

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Ռ. ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ, Լ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

ԼՈՒՅՍԻ ԲԵՎԵՌԱՑՈՒՄԸ
ԵՎ ՆՐԱ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

ԵՐԵՎԱՆ
ԵՊՀ ՀՐԱՏԱՐԱԿԶՈՒԹՅՈՒՆ
2014

ՀՏԴ 535 (07)
ԳՄԴ 22.343 ց7
Ա 280

*Հրատարակության է երաշխավորել
ԵՊՀ ֆիզիկայի ֆակուլտետի
գիտական խորհուրդը*

Ա 280 Ռ. Ալավերդյան, Լ. Ասլանյան
Լույսի բևեռացումը և նրա հետազոտումը: Եր., ԵՊՀ հրատ., 2014 -
68 էջ:

«Լույսի բևեռացումը և նրա հետազոտումը» ուսումնական ձեռնարկի նպատակն է օգնել ֆիզիկայի ֆակուլտետի ուսանողներին համակողմանիորեն ըմբռնելու լույսի բևեռացման նկարագրության և փորձարարական ուսումնասիրության առանձնահատկությունների հետ կապված մի շարք նրբություններ:

Այն կարող է օգտակար լինել նաև հարակից ֆակուլտետների փորձարարներին, օպտիկայի բնագավառի ճարտարագետներին, ինչպես նաև նրանց համար, որոնց հետաքրքրում են բևեռացված լույսի գործնական կիրառությունները գիտության մեջ ու տեխնիկայում:

ՀՏԴ 535 (07)
ԳՄԴ 22.343 ց7

ISBN 978-5-8084-1878-3

© ԵՊՀ հրատարակչություն, 2014
© Ռ. Ալավերդյան, Լ. Ասլանյան, 2014

Ներածություն

Լուսային ալիքների լայնականությունը թույլ է տալիս ներմուծելու լույսի մի նոր բնութագիր՝ բևեռացում: Այն չափազանց կարևոր է, քանի որ լույսի ինտերֆերենցի և միջավայրի հետ փոխազդեցության առանձնահատկությունները շատ դեպքերում կախված են լուսային ալիքի էլեկտրական դաշտի լարվածության՝ $\vec{E}$ վեկտորի, այսինքն՝ լույսի բևեռացման վարքից: Հետևաբար, նման երևույթների նկարագրման ժամանակ անհրաժեշտ է հաշվի առնել լայնական լուսային ալիքների վեկտորական լինելու հանգամանքը:

Չափազանց բազմազան են բևեռացված լույսի կիրառության տիրույթները: Լույսի բևեռացվածության հիման վրա կատարվող հետազոտությունների համար բնութագրական է չափումների ճշտությունը, ինչը հնարավոր չէ իրականացնել այլ մեթոդներով:

Այսօր գոյություն ունեն բազմաթիվ սարքեր, որոնցում օգտագործվում են բևեռացված լույսի հատկությունները՝ հեղուկ բյուրեղական թվատախտակներ և արտապատկերման սարքեր, լուսազտիչներ, օպտիկական փականներ և այլն:

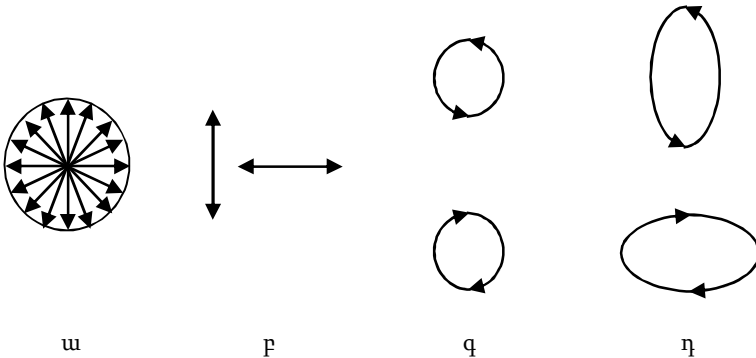
Նշենք նաև, որ լույսի բևեռացման վիճակների քննարկումը հնարավորություն է ընձեռում քվանտամեխանիկական դատողությունները շրջանցող ճանապարհով ներմուծել ֆոտոնի սպինի հասկացությունը:

Սույն գրքույկի նպատակն է օգնել ֆիզիկայի ուղղությամբ մասնագիտացող ուսանողներին խորը և համակողմանիորեն ըմբռնելու լույսի բևեռացման հետ կապված մի շարք նրբություններ: Այն կօգնի հասկանալու, թե ինչպես կարելի է ստանալ և միմյանցից զանազանել բևեռացված լույսի տարբեր տեսակները: Գրքույկը կարող է հատկապես օգտակար լինել ֆիզիկոս փորձարարների, օպտիկայի բնագավառի ճարտարագետների, ինչպես նաև նրանց համար, ում հետաքրքրում են բևեռացված լույսի գործնական կիրառությունները գիտության մեջ և տեխնիկայում:

1. Բնական և բնեռացված լույս

Հայտնի է, որ լուսային ալիքները լայնական են, այսինքն՝ լուսային ալիքում էլեկտրական դաշտի լարվածության $\vec{E}$ և մագնիսական դաշտի լարվածության $\vec{H}$ (կամ մագնիսական ինդուկցիայի $\vec{B}$) վեկտորները փոխադասաց են և գտնվում են ալիքի տարածման ուղղությանն ուղղահայաց հարթության մեջ: Տարածության ցանկացած կետում $\vec{S}$ ճառագայթին (էներգիայի հոսքի կամ Պոյնտինգի վեկտորին) ուղղահայաց հարթության մեջ $\vec{E}$ և $\vec{H}$ վեկտորների զույգի կողմնորոշումը, ընդհանուր առմամբ, ժամանակից կախված փոխվում է: Այդ փոփոխության բնույթից կախված՝ լույսը տարբերակում են բնականի (կամ չբնեռացվածի) և բնեռացվածի:

Լույսի սովորական աղբյուրները բաղկացած են հսկայական թվով արագ ճառագայթող տարրական աղբյուրներից (ատոմներից կամ մոլեկուլներից), որոնք լույս են առաքում միմյանցից անկախ՝ $\vec{E}$ և $\vec{H}$ վեկտորների տարբեր կողմնորոշումներով և փուլերով: Այդ պատճառով արդյունաբար ալիքում $\vec{E}$ և $\vec{H}$ վեկտորների կողմնորոշումը



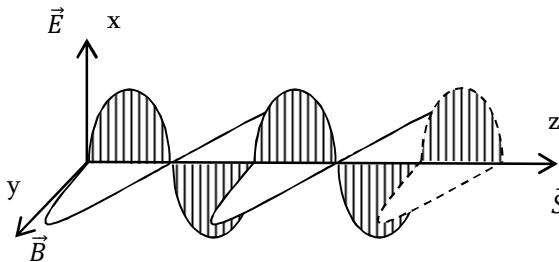
Նկ. 1. Լուսային ալիքում էլեկտրական դաշտի վեկտորի ծայրակետի հետագիծը տարբեր բնեռացումների դեպքում:

ա – չբնեռացված լույս, բ – գծային բնեռացում, գ – շրջանային բնեռացում, դ – էլիպսական բնեռացում:

Ժամանակից կախված փոխվում է քառասյնորեն, այնպես, որ $\vec{S}$ ճառագայթին ուղղահայաց հարթության մեջ բոլոր ուղղությունները միջինում հավասարահավանական են: Այդպիսի լույսն անվանում են *բնական* (կամ *չբևեռացված*) (նկ. 1ա):

Հատուկ հարմարանքների օգնությամբ, որոնց ընդունված է անվանել *բևեռիչներ* (որանց մասին կխոսվի ստորև), բնական լույսը կարելի է դարձնել *գծային* (կամ *հարթ*) *բևեռացված* (նկ. 1բ): Գծային բևեռացված լուսային ալիքում $\vec{E}$ և $\vec{H}$ վեկտորների գույգը ժամանակի ընթացքում չի փոխում իր կողմնորոշումը: Այդ դեպքում $\vec{E}$, $\vec{S}$ հարթությունը կոչվում է *տատանումների հարթություն* (նկ. 2):

Երկու միջավայրերի բաժանման սահմանին ընկնող լույսի բևեռացման վարքի հետազոտման ժամանակ հարմար է լինում բևեռացված լույսը ներկայացնել որպես երկու բաղադրիչների վեկտորական գումար.

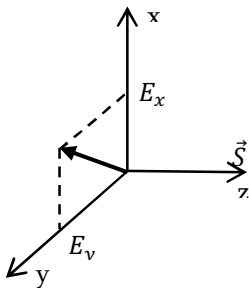


Նկ. 2. $\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{S}$ – վեկտորների փոխդասավորությունը

1. լույսի, որի էլեկտրական վեկտորը զուգահեռ է անկման հարթությանը (*p* կամ *TE*–*բևեռացված լույս*)
2. լույսի, որի էլեկտրական վեկտորն ուղղահայաց է անկման հարթությանը (*s* կամ *TM*–*բևեռացված լույս*):

Հետագայում, խոսելով լուսային տատանումների ուղղության մասին, միշտ նկատի ենք ունենալու էլեկտրական դաշտի լարվածության (*լուսային*՝ $\vec{E}$) վեկտորը:

Լույսի բևեռացման առավել ընդհանուր տեսակ է հանդիսանում էլիպսական բևեռացումը: *Էլիպսական բևեռացմամբ* լուսային ալիքում $\vec{E}$ վեկտորի ծայրը ժամանակի ընթացքում տարածության տվյալ կետում գծում է էլիպս (նկ. 1դ): Գծային բևեռացված լույսը կարելի է դիտարկել որպես էլիպսական բևեռացվածի մասնավոր



Նկ. 3. $\vec{E}$ վեկտորի ներկայացումը $E_{x,y}$ - պրոյեկցիաների միջոցով

դեպք, երբ էլիպսը վեր է անվում ուղղի հատվածի (այսինքն՝ նրա կիսաառանցքներից մեկը ձգտում է զրոյի): Էլիպսական բևեռացման մեկ այլ մասնավոր դեպք է *շրջանային բևեռացումը*, երբ բևեռացման էլիպսը փոխարկվում է շրջանագծի (նկ. 1գ):

Տարբեր բևեռացումների տեսական նկարագրման ժամանակ

հաճախ հարմար է լինում $\vec{E}$ վեկտորը ներկայացնել երկու փոխուղղահայաց ուղղություններով պրոյեկցիաների տեսքով (նկ. 3): Այն դեպքում, երբ արդյունաբար ալիքը բևեռացված է, E_x -ը և E_y -ը կոհերենտ են և կարող են ներկայացվել հետևյալ տեսքով՝

$$E_x = E_{x0} \cos(kz - \omega t), \quad (1a)$$

$$E_y = E_{y0} \cos(kz - \omega t - \varphi), \quad (1բ)$$

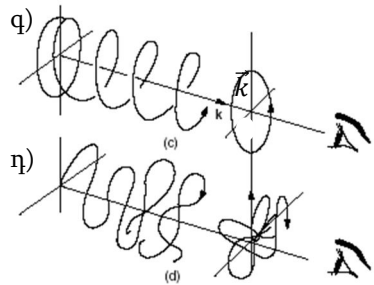
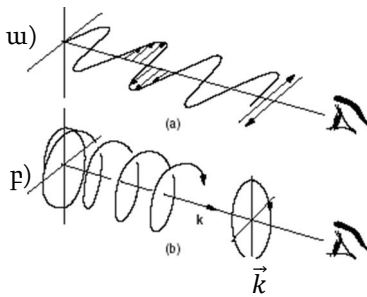
որտեղ E_{x0} , E_{y0} լայնույթները, k ալիքային թիվը, ω հաճախությունը և փուլերի φ շեղումը կախված չեն ժամանակից: (1ա) և (1բ) արտահայտությունները նկարագրում են միագույն (մոնոքրոմատիկ) լույսը: Ոչ միագույն լույսը կարելի է ներկայացնել տարբեր ω հաճախություններով (1ա, բ) տեսքի արտահայտությունների գումարով:

Արտաքսելով (1ա) և (1բ) հավասարումներից փուլի $\omega t - kz$ փոփոխական մասը՝ կստանանք սևեռված XOY հարթության մեջ $\vec{E}$ վեկտորի ծայրակետի շարժումը նկարագրող հավասարումը՝

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos \varphi = \sin^2 \varphi: \quad (2)$$

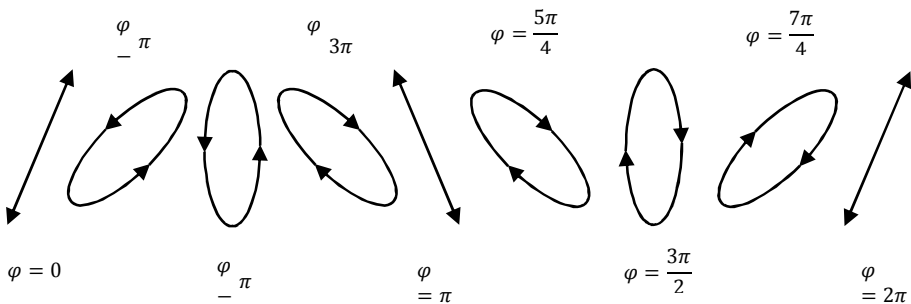
Ընդհանուր դեպքում (2) հավասարմամբ տրվող հետագիծն իրենից ներկայացնում է էլիպս: Բևեռացման էլիպսի կողմնորոշումը և էլիպսականությունը որոշվում է E_{y0}/E_{x0} լայնությունների հարաբերությամբ և փուլերի φ տարբերությամբ: Մասնավորապես, երբ $\varphi = 0, \pm\pi$ էլիպսը վեր է ածվում ուղղի հատվածի՝ գծային բևեռացում: Հենց այդպիսի ալիք է պատկերված նկ. 2-ում: $\varphi = \pm\pi/2$ դեպքում էլիպսի գլխավոր առանցքները համընկնում են կոորդինատական համակարգի x և y առանցքների հետ: Եթե այդ դեպքում նաև լայնությունների $E_{y0}/E_{x0} = 1$, ապա բևեռացման էլիպսը վեր է ածվում շրջանագծի: Եթե $0 < \varphi < \pi$, $z = z_0$ հարթության մեջ (1ա) և (1բ) հավասարումներով նկարագրվող ալիքի $\vec{E}$ վեկտորը ժամանակի ընթացքում պտտվում է ժամսլաքին հակառակ ուղղությամբ (լուսային ալիքի տարածման հանդիպակաց ուղղությամբ դիտելիս): Այդ դեպքում լույսն անվանում են *ձախ էլիպսական բևեռացված*: Եթե $\pi < \varphi < 2\pi$, $\vec{E}$ վեկտորի պտույտը ժամսլաքի ուղղությամբ է, և ալիքն ունի *աջ էլիպսական բևեռացում*:

Ժամանակի ցանկացած $t = t_0$ սևեռված պահի $\vec{E}$ վեկտորի ծայրակետերը տարբեր z -երի համար գտնվում են պտուտակաձև գծի վրա: Ընդ որում ձախ, էլիպսական բևեռացման համար ձևավորվում է ձախ պտուտակ, աջի համար՝ աջ պտուտակ (տե՛ս նկ.4):



Նկ. 4. Լույսի բևեռացված վիճակների տարածական պատկերումը:
 ա) գծային բևեռացված լույս, բ) ձախ շրջանային բևեռացված լույս,
 գ) աջ շրջանային բևեռացված լույս, զ) բնական կամ չբևեռացված լույս

Փոքր ինչ պարզաբանենք վերջինս՝ հաշվի առնելով գիտական և ուսումնական գրականության մեջ երբեմն հանդիպող և հաճախ շփոթեցնող անհստակությունը: Աջ շրջանային բևեռացված լույսը պատկերվում է շրջանագծով, որի վրա որպես էլեկտրական դաշտի լարվածության վեկտորի շրջապտույտի ուղղություն նշվում է ժամսլաքի պտտման ուղղությունը, չնայած, իրականում տարածության մեջ ժամանակի ցանկացած սևեռված պահի էլեկտրական վեկտորի շրջապտույտի ուղղությունը համապատասխանում է ժամսլաքի հակառակ ուղղությանը (ճառագայթին ընդառաջ դիտելիս): Իրականում դա չի հակասում աջ պտուտակի կանոնին: Իրոք, եթե աջ պտուտակը համընթաց շարժվելով դեպի դիտորդը հատի շարժմանն ուղղահայաց ինչ որ հարթություն, ապա պտուտակագծի հարթության հետ հատման կետը կգծի շրջանագիծ՝ պտտվելով ժամսլաքի ուղղությամբ: Դժվար չէ նկատել, որ աջ կամ ձախ բևեռացումների մասին խոսելիս ավելի հստակ կլինենք, եթե նկատի ունենանք լուսային ալիքի տարածման ընթացքում էլեկտրական վեկտորի, համապատասխանաբար, աջ և ձախ պտուտակի կանոնին ենթարկվելը:



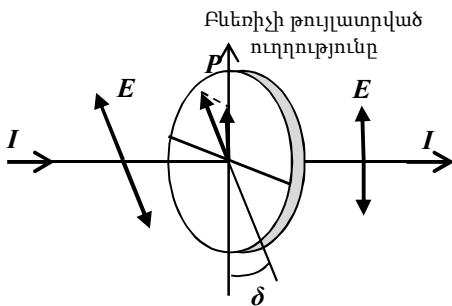
Նկ. 5. Փուլերի որոշակի φ տարբերությանը համապատասխանող բևեռացման տարբեր վիճակները

Այսպիսով, թե՛ գծային, թե՛ շրջանային բևեռացված լույսերը կարելի է դիտարկել որպես էլիպսական բևեռացմամբ լույսի մասնավոր դեպքեր (նկ. 5): Լույսը կլինի շրջանային բևեռացված, եթե նրա բաղադրիչների միջև փուլերի φ հարաբերական տարբերությունը լինի $\pi/2$ կամ $3\pi/2$, իսկ $E_{y0}/E_{x0} = 1$:

Զբևեռացված լույսը նույնպես կարելի է վերլուծել երկու փոխուղղահայաց բաղադրիչների: Սակայն, այդ դեպքում, նրանց միջև փուլերի φ տարբերությունը փոփոխվում է արագ և խիստ անկանոն, այնպես, որ E_x -ը և E_y -ը կոհերենտ չեն:

2. Գծային բևեռացված լույսի ստացումը

Գծային բևեռացված լույս ստանալու համար օգտագործում են հատուկ օպտիկական սարքեր՝ *բևեռիչներ*: Բևեռիչով անցած լուսային ալիքում էլեկտրական դաշտի լարվածության վեկտորի տատնումների ուղղությունը խիստ որոշակի է և կոչվում է բևեռիչի *թույլ-լատրված ուղղություն* (նկ. 6):



Նկ. 6. Բևեռիչի աշխատանքի սկզբունքը պարզաբանող գծապատկերը

Ցանկացած բևեռիչ կարող է օգտագործվել նաև բևեռացված լույսի հետազոտման նպատակով՝ մասնավորապես, գծային բևեռացված լույսի էլեկտրական դաշտի լարվածության վեկտորի տատանումների ուղղությունը որոշելու համար, այսինքն՝ որպես *վերլուծիչ*: Բևեռիչով անցած գծային բևեռացված

լույսի I ինտենսիվությունը կախված է տատանումների հարթության և վերլուծիչի թույլատրելի ուղղության կազմած δ անկյունից՝

$$E = E_0 \cos \delta \text{ և } I = I_0 \cos^2 \delta, \quad (3)$$

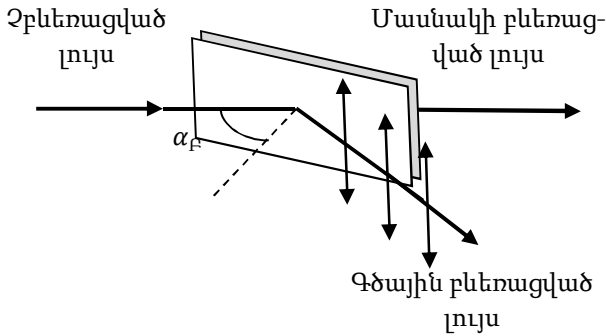
որտեղ I_0 -ն ընկնող լույսի ինտենսիվությունն է: (3) առնչությունն արտահայտում է *Մալյուսի օրենքը*:

Նկարագրենք գծային կամ հարթ բևեռացված լույսի ստացման մի քանի եղանակներ:

2.1. Լույսի անդրադարձումը դիէլեկտրական թիթեղից

Զբևեռացված լույսը, դիէլեկտրիկից անդրադառնալիս, միշտ վեր է ածվում մասնակի բևեռացվածի: Դիէլեկտրական թիթեղից օդ անդրադարձած լույսի բևեռացման աստիճանը կախված է դիէլեկտրիկի բեկման n ցուցիչից և անկման α անկյունից: Օպտիկայի ընդհանուր դասընթացից հայտնի է, որ երկու միջավայրերի բաժանման սահմանից անդրադարձած լույսը լրիվ բևեռացված է, երբ այն ընկնում է *Բրյուստերի անկյան* տակ (նկ. 7): Այն որոշվում է.

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{բ}} = n \quad (4)$$



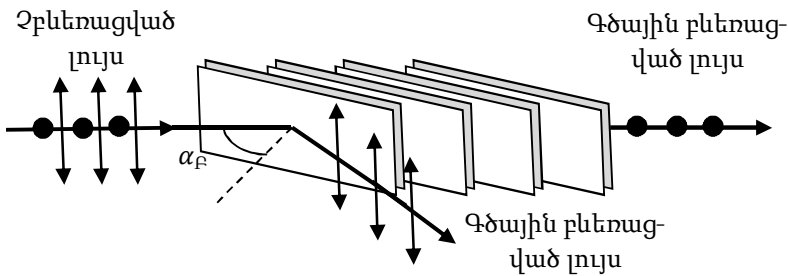
Նկ. 7. Դիֆեկտրիկից անդրադառնալիս լույսի բեռացումը պարզաբանող գծապատկեր

բանաձևով: Այդ դեպքում անդրադարձած լուսային ալիքի էլեկտրական դաշտի տատանումների հարթությունն ուղղահայաց է անկման հարթությանը (անկման հարթությունն ընկնող ճառագայթով և անկման կետում բաժանման սահմանին կանգնեցված ուղղահայացով անցնող հարթությունն է):

2.2. Լույսի բեկումն ապակե թիթեղում

Քանի որ դիֆեկտրական թիթեղից անդրադարձած լույսը մասամբ (կամ նույնիսկ լրիվ) բեռացված է, անցած լույսը նույնպես կլինի մասամբ (կամ լրիվ) բեռացված: Անցած լույսում էլեկտրական դաշտի լարվածության վեկտորի տատանումների գերադասելի ուղղությունը համընկնում է բեկման հարթության հետ: Բեռացման առավելագույն աստիճանին հասնում ենք, երբ լույսն ընկնում է Բրյուստերի անկյան տակ: Բեկված լույսի բեռացման աստիճանի մեծացման համար օգտագործում են ընկնող լույսի նկատմամբ Բրյուստերի անկյան տակ դասավորված ապակե թիթեղների համա-

կարգ (երբեմն այն անվանում են Բրյուստերի կամ Ստոլետովի տըր-
ցակ, նկ. 8):



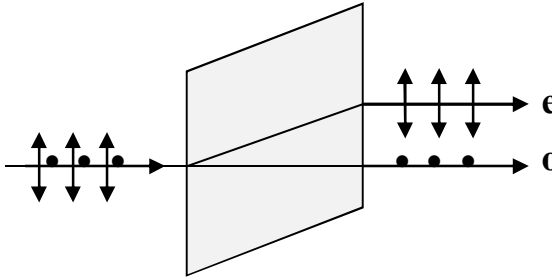
Նկ. 8. Բրյուստերի անկյան տակ դասավորված թիթեղներից
բաղկացած անդրադարձումային բևեռարդի գծապատկերը
(Բրյուստերի կամ Ստոլետովի տրցակ)

2.3. Լույսի բեկումը երկբեկող բյուրեղներում: Բյուրեղային բևեռիչներ

Իսլանդական սպաթի բյուրեղը, թերթականության հատկու-
թյան շնորհիվ, հեշտությամբ ճեղքվում է շեղանկյուն գուգահեռա-
նիստի ձևով, ընդ որում նրան սահմանափակող շեղանկյուններն
ունեն $101^\circ 52'$ և $78^\circ 08'$ անկյուններ (նկ. 9): Եթե լույսի նեղ փունջն
ընկնում է այդպիսի բյուրեղի վրա, դիտվում է այսպես կոչված երկ-
բեկման երևույթը, այսինքն, եթե ընկնող փունջը բավականաչափ
նեղ է, իսկ բյուրեղը բավականաչափ հաստ, ապա նրա միջից,
սկզբնական փնջին գուգահեռ դուրս են գալիս տարածականապես
իրարից լրիվ անջատված երկու փնջեր:

Նույնիսկ այն դեպքում, երբ սկզբնական փունջը բյուրեղի բնա-
կան նիստի վրա նորմալով է ընկնում, այսինքն՝ երբ անկման անկ-
յունը հավասար է զրոյի, բեկված ճառագայթը երկուսի է բաժանվում,
ընդ որում նրանցից մեկը ընկնող ճառագայթի շարունակությունն է,

իսկ մյուսը շեղվում է այնպես, որ բեկման անկյունը լինում է զրոյից տարբեր (նկ. 9):

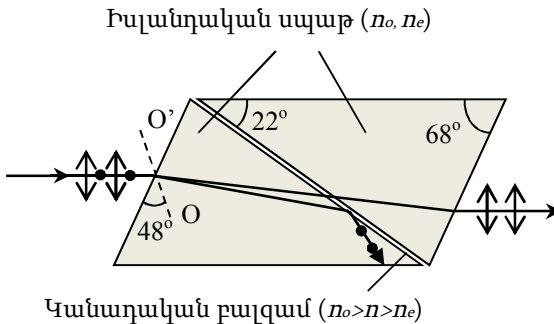


Նկ. 9. Լույսի երկբեկումը իսլանդական սպաթի բյուրեղի բնական նիստի վրա նորմալ անկման դեպքում

Ինչպես գիտենք, միջավայրի n բեկման ցուցիչը որոշվում է դիէլեկտրական ε թափանցելիությամբ: Բյուրեղների երկբեկումը պայմանավորված է տարբեր ուղղություններով մոլեկուլների բևեռացվելիության տարբերությամբ (այսինքն՝ միջավայրի օպտիկական հատկությունների անիզոտրոպությամբ):

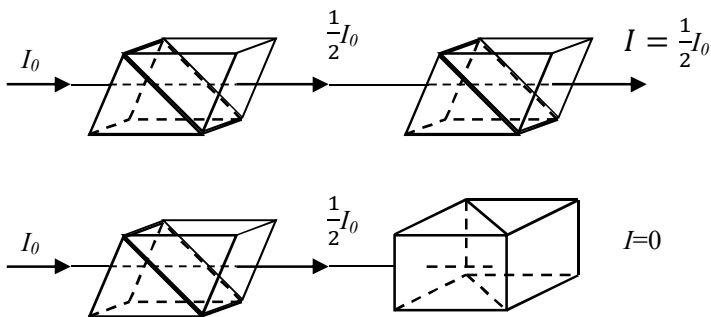
Երկբեկող բյուրեղն անվանում են *միառանցքանի*, եթե նրանում գոյություն ունի ε -ի առավելագույն արժեքով մեկ ուղղություն, իսկ դրան ուղղահայաց ուղղություններով՝ ε -ի արժեքները նույնն են: Դիէլեկտրական թափանցելիության այդ առանձնացված ուղղություններով ուղղված առանցքներն անվանում են *գլխավոր*, իսկ նրանցից մեկը, որը համապատասխանում է ε -ի առավելագույն արժեքին՝ *օպտիկական առանցք*: Գծային բևեռացված ալիքը, որի էլեկտրական դաշտի լարվածության $\vec{E}$ վեկտորն ուղղահայաց է օպտիկական առանցքին, կոչվում է *սովորական* (օ ալիք), իսկ եթե էլեկտրական դաշտի լարվածության $\vec{E}$ վեկտորը պրոյեկցիա ունի օպտիկական առանցքի վրա՝ *անսովոր* (ե ալիք): Այդ ալիքների համար բեկման ցուցիչները սովորաբար նշանակում են, համապատասխանաբար n_o և n_e :

Այդպիսի բյուրեղներում բեկվելով՝ լուսային փունջը տրոհվում է երկու փնջերի, որոնց տատանումների հարթությունները փոխադրահայաց են միմյանց: Փնջերից մեկն առանձնացնելով՝ կարելի է ստանալ հարթ բևեռացված լույս: Այդ սկզբունքով են աշխատում Նիկոլի (նկ. 10), Ռոշոնի, Վոլաստոնի, Մենարմանի բևեռացումային պրիզմաները:



Նկ. 10. Նիկոլի պրիզմայի գծապատկերը

Նիկոլի պրիզման կամ պարզապես **նիկոլը** (նկ. 10)՝ ամենահին բյուրեղային բևեռիչն է (ստեղծվել է 1828 թ.-ին): Այն բաղկացած է իսլանդական սպաթի (դա $n_o = 1,65$ և $n_e = 1,48$ բեկման ցուցիչներով CaCO_3 բացասական բյուրեղն է, $n_e - n_o < 0$) երկու պրիզմաների տեսքով բյուրեղներից, որոնք ստանձված են $n = 1,55$ բեկման ցուցիչով **կանադական բալզամով**: Պրիզմաների անկյուններն ընտրված են այնպես, որ սովորական ճառագայթը ստանձված մակերևույթից ենթարկվի լրիվ ներքին անդրադարձման և կլանվի, ըստ նկ. 10-ի, ներքին սևացված պատի կողմից, իսկ անսովորը, որը բևեռացված է գլխավոր հարթության մեջ (այն համընկնում է անկման հարթության հետ), անցնում է նիկոլով:

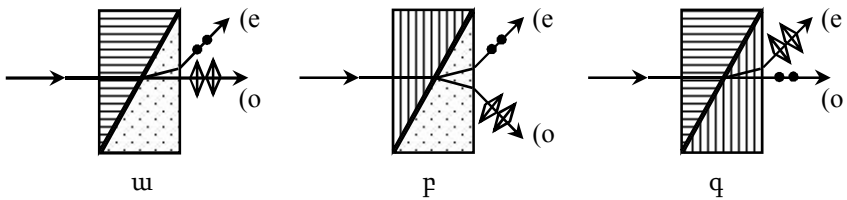


Նկ. 11. Բնական լույսի անցումը երկու նիկոլներով

Այսպիսով՝ Նիկոլի պրիզման բնական լույսը վեր է ածում գծալին բևեռացվածի, իսկ անցած լույսի ինտենսիվությունն, այդ դեպքում, ընկնողի նկատմամբ նվազում է երկու անգամ: Երկու նիկոլներից բաղկացած համակարգը, ինչպես ցանկացած երկու բևեռիչներից բաղկացած համակարգ, կարող է բացել կամ փակել լույսի ճանապարհը կախված նրանց փոխադարձ կողմնորոշումից (նկ. 11): Սա պարզագույն օպտիկական փականն է:

Ռոշոնի, Վոլաստոնի, Սենարմոնի պրիզմաները: Նկ. 12-ում բերված է բյուրեղային առանցքների տարբեր ուղղություն ունեցող սպաթի երկու կտորից կազմված պրիզմաներ: Նրանց կազմությունը և գործողության սկզբունքը հասկանալի է նկարից: Օպտիկական առանցքների կողմնորոշման տարբերությունն ազդում է ճառագայթների միջև տարամիտման անկյան վրա: Երբեմն բյուրեղային բևեռիչները պատրաստում են քվարցից, ընդ որում, իհարկե, n_o և n_e արժեքների փոքր տարբերության պատճառով o և e ճառագայթների տարամիտման անյունն ավելի փոքր արժեքներ է ունենում:

Ռոշոնի պրիզմայում (նկ. 12ա) o և e ճառագայթների միջև անկյունը կախված է պրիզմայի անկյունից:



Նկ. 12. Բալանդական սպաթից պատրաստված մի քանի բյուրեղային բևեռիչների գծապատկերները: Գծիկներով և կետերով նշված է բյուրեղների օպտիկական առանցքների ուղղությունները:

Վոլաստոնի պրիզման (նկ. 12բ) ապահովում է ճառագայթների համաչափ տարամիտումը, և o ու e ճառագայթների միջև անկյունը մոտավորապես երկու անգամ մեծ է, քան Ռոշոնի պրիզմայում:

Մենարմոնի պրիզմայի (նկ. 12գ) երկրաչափությունը թույլ է տալիս բյուրեղները տնտեսել, հատկապես այն դեպքում երբ պրիզմայի անկյունը մոտ է 45° -ին:

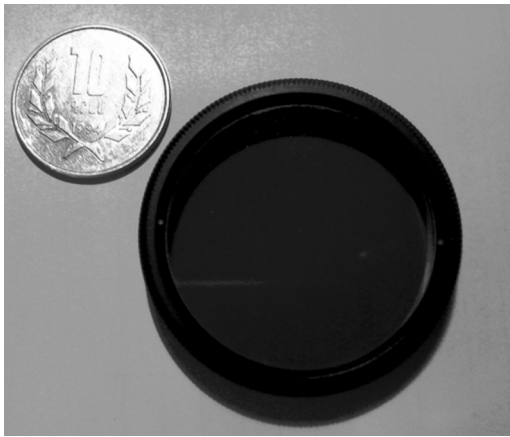
2.4. Լույսի կլանումը դիֆրոյիկ թիթեղներում: Բարակ թաղանթային բևեռիչները

