазерных систем	370
---	------------

19.1. Мобильные лазерные комплексы	370
--	-----

19.2. Системы формирования и наведения луча	375
---	-----

19.3. Системы слежения и управления лазерным лучом	378
--	-----

Глава 20

Лазерные инструменты	383
-----------------------------------	------------

20.1. Способы высокоточного наведения снаряда на цель	383
---	-----

20.2. Целеуказатели для стрелкового оружия	384
--	-----

20.3. Высокоточное наведение ударных боеприпасов	385
--	-----

20.4. Целеуказатели для наземных систем высокоточного оружия	392
--	-----

20.5. Авиационные оптико-электронные системы (ОЭС)	394
--	-----

20.6. Бесконтактные лазерные датчики	397
--	-----

20.7. Средства электрооптического противодействия (СЭОП)	401
--	-----

20.7.1. Приборы для обнаружения оптических и электрооптических устройств	401
---	-----

20.7.2. Виды систем электрооптического противодействия	403
--	-----

Глава 21

Лидары (лазерные радары)	407
---------------------------------------	------------

21.1. Трехмерная лазерная локация с использованием матричных приемников	407
--	-----

21.2. Компенсация помехи обратного рассеяния	409
--	-----

21.3. Лазерное сканирование	412
-----------------------------------	-----

21.4. Лидарные системы наведения (ЛСН)	417
--	-----

21.5. Лидарные комплексы дистанционного зондирования атмосферы	418
--	-----

21.6. Лазерное обнаружение подводных объектов	423
---	-----

ЧАСТЬ VII

ПЕРСПЕКТИВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ

Введение к части VII	432
-----------------------------------	------------

Глава 22

Лазеры и развитие научных исследований	433
---	------------

22.1. Спектральные и временные диапазоны микропроцессов	433
---	-----

22.2. Фемтосекундные лазерные импульсы	435
--	-----

22.2.1. Фемтохимия	435
--------------------------	-----

22.2.2. Фемтобиология	438
-----------------------------	-----

22.3. Аттофизика	442
22.4. Лазерное охлаждение атомов	445

Глава 23

Лазеры и развитие технологий	450
23.1. Лазеры в космосе	450
23.1.1. Борьба с космическим мусором и астероидной опасностью	452
23.1.2. Энергоснабжение космических аппаратов	457
23.2. Лазеры в энергетике	461
23.2.1. Лазерный термоядерный синтез	462
23.2.2. Лазеры в солнечной энергетике	468
23.3. Лазеры в нанотехнологиях	472
23.4. Комплексирование лазерных технологий	477
23.4.1. Комплексирование радио- и лазерных систем	477
23.4.2. Метеорология	478
23.4.3. Автомобили нового поколения	481
23.4.4. Квантовые радары	483
23.4.5. Обработка материалов	484
Послесловие	490

Приложение

Лазерная безопасность	491
П.1 Повреждения, вызванные лазерным излучением	491
П.2 Определение класса опасности лазера	492
П.3 Требования к изготовлению лазерных изделий	499
П.4 Знаки и надписи	501
П.5 Средства индивидуальной защиты	503
П.6 Пример определения ПДУ	504
П.7 Перечень государственных стандартов и других нормативных документов	506
П.8 Некоторые характеристики лазерной безопасности	509

*Анатолий Сергеевич БОРЕЙШО,
Владимир Анатольевич БОРЕЙШО,
Иван Михайлович ЕВДОКИМОВ,
Станислав Витальевич ИВАКИН,
Максим Юрьевич ИЛЬИН,
Алексей Андреевич КИМ,
Игорь Алексеевич КИСЕЛЕВ,
Денис Владимирович КЛОЧКОВ,
Максим Анатольевич КОНЯЕВ,
Леонид Борисович КОЧИН,
Виктория Сергеевна ЛУГИНЯ,
Наталья Юрьевна МАЛЬКОВА,
Алексей Владимирович МОРОЗОВ,
Евгений Николаевич НИКУЛИН,
Сергей Юрьевич СТРАХОВ,
Александр Викторович ФЕДИН,
Алексей Викторович ЧУГРЕЕВ*

ЛАЗЕРЫ: ПРИМЕНЕНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Под редакцией А. С. Борейшо

Учебное пособие

Редакция
инженерно-технической литературы
Ответственный редактор *С. В. Макаров*
Выпускающие *Н. А. Крылова, Е. П. Королькова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, 1, лит. А.
Тел.: (812) 412-92-72, 336-25-09.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 05.07.16.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 70×100^{1/16}.
Печать офсетная. Усл. п. л. 42,25. Тираж 200 экз.