Բոլորովին այլ սկզբունքի վրա են հիմնված լույսի բևեռացման այն հարմարանքները, որոնց ներկայացուցիչներից մեկը տուրմալինն է: Տուրմալինը երկբեկող բյուրեղ է, որի մեջ ճառագայթներից սովորականն ավելի ուժեղ է կլանվում, քան անսովորը: Դրա հետևանքով, փոխադրահայաց հարթություններում բևեռացված երկու ալիքները, տուրմալինից դուրս են գալիս ինտենսիվությունների շատ մեծ տարբերությամբ, ինչի հետևանքով բնական լույսից ստացվում է մասնակի բևեռացված լույս:

Բավարար հաստությունների դեպքում (տուրմալինի համար մոտ 1 մմ) սովորական ճառագայթը գործնականում լրիվ կլանվում է,

իսկ անցած լույսը հարթ բևեռացված է: Այս երևույթն անվանում են *դիքրոիզմ*:

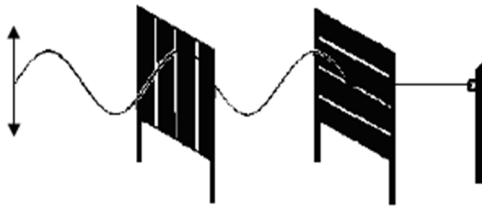
Այսօր հայտնաբերված և սինթեզված են շատ մեծ դիքրոիզմով բազմաթիվ նյութեր, այնպիսիք, որոնց չափազանց փոքր հաստությամբ (մի քանի մկմ) թաղանթները գործնականում ամբողջությամբ կլանում են փոխադրահայաց բևեռացումներից մեկը և թաղանթից դուրս է գալիս լույսի գծային բևեռացված փունջ: Այս սկզբունքով աշխատող բևեռիչները հաճախ անվանում են *պոլարոիդ* (նկ. 13):



Նկ. 13. Ժամանակակից բարակ թաղանթային բևեռիչը

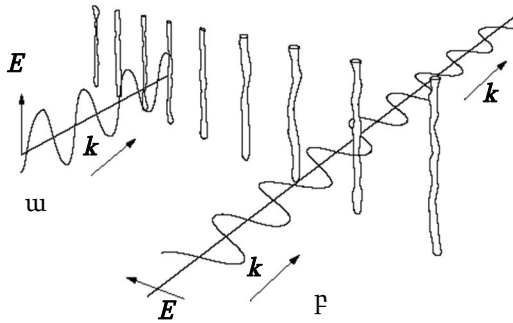
Պոլարոիդի աշխատանքի սկզբունքը փորձենք պարզաբանել՝ հիմնվելով հաճախ օգտագործվող մեխանիկական օրինակի վրա: Ենթադրենք ունենք երկու զուգահեռ ձեղքեր, որոնք կարելի է միմյանց նկատմամբ կողմնորոշել տարբեր ուղղություններով: Բերված օրինակով պարզենք, թե ինչպես է կարելի ստանալ բևեռացնող սառք:

Ինչպես երևում է նկ. 14-ից, այն դեպքում, երբ տատանման ուղղությունը համընկնում է ճեղքի ուղղության հետ, ալիքն անարգել անցնում է: Հակառակ դեպքում այն արողջությամբ մարում է: Այսպիսով, եթե գտնվի այնպիսի նյութ, որում էլեկտրոնները կարող են ազատորեն տեղաշարժվել մի ուղղությամբ և լինեն «անշարժ» դրան ուղղահայաց ուղղությամբ, ապա այդպիսի միջավայրով լուսի տարածման ժամանակ ընկնող ալիքի մի բաղադրիչն աշխատանք կկատարի և կվերածվի ջերմության, իսկ մյուսն աշխատանք չի կատարի և կանցնի այդպիսի միջավայրն առանց կորուստների:



Նկ.14. Մեխանիկական լայնական ալիքն ամբողջությամբ բացթողնող և արգելակող սարքերի գծապատկերը

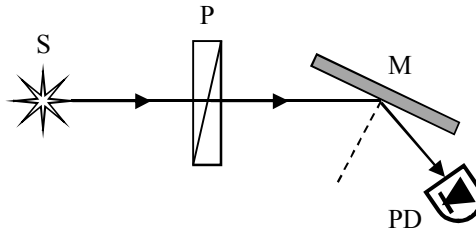
Ինչպես է ստացվում այդ նյութը: Վերցնում են ածխաջրածնային երկար շղթա պարունակող մոլեկուլներից բաղկացած նյութ: Այն ձգվում է մի որևէ ուղղությամբ, որի արդյունքում մոլեկուլներն իրենց երկար առանցքներով դասավորվում են ձգման ուղղությամբ: Ձգելուց հետո նյութն իջեցնում են յոդ պարունակող լուծույթի մեջ: Յոդի մոլեկուլներն ամրանում են ածխաջրածնային շղթաներին, որի հետևանքով էլ առաջանում են շղթայի երկայնքով ազատ վազելու ունակ էլեկտրոններ (տե՛ս՝ նկ. 15):



Նկ. 15. Գծային դիֆրակցիոն բևեռիչի աշխատանքի սկզբունքը. ա) մաքուր ուղղությունը, բ) բացթողնման ուղղությունը

3. Պոլարիզի տատանումների թույլատրված հարթության ուղղության որոշումը

Պոլարիզի կամ պրիզմայատիպ բյուրեղային բևեռիչների թույլատրելի տատանումների ուղղությունը (անկախ այն բանի, նրանք օգտագործվում են որպես բևեռիչ թե՛ վերլուծիչ) հեշտությամբ կարելի է որոշել *սև հայելու* օգնությամբ (M դիէլեկտրական հայելին նկ. 16-ում): Սև հայելի են անվանում տեսանելի լույսի համար անթափանց նյութից պատրաստված լավ հարթեցված մակերևույթը: Որպես այդպիսին կարող է ծառայել ցանկացած տեսանելի տիրույթի համար անթափանց ապակյա լուսազտիչ:



Նկ. 16. Քնեռիչի տատանումների թույլատրելի ուղղության որոշումը պարզաբանող գծապատկերը

Ինչպես հայտնի է, անդրադարձնող մակերևույթի վրա Բրյուստերի անկյան տակ լույսի անկման դեպքում անդրադարձած փնջում լույսը լրիվ բևեռացված է, իսկ նրա էլեկտրական դաշտի լարվածության $\vec{E}$ վեկտորը գուգահեռ է անդրադարձնող մակերևույթին («ասեղի կանոն»): Փորձում S լույսի աղբյուրից P պոլարոիդով անցած լույսն, անդրադառնալով M սև հայելուց, ընկնում է PD ֆոտոընդունիչի վրա: Հայելուց անդրադարձած լույսը նվազագույն ինտենսիվություն ունի հետևյալ երկու պայմանների դեպքում.

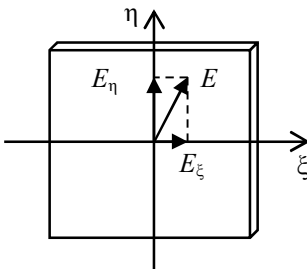
1. լույսն անդրադարձնող մակերևույթին պետք է ընկնի Բրյուստերի անկյան տակ,
2. ընկնող փնջում $\vec{E}$ վեկտորը պետք է ընկած լինի անկման հարթության մեջ:

Պոլարոիդը պտտելով փնջի, իսկ սև հայելին՝ փնջին ուղղահայաց առանցքի շուրջը կարելի է հասնել անդրադարձած փնջի նվազագույն ինտենսիվության, և այսպիսով, որոշել պոլարոիդի թույլատրված ուղղությունը: Այս փորձով քնեռիչի տատանումների թույլատրված ուղղությունը որոշելն այնքան հեշտ է և հստակ, որ փորձարարները հաճախ որոշում են այն չօգտագործելով նույնիսկ չափիչ սարքեր (որոշում են տեսողաբար):

Իմիջիայլոց, չափելով հայելու պտտման անկյունը (Բրյուստերի անկյունը)՝ դժվար չէ որոշել նաև այն նյութի բեկման ցուցիչը, որից պատրաստված է հայելին: Այս մեթոդը հաճախ օգտագործում են անթափանց դիէլեկտրիկների բեկման ցուցչի որոշման համար:

4. Էլիպսական բևեռացմամբ լույսի ստացումը

Էլիպսական բևեռացմամբ լույսը կարելի է ստանալ գծային բևեռացվածից՝ երկբեկող բյուրեղյա թիթեղների օգնությամբ: Երկբեկող թիթեղն ունի միայնաց ուղղահայաց երկու *գլխավոր ուղղություններ*, որոնք համընկնում են դիէլեկտրական թափանցելիության էլիպսոիդի առանցքների հետ: Նման ձևով կտրված բյուրեղի վրա ուղղահայաց անկման դեպքում գլխավոր ուղղություններով բևեռացված ալիքները թիթեղում տարածվում են տարբեր արագու-

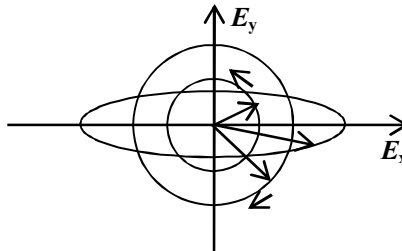


Նկ. 17. Երկբեկող թիթեղի գլխավոր ուղղությունները պարզաբանող գծապատկերը

թյուններով՝ չփոխելով իրենց բևեռացման բնույթը: Այդ ալիքներն անվանում են *գլխավոր ալիքներ*: Գլխավոր ալիքների համար բեկման ցուցիչները նշանակենք n_z և n_η , որտեղ ξ -ն և η -ն բյուրեղային թիթեղի գլխավոր ուղղություններն են (նկ. 17): Ասվածը նշանակում է, որ լույսի բևեռացման ցանկացած վիճակ

կարող է ներկայացվել որպես երկու փոխուղղահայաց գծային բևեռացված ալիքների գումար, որոնց միջև գոյություն ունի որոշակի փուլերի և լայնույթների տարբերություն: Ուրեմն լուսային ալիքները օժտված են երկու՝ մեկը մյուսից անկախ բևեռացման վիճակներով:

Հարկ է նշել սակայն, որ երկու անկախ բևեռացումներով ներկայացումը միակ հնարավորը չէ: Մի շարք դեպքերում նպատակահարմար է լինում որպես անկախ բևեռացումներ ընտրել աջ և ձախ շրջանային բևեռացված ալիքները (դասական օրինակ են բնական օպտիկական ակտիվությամբ միջավայրերը): Դժվար չէ համոզվել, որ տարբեր գործակիցներով այդպիսի ալիքների գումարը նույնպես կարող է հանգեցնել էլիպտական բևեռացման: Ասվածը ցուցադրված է նկ. 18-ում:



Նկ. 18. Աջ և ձախ շրջանային բևեռացված ալիքների միջոցով էլիպտական բևեռացված լույսի առաջացումը պարզաբանող գծապատկերը

Ենթադրենք գծային բևեռացված լույսն ընկնում է թիթեղի վրա, այնպես, որ նրա էլեկտրական վեկտորը ξ առանցքի հետ կազմում է α անկյուն (ξ և η –առանցքները համապատասխանում են բյուրեղի սիմետրիայի առանցքներին, ինչպես ընդունված է անվանել «արագ» և «դանդաղ» առանցքներին): $\vec{E}$ վեկտորը վերլուծենք երկու՝ E_ξ և E_η բաղադրիչների: Թիթեղի մուտքում E_ξ -ն և E_η -ն համափուլ են: Ելքում, այդ ալիքների տարածման արագությունների տարբերության շնորհիվ, կծագի ընթացքների տարբերություն, որն արտահայտելով ալիքի երկարության մասերով, կարելի է գրել՝

$$\frac{\lambda}{m} = d(n_\xi - n_\eta), \quad (5)$$

որտեղ m -ն ամբողջ թիվ է, իսկ d -ն՝ բյուրեղային թիթեղի հաստությունը: Այս դեպքում փուլերի շեղումը կորոշվի՝

$$\varphi = \frac{2\pi}{m} = kd(n_{\xi} - n_{\eta}), \quad (6)$$

առնչությամբ, որտեղ k -ը վակուումում ալիքային թիվն է: Ինչպես արդեն ասվել է, փուլերի որոշ տարբերությամբ, երկու փոխուղղահայաց տատանումների գումարման արդյունքում ձևավորվում է էլիպսական բևեռացմամբ տատանումներ:

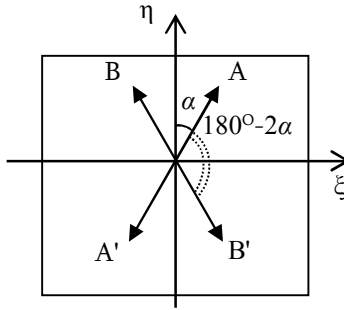
Դիտարկենք գործնականում կարևոր մի քանի մասնավոր դեպքեր:

4.1. Լրիվ ալիքային թիթեղը

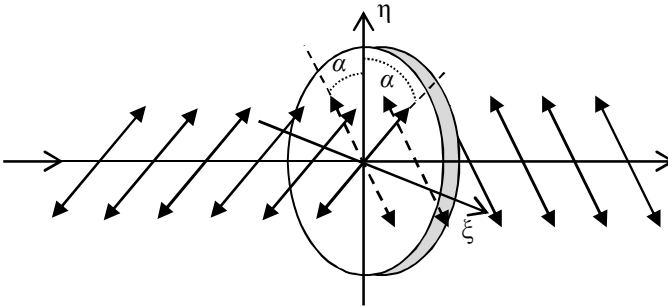
Լրիվ ալիքային թիթեղ (1λ) են անվանում այն բյուրեղային թիթեղը, որը տալիս է փուլերի $\varphi = 2\pi$ շեղում: Ալիքների գումարման արդյունքում, ելքում ստացվում է տատանումների նույն ուղղությունն ունեցող, ինչ ընկնողինն է, գծային բևեռացված ալիք (այլ կերպ ասած՝ ալիքի բևեռացումը չի փոխվում):

4.2. Կեսալիքային թիթեղը

Կեսալիքային ($\lambda/2$) թիթեղն այն թիթեղն է, որը ելքում առաջացնում է փուլերի π շեղում: Թիթեղի ելքում կրկին ունենում ենք գծային բևեռացված ալիք, բայց տատանման ուղղությունը 2-4 քառորդականերից անցնում է 1-3 քառորդակաները, շրջվելով 180° - 2α անկյունով (նկ. 19, նկ. 20): Այսպիսի թիթեղն օգտագործում են գծային բևեռացված ալիքի բևեռացումը պտտելու համար:



Նկ. 19. $\lambda/2$ թիթեղի աշխատանքի սկզբունքը պարզաբանող գծապատկերը



Նկ. 20. $\lambda/2$ թիթեղով անցման ժամանակ լույսի բևեռացման վարքը պարզաբանող գծապատկերը

4.3. Քառորդ ալիքային թիթեղը

Քառորդ ալիքային ($\lambda/4$) թիթեղի ելքում փոխադրահայաց տատանումների միջև առաջանում է փուլերի $\pi/2$ տարբերություն: Փուլերի $\pi/2$ տարբերություն ունեցող փոխադրահայաց տատանումների գումարման արդյունքում ձևավորվում է էլիպս, որի գլխավոր

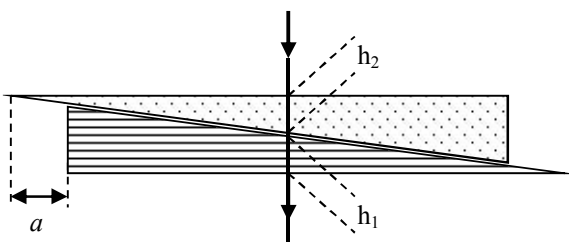
առանցքները համընկնում են կոորդինատային ξ և η առանցքների հետ: $E_{\xi 0}$ և $E_{\eta 0}$ լայնությունների հավասարության դեպքում առաջանում է շրջանային բևեռացում:

Նշենք, որ λ , $\lambda/2$, $\lambda/4$ և այլն թիթեղների մասին խոսելիս, միշտ ի նկատի ունենք լույսի խիստ որոշակի միագույն բաղադրիչ (օրինակ՝ $\lambda/4$ թիթեղ կարմիր լույսի համար):

4.4. Բաբինեի փոխհատուցիչը (կոմպենսատորը)

Բևեռացված լույսի ստացման և հետագոտման ժամանակ դիտարկված փուլային թիթեղներից բացի, հաճախ օգտագործում են սարքեր, որոնք թույլ են տալիս երկու օրթոգոնալ տատանումների միջև սահուն կերպով ստեղծել կամ փոխհատուցել (չեզոքացնել) փուլերի ցանկացած տարբերություն: Այդ սարքերն անվանում են փոխհատուցիչներ (կոմպենսատորներ):

Պարզագույն փոխհատուցիչը (Բաբինեի փոխհատուցիչը) բաղկացած է երկու քվարցե սեպերից (նկ. 21), որոնց օպտիկական առանցքները փոխադրահայաց են:



Նկ. 21. Բաբինեի փոխհատուցիչի ա) գծապատկերը և բ) լուսանկարը

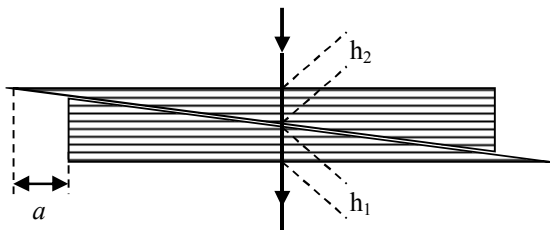
Նկ. 21-ում սեպերի վրա այդ առանցքները նշված են գծերով, եթե այն նկարի հարթության մեջ է և կետերով՝ եթե այն ուղղահայ-

յաց է նկարի հարթությանը: Ընթացքների օպտիկական տարբերության փոփոխությունը ստեղծվում է միմյանց նկատմամբ սեպերի a տեղաշարժով: Ակնհայտ է, որ ընթացքների օպտիկական տարբերությունը համեմատական է դիտարկվող կետում սեպերի հաստությունների տարբերությանը՝ $(h_1 - h_2)$ և, հետևաբար, գծային է կախված դրանց a տեղաշարժից:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)(h_1 - h_2): \quad (7)$$

Խաչված բևեռիչի և վերլուծիչի դեպքում, փոխհաստուցիչը տեղադրվում է այնպես, որ նրա գլխավոր առանցքները համընկնեն գլխավոր ուղղություններից որևէ մեկի հետ: Բևեռիչի բացթողման ուղղությունը կողմնորոշում են նմուշի գլխավոր ուղղություններից որևէ մեկի նկատմամբ 45° անկյան տակ, որպեսզի ինտերֆերենց առաջացնող ալիքների լայնույթները լինեն միևնույնը:

Բաբինեի փոխհաստուցիչն օգտագործում են այն դեպքերում, երբ անհրաժեշտ է չափել փուլերի տարբերությունը նմուշի դաշտում, քանի որ փոխհաստուցիչի յուրաքանչյուր հաստույթի համապատասխանում է փուլերի որոշակի տարբերություն:



Նկ. 22. Բաբինե-Սոլեյի փոխհաստուցիչի գծապատկերը

Հաճախ, տարբեր տիպի բևեռացված լուսային լայն փնջերի ստացման և բևեռացված փնջերի վերլուծման ժամանակ անհրաժեշտ է լինում, որ փոխհաստուցիչի ամբողջ դաշտով ապահովվի

փուլերի միևնույն տարբերությունը: Այդպիսի պարզագույն փոխ-
հատուցիչներից մեկը՝ Բաբինե-Սոլեյլի փոխհատուցիչը ուրվագծո-
րեն պատկերված է նկ. 22-ում: Այն բաղկացած է քվարցե երկու սե-
պերից, որոնց օպտիկական առանցքները զուգահեռ են միմյանց և,
որպես կանոն, ուղղված են կամ սեպի երկայնքով (ինչպես նկ. 22-
ում), կամ դրան ուղղահայաց: Սեպերից մեկի մյուսի նկատմամբ a
տեղաշարժի դեպքում փուլերի օպտիկական տարբերությունը
փոխվում է սեպերի $h = h_1 + h_2$ գումարային հաստությանը, հետևա-
բար նաև a տեղաշարժին ուղիղ համեմատական

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)(h_1 + h_2): \quad (8)$$

5. Լույսի բևեռացման վիճակի նկարագրումը

Լույսի և միջավայրի փոխազդեցության արդյունքը շատ դեպքե-
րում խիստ կախված է լուսային ալիքի էլեկտրական դաշտի լարվա-
ծության $\vec{E}$ վեկտորի կողմնորոշման վարքից: Բացի դրանից, բևե-
ռացված լույսի կիրառությունները բավականին լայնամասշտաբ են:
Հետազոտությունների բևեռացումային մեթոդների կարևոր առանձ-
նահատկությունն այն է, որ դրանք թույլ են տալիս իրականացնել
բարձր ճշգրտությամբ չափումներ, որը հնարավոր չէ այլ մեթոդների
կիրառմամբ: Ահա ինչպես այս, այնպես էլ մի շարք այլ դեպքերում,
չափազանց կարևոր է լույսի բևեռացման վիճակի իմացությունը:

Լույսի բևեռացման վիճակը նկարագրելու համար ներմուծում
են մի շարք մեծություններ՝ բևեռացման տեսակ, բևեռացման աստի-
ճան և այլն: Լույսի բևեռացումը հաճախ հարմար է նկարագրել
Ստոքսի վեկտորով կամ պարամետրերով:

5.1. Բևեռացման աստիճանը

Եթե բևեռիչի վրա ընկնող լույսը չբևեռացված է (բնական է), ապա նրանում առկա են $\vec{E}$ վեկտորի կամայական կողմնորոշմամբ բաղադրիչներ (այսինքն δ -ի ցանկացած արժեքով բաղադրիչներ (տե՛ս՝ նկ. 6)): Միջինացնելով՝

$$E = E_0 \cos \delta \quad \text{և} \quad I = I_0 \cos^2 \delta$$

արտահայտությունը ըստ δ անկյան՝ կստանանք $I_1 = 0,5I_0^{բն}$: Ուրեմն, բևեռադրի ցանկացած կողմնորոշման դեպքում նրանով անցնում է բնական լույսի ինտենսիվության կեսը:

Վերն ասվածից հետևում է, որ առկա է լուսային ալիքի «լավ» կամ «վատ» բևեռացված լինելու խնդիր: Այդ պատճառով բևեռացվածության քանակական բնութագրի ներմուծման անհրաժեշտություն կա՝ դա *բևեռացման աստիճանն է*: Այն սահմանվում է մասնակի բևեռացված լույսի գաղափարի հիման վրա: Եթե լույսն իրենից ներկայացնում է $I_{բն}$ ինտենսիվությամբ բնական լույսի և $I_{բևեռ}$ ինտենսիվությամբ բևեռացված լույսերի խառնուրդ, ապա

$$P = \frac{I_{բևեռ}}{I_{բևեռ} + I_{բն}} \quad (9)$$

մեծությունն անվանում են բևեռացման աստիճան:

Դժվար չէ նկատել, որ (9)-ի համաձայն բևեռացման աստիճանը կարող է փոփոխվել $0 \leq P \leq 1$ սահմաններում, ընդ որում լրիվ բևեռացված լույսի համար (անկախ բևեռացման տիպից) $P = 1$, իսկ բնական լույսի համար $P = 0$: Միջանկյալ մնացած արժեքների դեպքում լույսը մասնակի բևեռացված է:

(9) բանաձևով սահմանված բևեռացման աստիճանը չի պատասխանում հետևյալ հարցին՝ ինչպիսին է լույսի բևեռացումը: Այդ պատճառով գործնականում հաճախ օգտագործում են մեկ այլ բնութագիր, որը հիմնված է վերլուծիչով անցած լույսի ինտենսիվության

փոփոխության վրա, երբ այն պտտում են լուսային փնջի տարածման ուղղության շուրջը: Վերլուծիչը պտտելով՝ որոշում են անցած լույսի առավելագույն՝ I_{max} և նվազագույն՝ I_{min} ինտենսիվությունների արժեքները, որոնք համապատասխանում են վերլուծիչի կողմնորոշման երկու փոխուղղահայաց ուղղությունների: Այնուհետև

$$\Delta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (10)$$

բանաձևով հաշվում են Δ պարամետրը:

Այսպիսով՝ սահմանված Δ պարամետրը, ինչպես բևեռացման աստիճանն էր, ընկած է $0 \leq \Delta \leq 1$ միջակայքում: $\Delta = 1$ արժեքը համապատասխանում է գծային բևեռացված լույսին (վերլուծիչի ինչ որ դիրքում անցած լույսի ինտենսիվությունը դառնում է զրո), իսկ $\Delta = 0$ -ն՝ ինչպես բնական, այնպես էլ շրջանային բևեռացված լույսին (անցած լույսի ինտենսիվությունը կախված չէ վերլուծիչի դիրքից): Δ -ն, ըստ էության, իրենից ներկայացնում է *գծային բևեռացման աստիճանը*, և հարմար է օգտագործել այն դեպքերում, երբ խոսքը գնում է գծային բևեռացման մասին, օրինակ՝ երկու թափանցիկ միջավայրերի բաժանման սահմանից անդրադարձած լույսի բևեռացման հետազոտմանը:

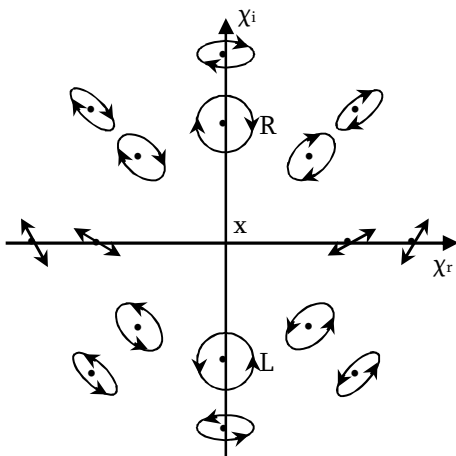
5.2. Կոմպլեքս հարթության մեթոդը

§1-ում նշվել էր, որ լույսի բևեռացման վիճակը կարելի է նկարագրել լուսային դաշտի էլեկտրական վեկտորի x և y բաղադրիչների E_{x0} , E_{y0} լայնույթների և $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ փուլերի տարբերության միջոցով:

Կարելի է բևեռացման վիճակի նկարագրության համար օգտագործել նաև

$$\chi = \frac{E_{y0}}{E_{x0}} e^{i(\varphi_y - \varphi_x)} = tg\psi * e^{i\varphi} \quad (11)$$

արտահայտությամբ սահմանված կոմպլեքս պարամետրը: Այս պարամետրի օգնությամբ բևեռացման վիճակները պատկերավոր ներկայացնելու համար հարմար է պատկերել կոմպլեքս հարթության վրա (տե՛ս՝ նկ. 23): Այդ հարթության վրա առանձնացնենք հետևյալ բնութագրական կետերը.



Նկ. 23. Բևեռացման վիճակների պատկերումը
կոմպլեքս հարթության վրա

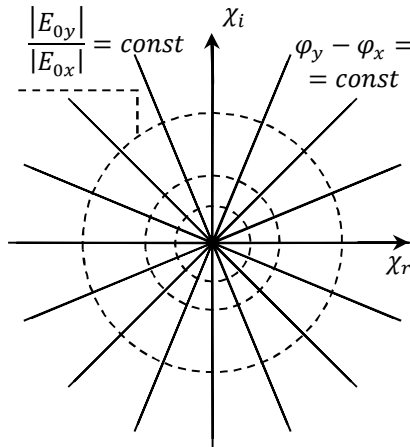
1. Կոորդինատական առանցքների սկզբնակետը՝ ($\chi = 0$) և անվերջ հեռու կետերը՝ ($\chi = \infty$) համապատասխանում են x (հորիզոնական) և y (ուղղաձիգ) առանցքներով բևեռացված վիճակներին:

2. Կամայական ψ ազիմուտով ($-\pi/2; \pi/2$) գծային բևեռացված վիճակները կհամապատասխանեն իրական առանցքի $(-\infty; \infty)$ միջակայքում ընկած կետերին:

3. Կեղծ առանցքի վրայի $R(\chi = i)$ և $L(\chi = -i)$ կետերը համապատասխանում են աջ և ձախ շրջանային բևեռացված վիճակներին: Դրանում հեշտ է համոզվել՝ տեղադրելով $|E_{y0}|/|E_{x0}| = 1$ և $\varphi_y - \varphi_x = \pm \pi/2$ արժեքները:

4. Բացի իրական առանցքի բոլոր և կեղծ առանցքի R, L կետերից, կոմպլեքս հարթության բոլոր կետերը համապատասխանում են էլիպսական բևեռացմանը: Ընդ որում, վերին կիսահարթության կետերը պատկերում են աջ բևեռացման վիճակները, իսկ ստորին կիսահարթությանը՝ ձախ: Դրանում դժվար չէ համոզվել (11) արտահայտության օգնությամբ:

$\varphi_y - \varphi_x = const$ արժեքներին համապատասխանող վիճակների երկրաչափական տեղը կոորդինատների սկզբնակետով անցնող ուղիղներ են, իսկ $|E_{y0}|/|E_{x0}| = const$ վիճակներինը՝ համակենտրոն շրջանագծեր (տես նկ. 24):



Նկ. 24. Հաստատուն $|E_{y0}|/|E_{x0}|$ և $\varphi_y - \varphi_x$ արժեքներին համապատասխանող բևեռացման վիճակների պատկերումը կոմպլեքս հարթության վրա

5.3. Ջոնսի մատրիցական մեթոդը

Լույսի բևեռացման վիճակը կարելի է նկարագրել 1941 թ. Ռ. Ջոնսի կողմից ներմուծված Ջոնսի վեկտորի միջոցով: Այդ դեպքում, (1) արտահայտությամբ նկարագրվող մոնոքրոմատիկ ալիքը ներկայացվում է

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{pmatrix} \quad (12)$$

սյուն մատրիցի օգնությամբ: Այն ամբողջական ինֆորմացիա է պարունակում էլեկտրական վեկտորի մասին: Միայն բևեռացման վիճակը նկարագրելու համար օգտագործվում է

$$\vec{J}^* \cdot \vec{J} = 1 \quad (13)$$

առնչությամբ սահմանվող Ջոնսի նորմավորված վեկտորը, որտեղ (*)-ով նշանակված է կոմպլեքս համալուծը: Ջոնսի և Ջոնսի նորմավորված վեկտորի կապը տրվում է հետևյալ առնչությամբ.

$$\vec{J} = \frac{\vec{J}}{\sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2}}$$

Ներկայացնենք մի քանի մասնավոր դեպքեր.

1. Կամայական ψ ազիմուտով գծային բևեռացված ալիք՝

$$\vec{J}(\psi) = \begin{pmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{pmatrix}:$$

2. x և y առանցքներով գծային բևեռացված վիճակները կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով՝

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ և } \vec{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}:$$

3. Աջ և ձախ շրջանային բևեռացված ալիքների Ջոնսի վեկտորներն ունեն հետևյալ տեսքը՝

$$\vec{R} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \text{ և } \vec{L} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}:$$

Բևեռացման այս երկու վիճակները օրթոգոնալ են, այսինքն՝

$$\vec{R}^* \cdot \vec{L} = 1 \quad :$$

4. Ընդհանուր՝ էլիպտական բևեռացման դեպքում

$$\vec{J}(\psi, \delta) = \begin{pmatrix} \cos\psi \\ e^{i\delta} \sin\psi \end{pmatrix}:$$

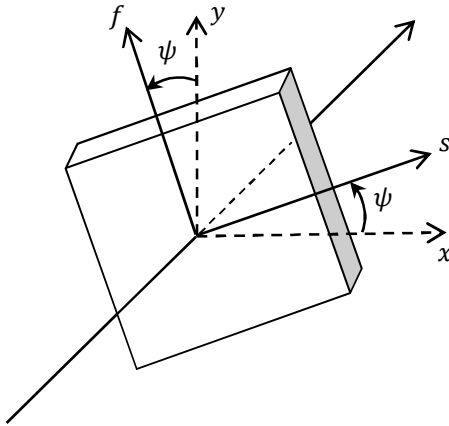
Աղյուսակ 1-ում ներկայացված են բևեռացման մի քանի մասնավոր դեպքերին համապատասխանող Ջոնսի վեկտորները:

Որպես Ջոնսի մատրիցների ֆորմալիզմի կիրառման օրինակ՝ քննարկենք որշակի կողմնորոշմամբ կտրված միառանգք բյուրեղում լույսի տարածման խնդիրը: Ինչպես հայտնի է, միառանգք բյուրեղում կարող են տարածվել երկու անկախ, փոխուղղահայաց գծային բևեռացմամբ ալիքներ՝ սովորական (օ-ալիք) և անսովոր (e-ալիք): Սովորաբար փուլային թիթեղները կտրվում են այնպես, որ օպտիկական առանցքը գտնվում է թիթեղի հատույթում (տե՛ս՝ նկ. 25): Այդ դեպքում, թիթեղին ուղղահայաց ընկնող լուսային ալիքը կտարածվի օպտիկական առանցքին ուղղահայաց:

Նման փուլային թիթեղների օգնությամբ կարելի է իրականացնել բևեռացման տրված վիճակի փոփոխություն ցանկացած այլ բևեռացման:

Աղյուսակ 1

Բևեռացման վիճակը	Ջոնսի վեկտորը
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 1 \\ 2i \end{pmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 2 \\ -i \end{pmatrix}$



Նկ. 25. ψ ազիմուտային անկյամբ փոխային թիթեղ (x, y -լաբորատոր կոորդինատական համակարգի առանցքներն են)

Նկ. 25-ում պատկերված օրինակով քննարկենք բևեռացված լույսի տարածման խնդիրը Ջոնսի մատրիցական մեթոդի օգնությամբ: Նկարագրենք մուտքային ալիքի բևեռացման վիճակը Ջոնսի

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (14)$$

վեկտորի միջոցով: Անցնենք կոորդինատական նոր համակարգի, որի առանցքները համընկնում են բյուրեղի սեփական արագ (f) և դանդաղ (s) առանցքների հետ

$$\begin{pmatrix} E_s \\ E_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \hat{R}(\psi) \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}: \quad (15)$$