Заказ № 184-16.
Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
в ПАО «Т8 Издательские технологии»
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.

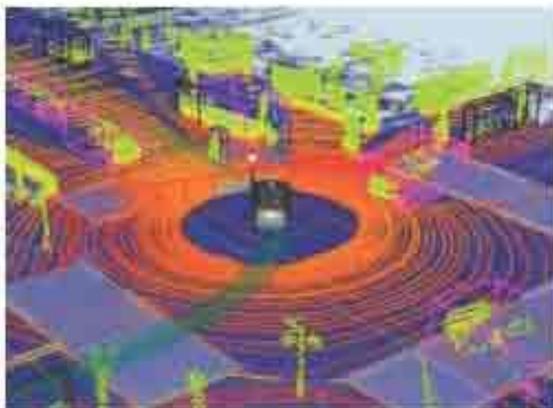


Рис. 1

3D-облако точек, полученное с помощью лазерного сканера



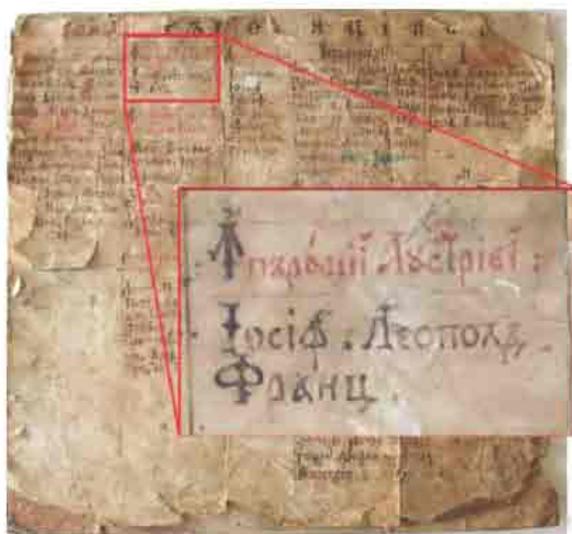
Рис. 2

Кольцевые лазерные гироскопы
различной конструкции

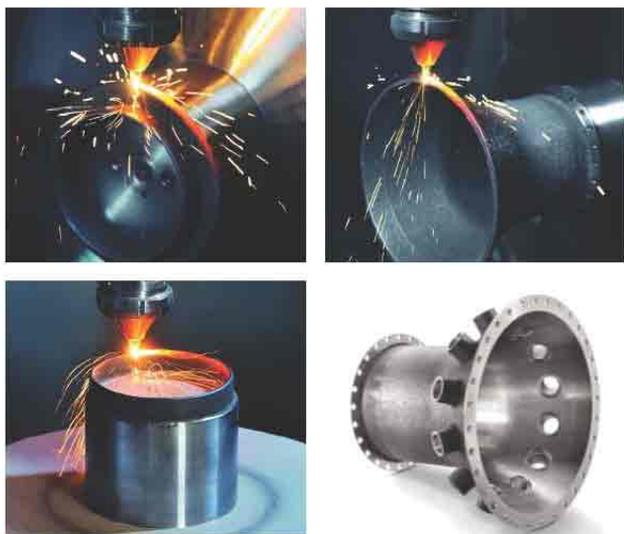




Ил. 3
Лазерная очистка скульптуры
«Зефир, качающийся на ветке»