Այստեղ $E_{s,f}$ - լուսային ալիքի «դանդաղ» և «արագ» բաղադրիչներն են բյուրեղի սեփական կոորդինատական համակարգում: Այս երկու ալիքները տարածվում են բյուրեղում մեկը մյուսից անկախ, սեփական փուլային արագություններով, ինչի հետևանքով էլ նրանց միջև ելքում կառաջանա փուլերի տարբերություն: Այդ փոփոխությունը հենց բևեռացման վիճակի փոխակերպման պատճառն է:

Նշանակենք n_s , n_f -ով «դանդաղ» և «արագ» բաղադրիչների բեկման ցուցիչները համապատասխանաբար: Այդ դեպքում, բևեռացման վիճակը նկարագրող Ջոնսի վեկտորը բյուրեղի ելքում (s, f -կոորդինատական համակարգ) կլինի

$$\begin{pmatrix} E'_s \\ E'_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\omega}{c}n_sl} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\omega}{c}n_fl} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s \\ E_f \end{pmatrix}: \quad (16)$$

Այստեղ l -ը բյուրեղի հաստությունն է: Սահմանենք փուլային ուշացումը հետևյալ առնչությամբ

$$\Gamma = \frac{\omega}{c} (n_s - n_f) l: \quad (17)$$

Պարզ ձևափոխություններից հետո (5.12) արտահայտությունը կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով՝

$$\begin{pmatrix} E'_s \\ E'_f \end{pmatrix} = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s \\ E_f \end{pmatrix}, \quad (18)$$

որտեղ $\Phi = (\omega/2c)(n_s + n_f)l$ -ն փուլի միջին բացարձակ փոփոխությունն է: Ելքային ակիքի բևեռացման վիճակը նկարագրող Ջոնսի վեկտորը x, y լաբորատոր կոորդինատական համակարգում կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E'_s \\ E'_f \end{pmatrix},$$

կամ տեղադրելով (18) արտահայտությունը

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \hat{R}(-\psi) W_0 \hat{R}(\psi) \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}, \quad (19)$$

որտեղ

$$\hat{R}(\psi) = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix}, \text{ իսկ } W_0 = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma}{2}} \end{pmatrix}:$$

Ինտերֆերենցիոն երևույթների բացակայությամբ $e^{-i\phi}$ փուլը կարելի է անտեսել:

Ինչպես տեսնում ենք, փուլային թիթեղը կարելի է նկարագրել

$$W = \hat{R}(-\psi)W_0\hat{R}(\psi) \quad (19 \text{ ա})$$

մատրիցի օգնությամբ: Հեշտ է համոզվել, որ այն ունիտար մատրից է, այսինքն՝

$$W^+ * W = 1:$$

Որպես ունիտար ձևափոխության հետևանք մի շարք ֆիզիկական հատկություններ, այդ թվում նաև բազիսային բևեռացումների փոխադրահայացությունը և նրանց երկարությունների ինվարիանտությունը, մնում է անփոփոխ:

ա) Իդեալական համասեռ բևեռիչի Ջոնսի մատրիցը

$$P_0 = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (20 \text{ ա})$$

բ) x առանցքի նկատմամբ ψ - անկյամբ պտտված բևեռիչի համար կունենանք

$$\hat{P} = \hat{R}(-\psi)\hat{P}_0\hat{R}(\psi), \quad (20 \text{ բ})$$

գ) Փ-փուլի անտեսելու դեպքում, այսպիսով, x, y առանցքներին զուգահեռ բևեռիչների համար կարող ենք գրել

$$\hat{P}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \hat{P}_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}: \quad (20 \text{ գ})$$

Նկատենք, հաջորդական փուլային թիթեղների ազդեցությունը պարզելու համար անհրաժեշտ է գտնել այդ բոլոր թիթեղների Ջոնսի մատրիցների արտադրյալը:

5.3.1. Օրինակներ. կիսալիքային և քառորդ լիքային թիթեղները

Կիսալիքային թիթեղի համար $\Gamma = \pi$: Նման փուլերի տարբերություն բյուրեղը կարող է ապահովել, եթե նրա հաստությունը՝ $l = \lambda/2(n_s - n_f)$: Քննարկենք այնպիսի կիսալիքային թիթեղի աշխատանքը, որի $\psi = \pi/4$, իսկ մուտքային ալիքի Ջոնսի վեկտորը

$$\vec{J}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}:$$

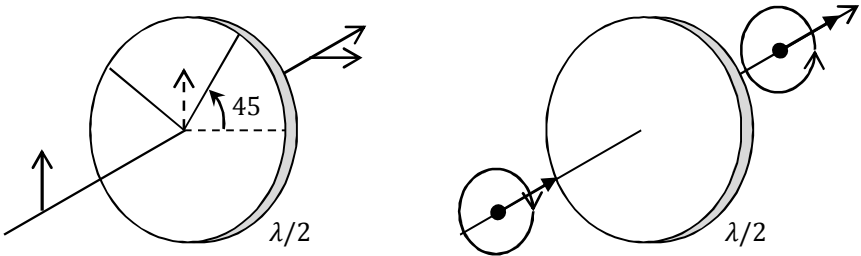
Օգտագործելով ստացված արդյունքները՝ կիսալիքային թիթեղի Ջոնսի մատրիցի համար կարող ենք գրել՝

$$W = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ -i & 0 \end{pmatrix}:$$

Համապատասխանաբար, ելքային ալիքի Ջոնսի վեկտորի համար կարող ենք գրել՝

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} -i \\ 0 \end{pmatrix} = -i \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}:$$

Սա նշանակում է, որ ելքային ալիքը գծային բևեռացված է հորիզոնական հարթության մեջ, այսինքն գծային բևեռացված լույսը մնում է գծային, սակայն պտտված 2ψ անկյունով: Համապատասխանաբար, կիսալիքային թիթեղը աջ շրջանային բևեռացված լույսը կփոխարկի ձախի և հակառակը (տե՛ս՝ նկ. 26):



Նկ. 26. Կիսալիքային թիթեղի աշխատանքը պարզաբանող գծապատկեր

Քառորդ ալիքային թիթեղի դեպքում $\Gamma = \pi/2$, իսկ հաստությունը՝ $l = \lambda/4(n_s - n_f)$:

Նույն $\psi = \pi/4$, իսկ մուտքային ալիքի Ջոնսի

$$\vec{J}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

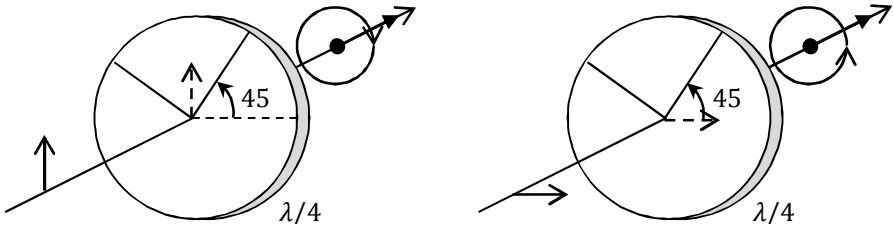
վեկտորի դեպքում Ջոնսի մատրիցի համար կարող ենք գրել

$$W = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\pi}{4}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix}:$$

Ելքային ալիքի Ջոնսի վեկտորը

$$\vec{J} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix} = -\frac{i}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}:$$

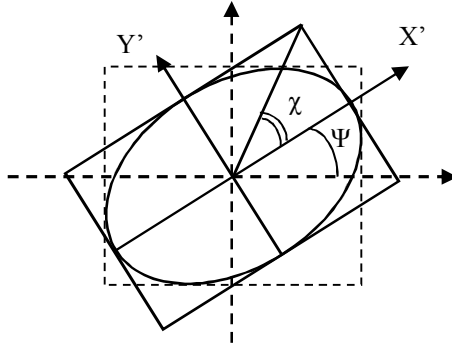
Այս արտահայտությամբ նկարագրվում է ձախ շրջանային բևեռացված լույսը: Եթե մուտքային ալիքը գծային բևեռացված է հորիզոնական հարթության մեջ, ապա ելքային ալիքը աջ շրջանային բևեռացված է (տե՛ս՝ նկ. 27):



Նկ. 27. Քառորդ ալիքային թիթեղի աշխատանքը պարզաբանող գծապատկեր

5.4. Ստորսի պարամետրերը

Լույսի բևեռացման վիճակը կարելի է նկարագրել ուղղակի բևեռացման էլիպսը բնութագրերով, որպես փոխուղղահայաց ուղղություններ և միևնույն հաճախությամբ երկու տատանումների գումարման առավել ընդհանուր դեպք: Եթե կորորդինատական համակարգի պտույտով նրա առանցքները համընկացնենք էլիպսի կիսաառանցքների հետ (նկ. 28), ապա $tg\chi$ -ն անվանում են *էլիպսականություն*, իսկ Ψ անկյունը՝ *ազիմուտ*: Բևեռացման վիճակը հաճախ որոշում են այսպես կոչված *Ստորսի վեկտորի* միջոցով, որի չորս բաղադրիչներն ունեն ինտենսիվության չափողականություն և կարող են չափվել փորձնականորեն.



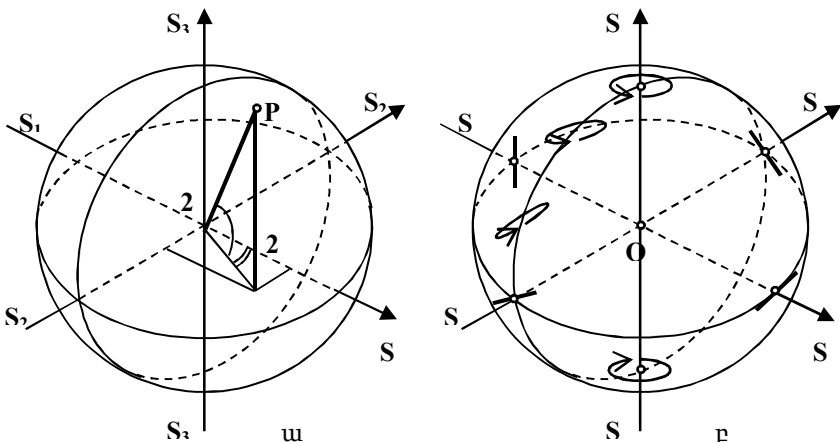
Նկ. 28. Բևեռացման էլիպսի էլիպսականության և ազիմուտի սահմանումը

$$\begin{aligned}
 S_0 &= \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 - I, \\
 S_1 &= E_{0x}^2 - E_{0y}^2 = S_0 \cos 2\chi \cos 2\Psi, \\
 S_2 &= 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta = S_0 \cos 2\chi \sin 2\Psi, \\
 S_3 &= 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta = S_0 \sin 2\chi:
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

S_0 պարամետրը համեմատական է լուսային փնջի լրիվ ինտենսիվությանը: Հետագա քննարկումների ժամանակ ինտենսիվությունը կհամարենք հավասար մեկի: S_1 պարամետրը բնութագրում է հորիզոնական (OX առանցքով) գծային բևեռացման գերակայությունը ուղղաձիգի (OY առանցքով) նկատմամբ: Հորիզոնական բևեռացման համար $S_1 = 1$, իսկ ուղղաձիգի համար՝ $S_1 = -1$: S_2 պարամետրը բնութագրում է 45° անկյան տակ բևեռացման գերակայությունը ($S_2 = 1$) 135° անկյան տակ բևեռացման նկատմամբ ($S_2 = -1$): Վերջապես, S_3 -ը թույլ է տալիս որոշել $\vec{E}$ վեկտորի պտույտի ուղղությունը: Աջ պտույտի դեպքում $S_3 > 0$, իսկ ձախի՝ $S_3 < 0$: $S_3 = \pm 1$ համապատասխանում է շրջանային բևեռացված լույսին:

S_1 , S_2 , S_3 պարամետրերը կարելի է դիտարկել որպես P կետի դեկարտյան կոորդինատներ S_0 շառավղով սֆերայի վրա: Այդ դեպքում 2Ψ -ն և 2χ -ն իրենցից ներկայացնում են այդ կետի գնդոլորտա-

յին անկյունային կոորդինատները (նկ. 29): Այդպիսի գնդաձև, որի յուրաքանչյուր կետի համապատասխանում է բևեռացման որոշակի վիճակ, անվանում են *Պուանկարեի գնդաձև*: Պուանկարեի գնդաձևի բևեռներին համապատասխանում է երկու շրջանային բևեռացումները, իսկ հասարակածի կետերին՝ բոլոր ազիմուտներով գծային բևեռացումները: Զուգահեռականները հանդիսանում են հավասար էլիպսականության գծեր (զուգահեռականներից յուրաքանչյուրի համար $2\chi = \text{const.}$), իսկ միջօրեականները՝ հավասար ազիմուտների գծեր (նկ. 29 բ): Եթե շարժվենք որևէ միջօրեականով վերևի բևեռից դեպի ներքևի բևեռ, ապա վերին կիսագնդում մենք հերթով կանցնենք աջ պտտվող ավելի ու ավելի ձգված էլիպսներով և հասարակածի վրա կանցնենք այն կետով, որը բնութագրում է էլիպսների երկար կիսառանցքների ազիմուտին հավասար ազիմուտով գծային բևեռացում: Ներքևի կիսագնդի վրա բևեռացման վեկտորի պտտման ուղղությունը փոխվում է հակառակի:



Նկ. 29. Պուանկարեի գնդաձևը: ա) Անկյունային կոորդինատների և Ստոքսի պարամետրերի հետ և բ) բևեռացման տարբեր վիճակների պատկերումը Պուանկարեի գնդաձևի վրա

Ստորքսի պարամետրերով բնութագրվում է նաև մասնակի բևեռացված լույսը: Այդ դեպքում $S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$, և բոլոր չորս պարամետրերն անկախ են միմյանցից, իսկ բևեռացման աստիճանը, (9) սահմանման համաձայն, որոշվում է

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (22)$$

բանաձևով:

5.4.1. Մյուլլերի մատրիցան

Ստորքսի պարամետրերը հաճախ գրում են մատրիցական տեսքով, որպես չորս տարրերից բաղկացած վեկտոր՝ սյուն: Ստորև աղյուսակի տեսքով բերված է Ստորքսի վեկտորի որոշ՝ հաճախ հանդիպող օրինակներ:

Աղյուսակ 2				
Բնական լույս	OX առանցքով գծային բևեռացված լույս	OY առանցքով գծային բևեռացված լույս	45° անկյան տակ գծային բևեռացված լույս	Աջ շրջանային բևեռացված լույս
$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Աղյուսակ 3		
	Օպտիկական սարքի անվանումը	Մյուլլերի մատրիցան
1	OX (հորիզոնական) առանցքով կողմնորոշված գծային բևեռարդ	$\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

2	ՕԿ (ուղղաձիգ) առանցքով կողմնորոշված գծային բևեռարդ	$\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
3	+45° անկյան տակ կողմնորոշված գծային բևեռարդ	$\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
4	- 45° անկյան տակ կողմնորոշված գծային բևեռարդ	$\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
5	Ուղղաձիգ արագ առանցքով քառորդ ալիքային թիթեղ՝ $\lambda/4$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
6	Հորիզոնական արագ առանցքով քառորդ ալիքային թիթեղ՝ $\lambda/4$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$
7	Աջ շրջանային բևեռարդ	$\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
8	Ձախ շրջանային բևեռարդ	$\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
9	Ուղղաձիգ արագ առանցքով կես ալիքային թիթեղ՝ $\lambda/2$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$

Տարբեր օպտիկական սարքերով լույսի անցման ժամանակ նրա բևեռացումը կարող է փոխվել: Սարքի բևեռացումային բնութագրերը տրվում են *Մյուլլերի մատրիցայի* միջոցով, որը կապ է հաստատում Մտոքսի մուտքային և էլքային վեկտորների միջև:

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

որտեղ m_{ij} –ն կոնկրետ սարքի առանձնահատկություններից կախված չափողականություն չունեցող 16 գործակիցներ են: Օրինակ՝ X առանցքով բացթողում ունեցող բևեռարդը նկարագրվում է

$$\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

մատրիցայով: Իսկապես, եթե այս մատրիցան բազմապատկենք կամայական բևեռացման համապատասխանող Ստոքսի վեկտորով, կստանանք գծային բևեռացված լույսի համար Ստոքսի վեկտորը՝

$$\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (S_0 + S_1)/2 \\ (S_0 + S_1)/2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}:$$

Բերենք ևս մեկ օրինակ, գծային բևեռացված լույսը շրջանային բևեռացված դարձնող սարքի՝ $\lambda/4$ թիթեղի, մատրիցի օրինակը՝

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}:$$

Նրա ազդեցությունը OX առանցքով գծային բևեռացված լույսի վրա նկարագրվում է

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0 \\ 0 \\ 0 \\ -S_0 \end{pmatrix}$$

հավասարումով, այսինքն ելքում ստացվում է ձախ շրջանային բևեռացված լույս:

Մի քանի հաճախ հանդիպող դեպքերի համար աղյուսակ 2-ում բերված է որոշ սարքերի համար Մյուլլերի մատրիցները:

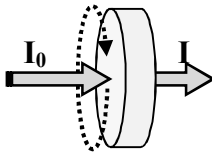
5.5. Լույսի բևեռացման վիճակի փորձարարական հետազոտումը

Գործնականում, լույսի բևեռացումային չափումների ժամանակ կարևոր տեղ է զբաղեցնում բևեռացման վիճակի վերլուծությունը: Հետազոտվող ճառագայթումը կարող է բնութագրվել հետևյալ կերպ՝ չբևեռացված, մասնակի (գծային, շրջանային կամ էլիպսական) բևեռացված, լրիվ բևեռացված (գծային, շրջանային կամ էլիպսական):

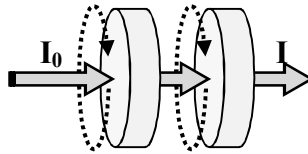
Լույսի բևեռացման վիճակի նկարագրման համար անհրաժեշտ է որոշել, թե ինչ բևեռացում ունի ճառագայթումը (գծային, շրջանային թե՞ էլիպսական), և չափել բևեռացման աստիճանը: Որպես հետազոտման ճանապարհ նպատակահարմար է օգտվել նկ. 30-ում բերված բևեռացման հետազոտման «ճանապարհային քարտեզից»:

Հետազոտությունը կարելի է բաժանել երկու փուլերի: Առաջին փուլում հետազոտվող փնջի դիմաց տեղադրում են A_1 վերլուծիչը և պտտում այն: Այդ դեպքում հնարավոր է երեք դեպքեր.