Ил. 4
Лазерная чистка пергамента



Ил. 5

Создание детали с помощью аддитивной технологии



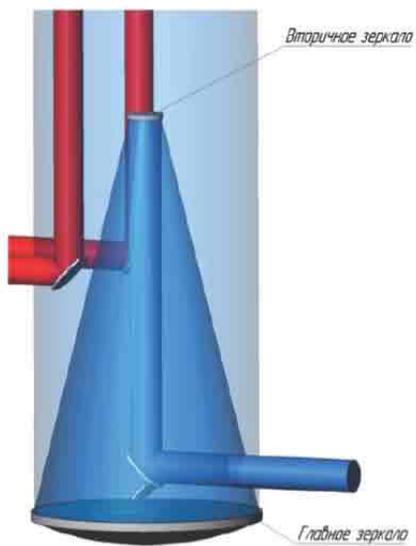
Ил. 6, а

Однозеркальный сканер

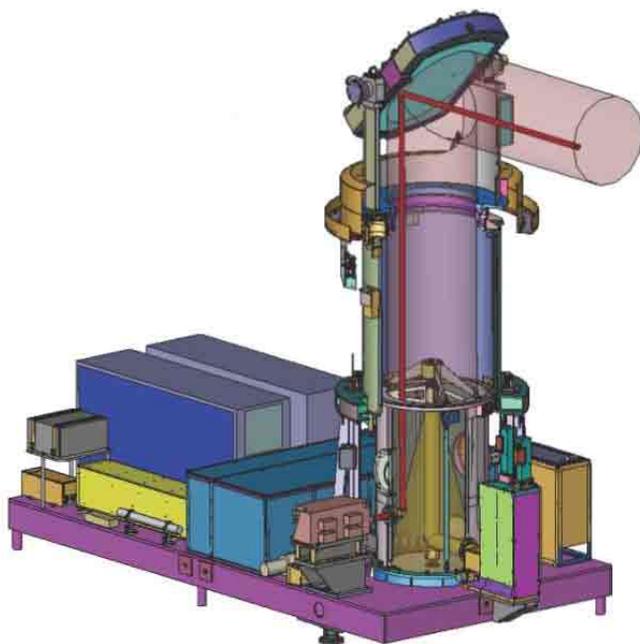


Ил. 6, б

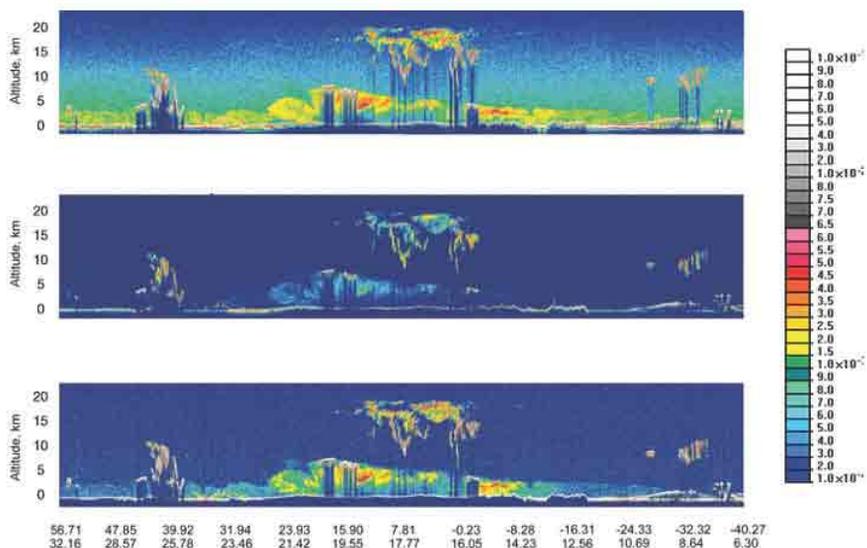
Двухзеркальный сканер



Ил. 7, а
Схема вывода и приёма излучения
через единый телескоп



Ил. 7, б
Общий вид оптической системы мобильного лидарного комплекса



Ил. 8
Изображение лидарных сигналов,
полученных космическим ветровым лидаром CALIPSO

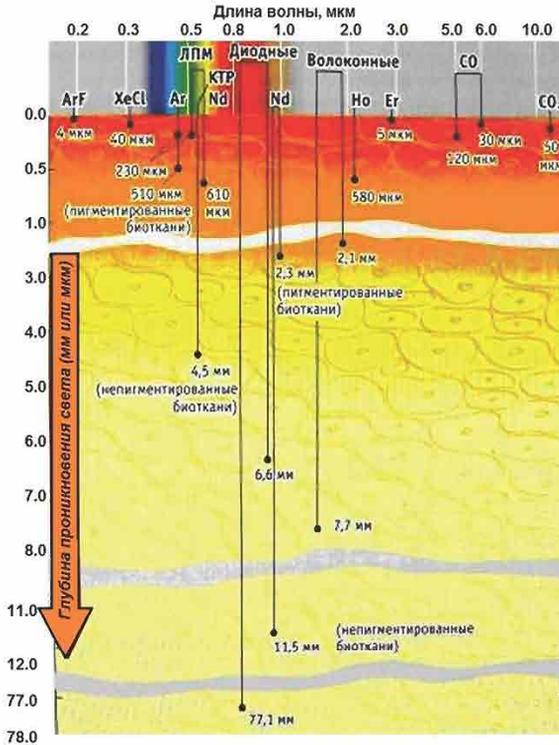


Ил. 9
Ветровые лидары ЛЛВ-300 (слева) и ЛЛВ-2000 (справа),
НПП «Лазерные системы», С.-Петербург



Ил. 10

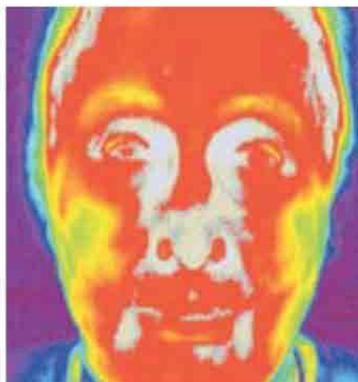
Распределение лазерных средств диагностики приземного слоя атмосферы в Европе



Ил. 11
Проникновение лазерного излучения в биоткани



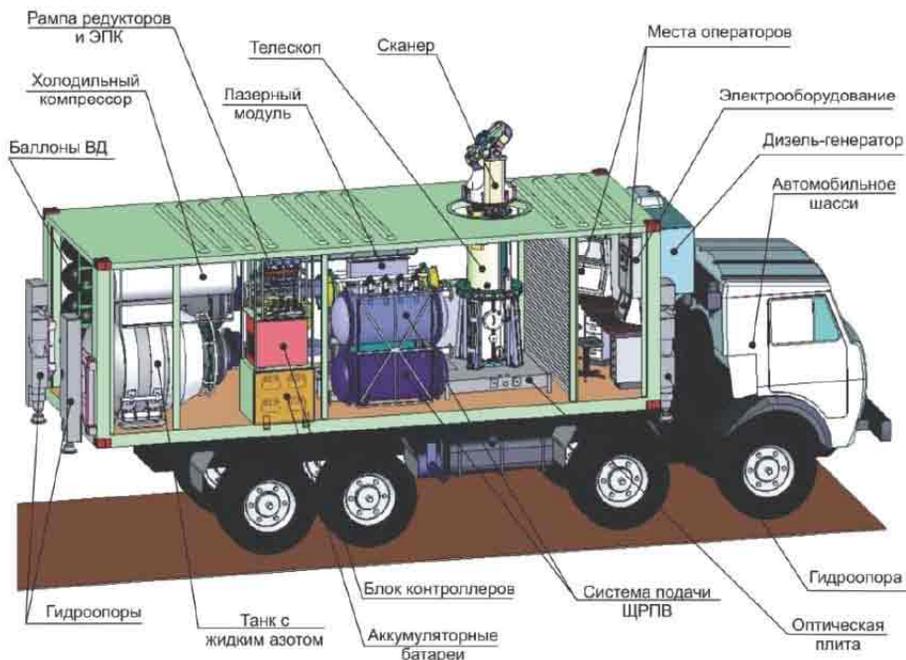
Портрет здорового человека



Портрет человека с повышенной температурой (из-за острого респираторного заболевания)

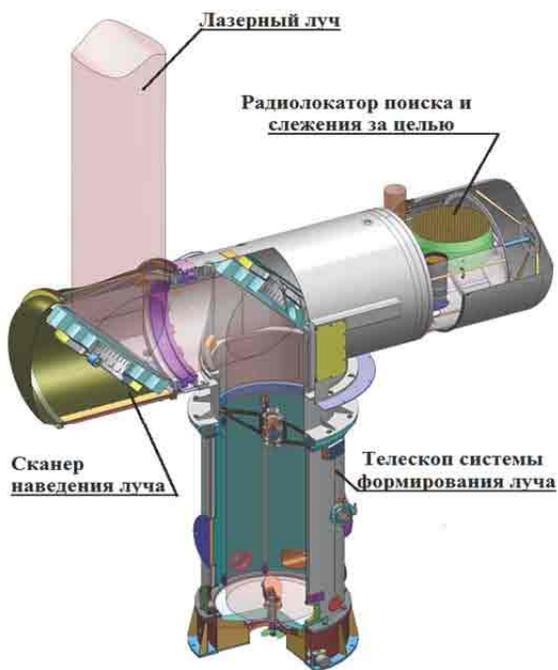
Ил. 12

Инфракрасные-портреты с условной раскраской областей, соответствующих разным температурам)



Ил. 13

Непрерывный химический кислородно-йодный лазер мощностью 25 кВт (предоставлено НИИ «Лазерные системы»)



Ил. 14
Компоновка РЛС
на оптическом сканере
лазерного комплекса
(предоставлено
НПП «Лазерные системы»)



Ил. 15
Мобильный лидарный комплекс «Смуглянка 1Л»:
внешний вид комплекса и пульт управления
(предоставлено НПП Лазерные системы):