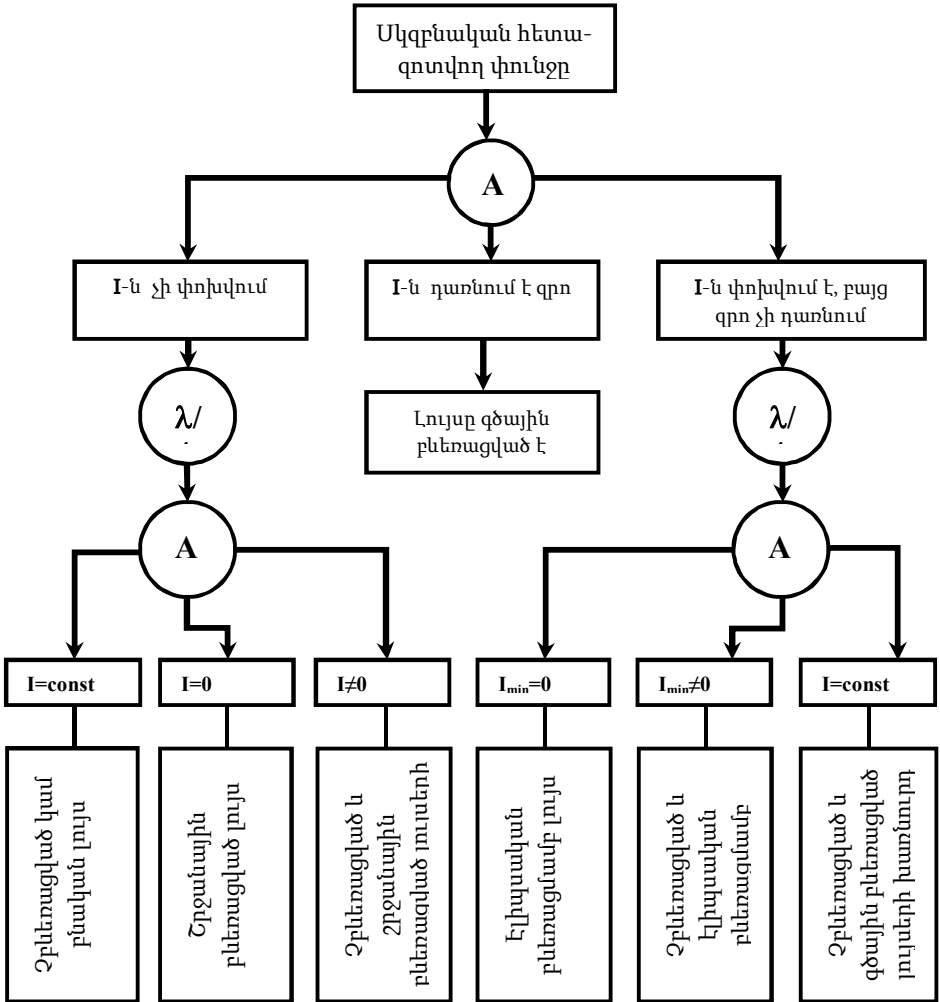
1. Վերլուծիչով անցած լույսի ինտենսիվությունը չի փոխվում այն պտտելիս: Դա հնարավոր է հետևյալ դեպքերում՝



ա) Առաջին



բ) Երկրորդ



Նկ. 30

ա) հետազոտվող ճառագայթումը բևեռացված չէ,
բ) ճառագայթումն ունի շրջանային բևեռացում,
գ) այն չբևեռացված և շրջանային բևեռացված լույսերի խառնուրդ է:

Հետևաբար հետագա հետազոտման կարիք կա, որպեսզի պարզենք ճառագայթումը պարունակում է արդյո՞ք շրջանային բևեռացմամբ լույս:

2. Վերլուծիչի որոշակի կողմնորոշման դեպքում անցած լույսի I ինտենսիվությունը դառնում է զրո: Սա նշանակում է ընկնող լույսը գծային բևեռացված է: Վերլուծիչի կողմնորոշմամբ կարելի է որոշել բևեռացման հարթության ազիմուտը:

3. Վերլուծիչով անցած լույսի ինտենսիվությունը փոխվում է, սակայն զրո չի դառնում: Այս դեպքում հնարավոր է, որ՝

- ա) հետազոտվող լույսն ունի էլիպսական բևեռացում,
- բ) չբևեռացված և էլիպսով բևեռացված լույսերի խառնուրդ է,
- գ) չբևեռացված և գծային բևեռացված լույսերի խառնուրդ է:

Այս դեպքում, նույնպես, հետագա հետազոտման կարիք կա, որպեսզի պարզենք ճառագայթումը պարունակում է արդյո՞ք էլիպսական կամ գծային բևեռացմամբ լույս:

Առաջին և երրորդ դեպքերում, հետազոտման երկրորդ փուլի համար A₁ վերլուծիչը հեռացվում է փնջի ճանապարհից և տեղադրվում է $\lambda/4$ թիթեղը և A₂ վերլուծիչը:

Առաջին դեպքում $\lambda/4$ թիթեղը տեղադրելուց հետո A₂ վերլուծիչը պտտելիս հնարավոր է երեք դեպք.

1) Եթե վերլուծիչով անցած լույսի ինտենսիվությունը դառնում է զրո, ապա լույսը շրջանային բևեռացված է, քանի որ $\lambda/4$ թիթեղը շրջանային բևեռացված լույսը դարձնում է գծային բևեռացված, որը չի անցնում A₂ վերլուծիչով:

2) Եթե վերլուծիչը պտտելիս անցած լույսի ինտենսիվությունը չի փոխվում, ապա լույսը չբևեռացված է, քանի որ $\lambda/4$ թիթեղը

Ճառագայթման բոլոր բաղադրիչները փոխում է միևնույն ձևով, արդյունքում ճառագայթումը թողնելով անփոփոխ՝ չբևեռացված:

3) Եթե վերլուծիչը պտտելիս ինտենսիվությունը փոխվում է, ապա լույսը շրջանային բևեռացվածի և չբևեռացվածի խառնուրդ է: Դա բացատրվում է նրանով, որ քառորդ ալիքային թիթեղը շրջանային բևեռացված բաղադրիչը վեր է ածում գծային բևեռացվածի, չբևեռացված մասը թողնելով անփոփոխ: Վերլուծիչի որոշակի կողմնորոշման դեպքում կարելի է ամբողջովին մարել գծային բևեռացված մասը: Արդյունքում վերլուծիչի ելքում կունենանք չբևեռացված բաղադրիչի ինտենսիվության կեսին հավասար նվազագույն ինտենսիվություն:

Երրորդ դեպքում (նկ. 30) փոփոխում ենք ինչպես A_2 վերլուծիչի, այնպես էլ $\lambda/4$ թիթեղի կողմնորոշումը: Այս դեպքում $\lambda/4$ թիթեղը և A_2 վերլուծիչը պտտելիս նույնպես հնարավոր է երեք դեպք.

1) Եթե $\lambda/4$ թիթեղի որոշակի կողմնորոշման դեպքում A_2 վերլուծիչը պտտելիս անցած լույսի ինտենսիվությունը ինչ որ առավելագույն արժեքից նվազում է մինչև զրո, ապա հետազոտվող ճառագայթումն ունի էլիպսական բևեռացում: Դա բացատրվում է հետևյալ կերպ: Երբ $\lambda/4$ թիթեղի գլխավոր ուղղությունները համընկնում են բևեռացման էլիպսի առանցքների հետ, ապա էլիպսական բևեռացմամբ լույսը դառնում է գծային բևեռացված:

2) Եթե $\lambda/4$ թիթեղի որոշակի կողմնորոշման դեպքում A_2 վերլուծիչը պտտելիս անցած լույսի ինտենսիվությունը ինչ որ առավելագույն արժեքից նվազում է, սակայն զրո չի դառնում, ապա հետազոտվող ճառագայթումն ունի մասնակի էլիպսական բևեռացում (չբևեռացված և էլիպսական բևեռացմամբ լույսերի խառնուրդ է): Այս դեպքում քառորդ ալիքային թիթեղի ելքում ունենում ենք գծային բևեռացված և չբևեռացված լույսերի խառնուրդ, քանի որ $\lambda/4$ թիթեղն էլիպսով բևեռացված մասը վեր է ածում գծային բևեռացվածի:

3) Եթե $\lambda/4$ թիթեղի ինչ որ կողմնորոշման դեպքում A_2 վերլուծիչը պտտելիս անցած լույսի ինտենսիվությունը չի փոխվում, ապա ընկնող լույսը մասնակի գծային բևեռացված է, քանի որ գծային բևեռացված մասը քառորդ ալիքային թիթեղն անցնելիս դառնում է շրջանային բևեռացված:

6. Աջ և ձախ էլիպսական կամ շրջանային բևեռացված ալիքների փորձարարական տարբերակումը

Էլիպսական բևեռացմամբ լույսի հետազոտումը հանգում է բևեռացման էլիպսի գլխավոր առանցքների և էլեկտրական վեկտորի պտույտի ուղղության որոշմանը:

Եթե արդեն հայտնի է, որ լույսն ունի էլիպսական բևեռացում, բևեռացման էլիպսի առանցքները որոշում են վերլուծիչով անցած լույսի ինտենսիվության առավելագույն և նվազագույն արժեքների միջոցով: Էլեկտրական վեկտորի պտույտի ուղղությունը կարելի է գտնել քառորդ ալիքային թիթեղի օգնությամբ, որի համար հայտնի է, թե E_x և E_y գլխավոր ալիքներից, որն ունի տարածման մեծ արագություն (և, համապատասխանաբար, ավելի փոքր բեկման ցուցիչ):

Որոշակիության համար, թիթեղի վրա ξ և η կոորդինատական առանցքներն ընտրենք այնպես, որ $n_\xi < n_\eta$: Այդ դեպքում E_x գլխավոր ալիքն ունի տարածման մեծ արագություն: Տեղադրենք այդպիսի թիթեղն էլիպսական բևեռացմամբ ալիքի ճանապարհին և համընկացնենք բևեռացման էլիպսի գլխավոր առանցքները $\lambda/4$ թիթեղի գլխավոր ուղղությունների հետ: Թիթեղի ելքում E_x և E_y ալիքների փուլերի տարբերությունը $\pi/2$ -ի փոխարեն կդառնա 0 կամ π : Լույսը կդառնա գծային բևեռացված: Փուլերի տարբերության երկու հնարավոր արժեքներից՝ 0 կամ π , կիրականանա մեկը՝ այն,

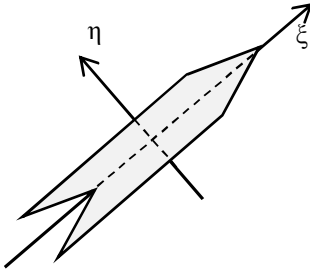
որը համապատասխանում է ալիքում առկա էլեկտրական վեկտորի պտտման ուղղությանը:

Օրինակի համար, դիտարկենք այն դեպքը, երբ էլիպսական բևեռացմամբ ալիքի տարածման ուղղությանն ընդառաջ դիտելիս էլեկտրական վեկտորը պտտվում է ժամսլաքին հակառակ ուղղությամբ: Այս դեպքում, ակնհայտ է, $\lambda/4$ թիթեղի վրա ընկնող ալիքում E_{η} տատանումը $\lambda/4$ փուլով ետ է մնում E_{ξ} տատանման համեմատ: Թիթեղն անցնելիս փուլերի տարբերությունն աճում է մինչև π : Այսպիսով, թիթեղի ելքում առաջանում են փուլերի π շեղում ունեցող գծային բևեռացված ալիքներ: Այս ալիքների գումարման արդյունքում ստացվում է գծային բևեռացված ալիք, որի էլեկտրական վեկտորը տատանվում է ξ և η կոորդինատական համակարգի 2-4 քառորդներում:

Նման դատողություններով կարելի է ցույց տալ, որ էլեկտրական վեկտորի ժամսլաքի ուղղությամբ պտտվելու դեպքում, թիթեղի ելքում գծային բևեռացված ալիքի էլեկտրական վեկտորը տատանվում է ξ և η կոորդինատական համակարգի 1-3 քառորդներում: Վերլուծիչով որոշելով թիթեղի ելքում տատանումների ուղղությունը՝ կարելի է գտնել էլիպսական բևեռացմամբ ալիքի էլեկտրական վեկտորի պտտման ուղղությունը:

7. Զգայուն երանգի թիթեղ

Քառորդ ալիքային թիթեղի մասին խոսելիս ենթադրվում էր, որ նրա համար հայտնի է երկու գլխավոր ուղղություններից այն, որին համապատասխանում է լույսի տարածման մեծ արագություն: Որոշել դա՝ կարելի է տարբեր մեթոդներով, օրինակ՝ *զգայուն երանգի թիթեղի* (այդպես են անվանում 560 նմ ալիքի երկարության կանաչ լույսի համար լրիվ՝ λ ալիքային թիթեղը):



**Նկ. 31. Չգայուն երանգի թիթեղի
գծապատկերը**

Թիթեղը, որպես կանոն, պատրաստում են նետի տեսքով (նկ. 31), որի առանցքով (ξ առանցքի ուղղությամբ) ուղղված է լույսի տարածման մեծ արագությանը համապատասխանող գլխավոր ուղղությունը:

Եթե զգայուն երանգի թիթեղը տեղադրված է խաչված

բևեռարդների միջև և նրա գլխավոր ուղղությունները չեն համընկնում բևեռարդների տատանումների թույլատրված ուղղությունների հետ, ապա սպիտակ լույսով լուսավորելու դեպքում այն ունի թվացյալ մանուշակակարմրավուն գունավորում: Դրա բացատրությունն այն է, որ զծային բևեռացված սպիտակ լույսի կանաչ բաղադրիչն անցնելով զգայուն երանգի թիթեղով չի փոխում իր բևեռացումը և փակվում է երկրորդ բևեռարդով: Կարմիր և մանուշակագույն բաղադրիչների համար թիթեղն ստեղծում է 2π -ից որոշ չափով տարբերվող փուլերի շեղում: Այդ պատճառով թիթեղի ելքում կարմիր և մանուշակագույն բաղադրիչներն ունենում են էլիպսական բևեռացում, և մասամբ անցնում են երկրորդ բևեռարդով: Այսպիսով՝ նկարագրված փորձում թիթեղի գունավորումը, այսպես ասած՝ կանաչի լրացումն է:

Եթե խաչված բևեռարդների միջև տեղադրենք նաև $\lambda/4$ թիթեղն այնպես, որ նրա գլխավոր ուղղությունները համընկնի զգայուն երանգի թիթեղի գլխավոր ուղղությունների հետ, թիթեղի գույնը կփոխվի: Եթե ադ դեպքում համակնում են թիթեղների արագ տարածման գլխավոր ուղղությունները, ապա E_ξ -ի և E_η -ի միջև կանաչ լույսի համար փուլերի տարբերությունը կդառնա $5\lambda/4$: Չգայուն երանգի թիթեղի և քառորդ ալիքային թիթեղի նման համակ-

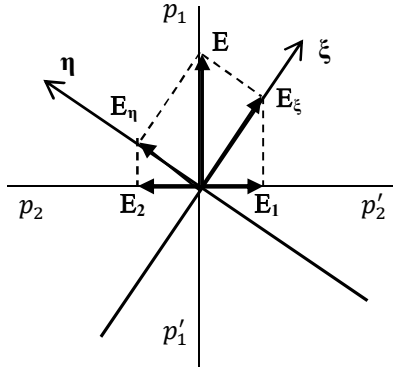
ցությունն արդեն λ -ին համապատասխանող փուլերի տարբերությանը կհամապատասխանի ավելի մեծ ալիքի երկարությամբ լույսի համար քան կանաչն է, այսինքն «ավելի կարմիր» լույսի համար: Այժմ կփակվի համակարգով անցնող լույսի սպեկտրի ոչ թե կանաչ այլ կարմիր մասը, և անցնող լույսը կթվա կանաչաերկնագույն:

Եթե զգայուն երանգի թիթեղի և $\lambda/4$ թիթեղի արագ տարածման գլխավոր ուղղությունները փոխուղղահայաց են, ապա անցած լույսը կունենա նարնջադեղնավուն գունավորում (կմարվի սպեկտրի մանուշակակապտավուն մասը):

Այսպիսով՝ գույնի փոփոխության միջոցով կարելի է որոշել թե $\lambda/4$ թիթեղի գլխավոր ուղղություններից որն է համապատասխանում լույսի տարածման մեծ արագությանը:

8. Բևեռացված փնջերի ինտերֆերենցը

Բևեռարդների միջև դրված բարակ երկբեկող թիթեղները թվում են գունավորված: Այդ գունավորումը կարելի է բացատրել որպես բևեռացված փնջերի ինտերֆերենցի արդյունք: Նկ. 32-ում բերված է բևեռացված փնջերի միջև ինտերֆերենցը պարզաբանող գծապատկերը, որը համապատասխանում է խաչված բևեռարդների դեպքին: Նկարում $p_1p'_1$ -ը բևեռիչի (առաջին պոլյարոիդի) տատանումների թույլատրելի ուղղությունն է, ξ, η -ն՝ երկբեկող թիթեղի գլխավոր ուղղությունների հետ կապված կոորդինատական համակարգը, $p_2p'_2$ -ը՝ վերլուծիչի (երկրորդ պոլյարոիդի) տատանումների թույլատրված ուղղությունը:



**Նկ. 32. Բևեռացված փնջերի ինտերֆերենցը
պարզաբանող գծապատկեր**

Երկրեկող թիթեղի ելքում E_ξ և E_η ալիքները կոհերենտ են, բայց ինտերֆերենց առաջացնել չեն կարող, քանի որ $\vec{E}_\xi \perp \vec{E}_\eta$: Վերլուծիչի ելքում E_1 և E_2 ալիքները նույնպես կոհերենտ են և դրա հետ մեկտեղ նաև բևեռացված են միևնույն հարթության մեջ: Այդ ալիքների ինտերֆերենցի (վերադրման) արդյունքը որոշվում է E_1 և E_2 ալիքների միջև փուլերի տարբերությամբ, որը կախված է ալիքի երկարությունից: Այդ բևեռացված ալիքների ինտերֆերենցի արդյունքում սպիտակ լույսով լուսավորված երկրեկող թիթեղը թվում է գունավորված:

Եթե խաչված բևեռարդների միջև տեղադրված երկրեկող թիթեղը պտտենք փնջի առանցքի շուրջը, ապա չի փոխվի ինչպես E_1 և E_2 ալիքների լայնությունների հարաբերությունը, այնպես է նրանց միջև փուլերի տարբերությունը: Դա նշանակում է, որ թիթեղի գույնն այն պտտելիս չի փոխվում, այլ փոխվում է միայն լույսի ինտենսիվությունը: Թիթեղի մեկ լրիվ պտույտի ընթացքում ինտենսիվությունը չորս անգամ դառնում է զրո: Դա տեղի է ունենում, երբ թիթեղի ξ և η գլխավոր ուղղությունները համընկնում են բևեռարդի կամ վերլուծիչի տատանումների թույլատրելի ուղղություններից որևէ մեկի հետ:

9. Շրջանաձև բևեռացված լույսի իմպուլսի մոմենտը և ֆոտոնի սպինը

Այժմ ցույց տանք, որ շրջանաձև կամ էլիպտական բևեռացված լույսն ունի նաև իմպուլսի մոմենտ:

Քանի որ ցանկացած բևեռացմամբ լույս կարելի է ներկայացնել միևնույն ուղղությամբ տարածվող աջ և ձախ շրջանաձև բևեռացված ալիքների գումարի տեսքով, կանգ առնենք պարզագույն, շրջանային բևեռացված լույսի դեպքի վրա: Կլանող միջավայրի վրա լույսի անկման դեպքում լուսային դաշտի էլեկտրական բաղադրիչը միջավայրի էլեկտրոններին կստիպի շարժվել շրջանագծով: Եթե նշանակենք էլեկտրոնի շարժման արագությունը v -ով, իսկ ուղեծրի շառավիղը՝ r -ով, ապա էլեկտրոնի իմպուլսի մոմենտը կլինի.

$$l = mvr \quad (24)$$

m -ն էլեկտրոնի զանգվածն է: Էլեկտրոնի կինետիկ էներգիան համապատասխանաբար կլինի

$$w_l = \frac{mv^2}{2} : \quad (25)$$

Քանի որ էլեկտրոնի պտտական շարժումը համարժեք է երկու փոխադրյալաց ուղղություններով տատանումների, իսկ տատանումների համար կինետիկ և պոտենցիալ էներգիաների միջինները հավասար են, ապա՝

$$w_0 = w_l + w_{ul} = 2w_l \quad (26)$$

Պարզ ձևափոխությամբ իմպուլսի մոմենտը կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով՝

$$l = mvr = 2 \cdot \frac{mv^2}{2} \cdot \frac{r}{v} = w_0 \cdot \frac{r}{v} : \quad (27)$$

Համաձայն սահմանման՝ պտտական շարժման դեպքում

$$v = \omega r, \quad (28)$$

որտեղ ω -ն էլեկտրոնի ստիպողական պտտական շարժման շրջանային հաճախությունն է, որը համընկնում է լույսի հաճախության հետ: Տեղադրելով (28) արտահայտությունը (27)-ի մեջ՝ ստանում ենք՝

$$l = \frac{w_0}{\omega} : \quad (29)$$

Մարմնի բոլոր էլեկտրոնների իմպուլսի մոմենտը հավասար լինի լույսի հետ փոխազդող բոլոր էլեկտրոնների իմպուլսների մոմենտների գումարին

$$L = \sum_i l_i = \frac{\sum_i w_0}{\omega} = \frac{W}{\omega} : \quad (30)$$

Այստեղ W -ն այն գումարային էներգիան է, որ ստացել են էլեկտրոնները լույսից: Վեկտորական տեսքով (30) կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով՝

$$\vec{L} = \frac{W}{\omega} \frac{\vec{k}}{k} , \quad (31)$$

քանի որ շրջանային բևեռացված լույսում իմպուլսի մոմենտի ուղղությունը համընկնում է դաշտի դրական պտտման առանցքի հետ ($\vec{k}$ -ին զուգահեռ կամ հակազուգահեռ): Նկատենք, որ $\vec{S} = cu \vec{k}/k$: Իսկապես,

$$\vec{H} = [\vec{n} \vec{E}] \quad (32)$$

$\vec{n} = \vec{k}/k$: Համաձայն սահմանման

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \vec{H}] = \frac{c}{4\pi} E^2 \vec{n} = cu \vec{n} , \quad (33)$$

որտեղ u -ն էներգիայի խտությունն է լուսային ալիքում: Քանի որ $W = u * V$, ուրեմն՝

$$\vec{L} = \frac{u*V}{\omega} \vec{n} = \frac{V}{\omega*c} * c * u * \vec{n} , \quad (34)$$

այդ դեպքում միավոր ծավալի իմպուլսի մոմենտը՝

$$\vec{l} = \frac{\vec{L}}{V} = \frac{1}{\omega*c} * \vec{S} = \frac{1}{4\pi\omega} [\vec{E} \vec{H}] : \quad (35)$$

10. Որոշ օգտակար փորձարարական խնդիրներ և դրանց լուծումները

Լույսի բևեռացված փնջերով փորձարարական աշխատանքների համար մենք բացահայտեցինք մի քանի օպտիկական սարքեր՝ բևեռիչ (վերլուծիչ), փուլային թիթեղներ ($\lambda/4$, $\lambda/2$, λ), որոնց միջոցով կարելի է վերլուծել բևեռացված լույսը և որոշել բևեռացումը բնութագրող մեծությունները: Այժմ քննարկենք գործնականում հաճախ հանդիպող մի քանի փորձարարական իրավիճակներ:

10.1. Ինչպե՞ս կարելի է որոշել անթափանց դիելեկտրիկի բեկման ցուցիչը:

Լուծում: Դրված խնդրի լուծման դյուրին ճանապարհներից մեկը կապված է լավ հղկված անթափանց դիելեկտրիկի մակերևույթից անդրադարձած լույսի բևեռացման ուսումնասիրման հետ: Դրա համար նկ. 12-ում M սև հայելու փոխարեն անհրաժեշտ է տեղադրել հետազոտվող դիելեկտրիկից պատրաստված հղկված թիթեղը և չափել Բրյուստերի՝ α_B անկյունը: Այդ դեպքում բեկման ցուցիչը, ինչպես հայտնի է, որոշվում է Բրյուստերի՝ $n = \tan \alpha_B$ օրենքով:

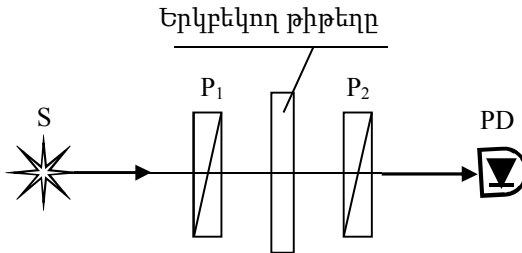
Առաջադրանք: Մեկնաբանել նկարագրված մեթոդի էությունը:

10.2. Ինչպե՞ս կարելի է որոշել երկբեկող թիթեղի գլխավոր հարթությունները:

Լուծում: Դրա համար անհրաժեշտ է երկբեկող թիթեղը տեղադրել P_1 և P_2 խաչված բևեռարդների միջև (նկ. 33): Պատելով թիթեղը լուսային ճառագայթի շուրջը՝ անհրաժեշտ է գտնել այն դիրքը, որի դեպքում համակարգի բացթողումը նվազագույնն է (ֆոտոդեդուկտի ցուցմունքը նվազագույնն է): Դժվար չէ կռահել, որ

այդ դեպքում բյուրեղի գլխավոր հարթությունները ուղղված են P_1 և P_2 բևեռարդների տատանումների թույլատրված ուղղություններով:

Առաջադրանք: Մեկնաբանել նկարագրված մեթոդի էությունը:



Նկ. 33. Երկբեկող թիթեղի գլխավոր հարթությունների ուղղությունների որոշման փորձի գծապատկերը

10.3. Ինչպե՞ս միմյանցից տարբերակել λ , $\lambda/2$ և $\lambda/4$ թիթեղները:

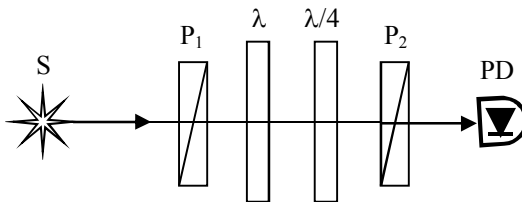
Լուծում: Նկ. 33-ում պատկերված փորձում S լույսի աղբյուրի և P_1 բևեռիչի միջև անհրաժեշտ է ավելացնել կանաչ լուսազտիչ և, որոշակիության համար, P_1 բևեռիչի տատանումների թույլատրված ուղղությունն ուղղել հորիզոնական, իսկ հետագոտվող թիթեղի գլխավոր ուղղությունները՝ հորիզոնի նկատմամբ 45° անկյան տակ:

Վերլուծիչի միջոցով որոշել թիթեղն անցած լույսի բևեռացումը: Եթե բևեռացումը գծային է, և տատանումների ուղղությունը համընկնում է P_1 բևեռարդի տատանումների թույլատրված ուղղության հետ, ապա թիթեղը λ թիթեղ է: Եթե բևեռացումը գծային է, սակայն տատանումների ուղղությունն ուղղահայաց է P_1 բևեռարդի տատանումների թույլատրված ուղղությանը, ապա այն $\lambda/2$ թիթեղ է: Վերջապես, եթե թիթեղն անցած լույսի բևեռացումը շրջանային է, նշանակում է այն $\lambda/4$ թիթեղ է:

Առաջադրանք: Մեկնաբանել նկարագրված մեթոդի էությունը:

10.4. Ինչպե՞ս կարելի է գտնել $\lambda/4$ թիթեղի մեծ և փոքր արագությունների ուղղությունները:

Լուծում: Դրա համար կարելի է սլաքի տեսք ունեցող զգայուն երանգի թիթեղը (հիշեցնենք, որ այդպես է կոչվում կանաչ լույսի համար λ թիթեղը) տեղադրել P_1 և P_2 խաչված բևեռիչների միջև (նկ. 34): Ալիքը, որի լուսային վեկտորն ունի սլաքի ուղղությունը թիթեղում տարածվում է մեծ արագությամբ, իսկ ուղղահայացը՝ փոքր:



Նկ. 34. $\lambda/4$ թիթեղի մեծ և փոքր արագությունների ուղղությունների որոշման փորձի գծապատկերը

Կարգավորենք առաջին բևեռիչի տատանումների թույլատրված ուղղությունը հորիզոնական և երկրորդ բևեռիչի (վերլուծիչի) օգնությամբ համոզվենք, որ այդ թիթեղը կանաչ լույսի համար չի փոխում բևեռացման ուղղությունը (նախորդ փորձի պայմաններում): Հանենք կանաչ լուսազտիչը և զգայուն երանգի թիթեղը (λ թիթեղը) տեղադրենք խաչված բևեռիչների միջև այնպես, որ նրա արագ տարածման ուղղությունը (սլաքի ուղղությունը) բևեռիչների թույլատրված ուղղությունների նկատմամբ կազմի 45° անկյուն: Դիտենք զգայուն երանգի թիթեղը՝ նայելով վերլուծիչի միջով և համոզվենք, որ այն ծիրանագույն է (կանաչ լույսը փակվում է վերլուծիչով, իսկ կարմիրն ու կապույտն անցնում են):

Տեղադրենք նաև $\lambda/4$ թիթեղն (նկ. 34) այնպես, որ նրա գլխավոր ուղղությունները համընկնեն զգայուն երանգի թիթեղի գլխավոր ուղղությունների հետ:

Եթե զգայուն երանգի թիթեղի գույնը կանաչաերկնագույն է, նշանակում է $\lambda/4$ թիթեղի արագ տարածման ուղղությունը համընկնում է զգայուն երանգի թիթեղի արագ տարածման ուղղության հետ (սլաքի ուղղության հետ), իսկ եթե նարնջադեղնավուն է, ուրեմն ուղղահայաց է զգայուն երանգի թիթեղի արագ տարածման ուղղությանը (սլաքին):

Առաջադրանք: Մեկնաբանել նկարագրված մեթոդի էությունը:

10.5. Ինչպե՞ս տարբերել բնական լույսը շրջանային բևեռացվածից:

Լուծում: Ակնհայտ է, որ միայն մեկ բևեռիչով անհնարին է դա անել՝ երկու դեպքում էլ վերլուծիչի պտույտն անցած լույսի ինտենսիվության փոփոխություն չի առաջացնում: Երկու դեպքում էլ այն հավասար է ընկնող լույսի ինտենսիվության կեսին:

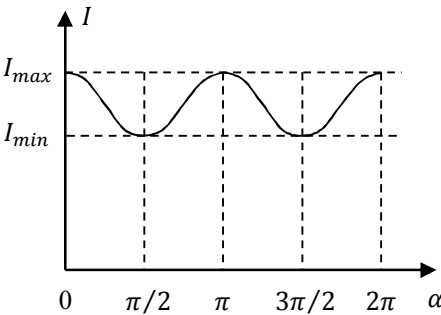
Դրա համար երկու փնջերն էլ անցկացնենք $\lambda/4$ թիթեղով: Այդ դեպքում շրջանային բևեռացված լույսը կդառնա գծային բևեռացված, քանի որ թիթեղն էլեկտրական դաշտի $\vec{E}$ վեկտորի փոխադրահայաց ուղղություններով տատանումների միջև առաջացնում է փուլերի $\pm \frac{\pi}{2}$ լրացուցիչ շեղում: Փուլերի արդյունարար շեղումը դառնում է 0 կամ π , հետևաբար թիթեղից դուրս եկող լույսը կլինի գծային բևեռացված, ինչը հեշտությամբ կարելի է գրանցել վերլուծիչով:

Բնական կամ չբևեռացված լույսն անցնելով $\lambda/4$ թիթեղը, կմնա չբևեռացված և վերլուծիչի պտտման ընթացքում նրանով անցած լույսի ինտենսիվությունը չի փոխվի և հավասար կլինի ընկնող լույսի ինտենսիվության կեսին:

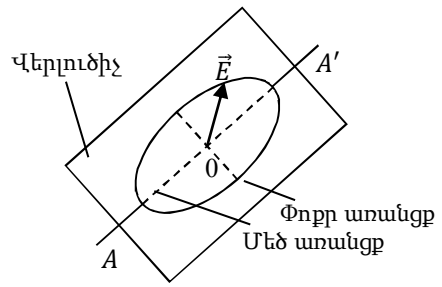
Առաջադրանք: Մեկնաբանել նկարագրված մեթոդի էությունը:

10.6. Ինչպե՞ս տարբերել էլիպսական բևեռացված լույսը մասնակի բևեռացվածից:

Լուծում: Այս դեպքում, նույնպես, միայն վերլուծիչը թույլ չի տալիս տարբերակել երկու փնջերը: Երկու դեպքում էլ վերլուծիչը փնջի շուրջը պտտելիս յուրաքանչյուր 90° -ը մեկ նրանով անցնող լույսի ինտենսիվությունը փոխվում է I_{max} արժեքից մինչև I_{min} (նկ. 35):



Նկ. 35



Նկ. 36

Էլիպսական բևեռացման դեպքում I_{max} -ը ստացվում է, երբ վերլուծիչի բացթողման ուղղությունը (տատանումների թույլատրված ուղղությունը) համընկնում է բևեռացման էլիպսի երկար առանցքի հետ, իսկ I_{min} -ը, երբ այն համընկնում է էլիպսի փոքր կիսաառանցքի հետ: Նկ. 36-ում ուրվագծորեն պատկերված է վերլուծիչի AA' բացթողման ուղղության և բևեռացման էլիպսի երկար առանցքի համընկման դեպքը:

Մասնակի բևեռացված լույսը համաձայն (9)-ի բաղկացած է $I_{phbn} = PI$ ինտենսիվությամբ բևեռացված բաղադրիչից և $I_{sphbn} = (1 - P)I$ ինտենսիվությամբ չբևեռացված բաղադրիչից, որտեղ I -ն մասնակի բևեռացված լույսի ինտենսիվությունն է, իսկ P -ն՝ բևեռացման աստիճանը: Երբ վերլուծիչի բացթողման AA' ուղղությունը

համակնում է բևեռացված բաղադրիչի բևեռացման հետ, այն ամբողջությամբ անցնում է վերլուծիչով, իսկ չբևեռացված բաղադրիչը կորցնում է ինտենսիվության կեսը: Այդ դեպքում

$$I_{max} = PI + \frac{1}{2}(1 - P)I = \left(\frac{P}{2} + \frac{1}{2}\right)I: \quad (36)$$

Պտտելով վերլուծիչն այդ դիրքի նկատմամբ 90° -ով՝ դրանով իսկ ամբողջովին փակելով բևեռացված բաղադրիչի ճանապարհը, նվազագույն ինտենսիվության համար կստանանք

$$I_{min} = \frac{1}{2}(1 - P)I: \quad (37)$$

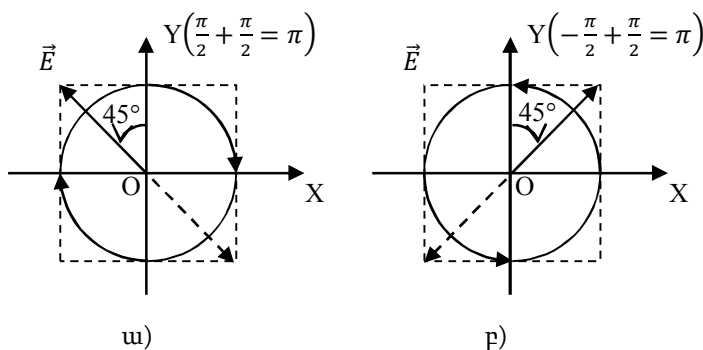
Այսպիսով, իսկապես միմիայն վերլուծիչով հնարավոր չէ տարբերել էլիպսական բևեռացմամբ լույսը մասնակի բևեռացվածից: Նրանց տարբերակման համար անհրաժեշտ է լուսային փնջի ճանապարհին տեղադրել $\lambda/4$ թիթեղը և այնուհետև վերլուծիչը: Պտտելով $\lambda/4$ թիթեղը փնջի շուրջը՝ փորձենք գտնել այնպիսի դիրք, որ նրանով անցած լույսը դառնա գծային բևեռացված: Եթե դա մեզ հաջողվում է, նշանակում է լույսն ունի էլիպսական բևեռացում, և նրա մեծ կամ փոքր առանցքներից որևէ մեկը համընկնում է $\lambda/4$ թիթեղի օպտիկական առանցքի հետ: Հակառակ դեպքում, այսինքն եթե չի հաջողվում ստանալ գծային բևեռացված լույս, նշանակում է լույսը մասնակի բևեռացված է (բևեռացված և բնական լույսերի խառնուրդ է):

Առաջադրանք: Մեկնաբանել նկարագրված մեթոդի էությունը:

10.7. Ինչպե՞ս տարբերել աջ շրջանային բևեռացված լույսը, ձախ բևեռացվածից:

Լուծում: Օգտվենք $\lambda/4$ թիթեղից, որի վրա նշված է տատանումների այն ուղղությունը, որով բևեռացված լույսը տարածվում է մեծ արագությամբ (սովորաբար, փուլային թիթեղների վրա մեծ բեկման ցուցիչին, այսինքն փոքր արագությամբ համապատասխանող ուղղությունը նշված է լինում N_g -ով, իսկ փոքր բեկման ցուցիչին համա-

պատասխանողը՝ N_p -ով): Այն տեղադրենք փնջի դիմաց այնպես, որ նրա տատանումների մեծ արագությանը համապատասխանող ուղղությունը, որով բևեռացված ալիքի փուլը, թիթեղն անցնելով առաջ է ընկնում $+\pi/2$ -ով, համընկնի OY առանցքի ուղղության հետ: Այդ դեպքում, OX օրթոգոնալ առանցքի ուղղությանը կհամապատասխանի տատանումների այն ուղղությունը, որով տարածվող ալիքի փուլը $\lambda/4$ թիթեղն անցնելով ուշանում է $\pi/2$ -ով: Աջ շրջանային բևեռացված լույսի դեպքն ուրվագծորեն պատկերված է նկ. 37 ա-ում, ձախը՝ նկ. 37 բ-ում:



Նկ. 37

Աջ շրջանային բևեռացման դեպքում Y առանցքով տատանումները X առանցքով տատանումների նկատմամբ առաջ են ընկնում $\pi/2$ -ով, իսկ այդ առանցքներով տատանումների լայնությունները միմյանց հավասար են:

Ձախ շրջանային բևեռացման դեպքում Y առանցքով տատանումները X առանցքով տատանումների նկատմամբ հետ են ընկնում $\pi/2$ -ով, իսկ այդ առանցքներով տատանումների լայնությունները միմյանց հավասար են:

Աջ բևեռացման համար (նկ. 37ա) $\lambda/4$ թիթեղը փուլերի տարբերությունն ավելացնում է $\pi/2$ -ով: Արդյունքում երկու օրթոգոնալ տատանումների փուլերի տարբերությունը դառնում է π : Դա նշա-

նակում է, որ լույսը դառնում է գծային բևեռացված, ընդ որում բևեռացման հարթությունն, այսինքն $\vec{E}$ վեկտորի տատանումները, OY և OX առանցքների նկատմամբ 45° անկյան տակ ընկած է 2-րդ և 4-րդ քառորդներում:

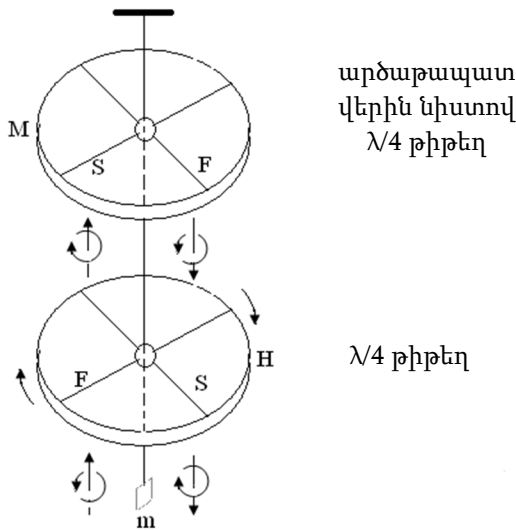
Ձախ շրջանային բևեռացման դեպքում (նկ. 37 բ) $\lambda/4$ թիթեղը փուլերի տարբերությունը կրճատում է $\pi/2$ -ով: Արդյունքում երկու օրթոգոնալ տատանումների փուլերի տարբերությունը դառնում է 0: Հետևաբար լույսը դառնում է գծային բևեռացված, ընդ որում բևեռացման հարթությունն OY և OX առանցքների նկատմամբ 45° անկյան տակ ընկած է 1-ին և 3-րդ քառորդներում:

Ելքում $\lambda/4$ թիթեղն անցած լույսի տատանումների վեկտորի ուղղությունը (հետևաբար նաև սկզբնական փնջում լուսային վեկտորի պտտման ուղղությունը) դժվար չէ որոշել վերլուծիչի օգնությամբ:

Առաջադրանք: Մեկնաբանել նկարագրված մեթոդի էությունը:

10.8. Լույսի իմպուլսի մոմենտի չափումը:

Լուծում: Գծային բևեռացված լույսը կարող է բյուրեղական միջավայրին իմպուլսի մոմենտ հաղորդել, եթե նրանով անցնելիս, փոխվի լույսի բևեռացման վիճակը: Այս երևույթն ընկած է լույսի իմպուլսի մոմենտի փորձարարական չափման հիմքում:



Նկ. 38. Լույսի իմպուլսի մոմենտը չափող սարքի գծապատկերը (Բետեյի փորձը)

Շրջանային բևեռացված լույսն՝ անցնելով $\lambda/2$ թիթեղով, փոխում է իր շրջանցման ուղղությունը՝ թիթեղիկին հաղորդելով որոշակի պտտման մոմենտ (նկ. 38): H կիսաալիքային թիթեղը կախված է $\lambda/4$ թիթեղի միջով անցնող քվարցե բարակ թելից: Շրջանային բևեռացված լույսն անցնում է H թիթեղով, այնուհետև անդրադառնում է M թիթեղի վերին մակերևույթից և նորից անցնում H թիթեղով: $\lambda/2$ թիթեղով յուրաքանչյուր անցման դեպքում թիթեղին է հաղորդվում որոշակի իմպուլսի մոմենտ (ակնառու լինելու համար նկարում ընկնող լույսը պատկերված է ձախից, անդրադարձածը՝ աջից: Հասկանալի է, սակայն, որ երկու դեպքում էլ փունջն ամբողջ թիթեղով է անցնում): Սարքի զգայնությունը մեծացնելու համար ընկնող փունջը պարբերաբար ընդհատվում է՝ մոդուլացվում է այնպիսի հաճախությամբ, որը ռեզոնանսային է քվարցե լարի ոլորման տատանումների հետ: Առաջացող տատանումները գրանցվում են m հայելուց

անդրադարձած լույսի միջոցով: Չափված մոմենտը 10^{-18} Ն-մ կարգի է:

Քվանտային տեսության համաձայն՝ լույսը էներգիայի քվանտների (տեսանելի լույսը՝ ֆոտոնների) հոսք է, որոնցից յուրաքանչյուրը կրում է

$$\varepsilon = h\nu \quad (38)$$

էներգիա: Այստեղ $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{Ջ}\cdot\text{վ}$ Պլանկի հաստատունն է: Այժմ լուսային ալիքի կրած իմպուլսի մոմենտին անդրադառնանք այս տեսանկյունից: Եթե միավոր ժամանակում (1վ) միավոր մակերեսը (1մ^2) հատող ֆոտոնների թիվը նշանակենք N -ով, ապա ակնհայտ է, որ

$$u = N h \nu: \quad (39)$$

Համապատասխանաբար, եթե յուրաքանչյուր ֆոտոն կրում է s իմպուլսի մոմենտ, ապա՝

$$L = N s: \quad (40)$$

Մյուս կողմից՝

$$L = \frac{u}{\omega} = \frac{N h \nu}{\omega} \quad (41)$$

հետևաբար՝ $s = h/2\pi = \hbar$: Ինչպես տեսնում ենք, ֆոտոնի իմպուլսի մոմենտում չկա հաճախությունը (ալիքային բնութագիրը): Սա նշանակում է ֆոտոնի իմպուլսի մոմենտը նույնն է բոլոր ֆոտոնների համար: Ընդունված է այդ մեծությունն անվանել ֆոտոնի սպին, որն էլ հենց հանդիսանում է լույսի մասնիկային բնութագիրը:

Գրականություն

1. Бутиков Е. И. Оптика. СПб.: НевскийДиалект, 2003
2. Стафеев С. К., Боярский К. К., Башнина Г. Л. Основы оптики. СПб.: Питер, 2006.
3. Матвеев А. Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.
4. Нагибина И. М., Москалев В. А., Полушкина Н. А., Рудин В. Л. Прикладная физическая оптика. М.: Высшая школа, 2002.
5. Рабек Я. Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике. М.: Мир, 1985.
6. Collet E. Polarization. SPIE, 2005.
7. Pochi Yeh, Claire Gu. Optics of LC displays. WILEY, 2009.
8. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М., Мир, 1981.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Ներածություն.....	3
1. Բնական և բնեռացված լույս.....	4
2. Գծային բնեռացված լույսի ստացումը.....	9
2.1. <i>Լույսի անդրադարձումը դիէլեկտրական թիթեղից</i>	<i>10</i>
2.2. <i>Լույսի բեկումն ապակե թիթեղում.....</i>	<i>11</i>
2.3. <i>Լույսի բեկումը երկբեկող բյուրեղներում:</i>	
<i>Բյուրեղային բևեռիչներ</i>	<i>12</i>
2.4. <i>Լույսի կլանումը դիքրոյիկ թիթեղներում:</i>	
<i>Բարակ թաղանթային բևեռիչները</i>	<i>16</i>
3. Պոլարոիդի տատանումների թույլատրված հարթության ուղղության որոշումը	19
4. Էլիպսական բնեռացմամբ լույսի ստացումը	21
4.1. <i>Լրիվ ալիքային թիթեղը.....</i>	<i>23</i>
4.2. <i>Կեսալիքային թիթեղը</i>	<i>23</i>
4.3. <i>Քառորդ ալիքային թիթեղը</i>	<i>24</i>
4.4. <i>Բարինեի փոխհատուցիչը (կոմպենսատոր).....</i>	<i>25</i>
5. Լույսի բնեռացման վիճակի նկարագրումը	27
5.1. <i>Բնեռացման աստիճանը.....</i>	<i>28</i>
5.2. <i>Կոմպլեքս հարթության մեթոդը.....</i>	<i>29</i>
5.3. <i>Ջոնսի մատրիցական մեթոդը</i>	<i>31</i>
5.3.1. <i>Օրինակներ. կիսալիքային և քառորդ լիքային թիթեղները.....</i>	<i>36</i>
5.4. <i>Ստոքսի պարամետրերը.....</i>	<i>38</i>
5.4.1. <i>Մյուլլերի մատրիցան</i>	<i>41</i>
5.5. <i>Լույսի բնեռացման վիճակի փորձարարական հետազոտումը</i>	<i>44</i>
6. Աջ և ձախ էլիպսական կամ շրջանային բնեռացված ալիքների փորձարարական տարբերակումը	48
7. Զգայուն երանգի թիթեղ.....	49
8. Բնեռացված փնջերի ինտերֆերենցը.....	51

9. Շրջանաձև բևեռացված լույսի իմպուլսի մոմենտը և ֆոտոնի սպինը	53
10. Որոշ օգտակար փորձարարական խնդիրներ և դրանց լուծումները	55
10.1. Բնչպե՞ս կարելի է որոշել անթափանց դիէլեկտրիկի բեկման ցուցիչը	55
10.2. Բնչպե՞ս կարելի է որոշել երկբեկող թիթեղի գլխավոր հարթությունները	55
10.3. Բնչպե՞ս միմյանցից տարբերակել λ , $\lambda/2$ և $\lambda/4$ թիթեղները	56
10.4. Բնչպե՞ս կարելի է գտնել $\lambda/4$ թիթեղի մեծ և փոքր արագությունների ուղղությունները	57
10.5. Բնչպե՞ս տարբերել բնական լույսը շրջանային բևեռացվածից	58
10.6. Բնչպե՞ս տարբերել էլիպսական բևեռացված լույսը մասնակի բևեռացվածից	59
10.7. Բնչպե՞ս տարբերել աջ շրջանային բևեռացված լույսը, ձախ բևեռացվածից	60
10.8. Լույսի իմպուլսի մոմենտի չափումը	62
Գրականություն	65

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Ռ. ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ, Լ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

ԼՈՒՅՍԻ ԲԵՎԵՌԱՑՈՒՄԸ ԵՎ
ՆՐԱ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Համակարգչային ձևավորումը՝ Կ. Չալաբյանի
Շապիկի ձևավորումը՝ Ա. Ստեփանյանի
Տեխ. խմբագրումը՝ Լ. Հովհաննիսյանի

Չափսը՝ 60x84 $\frac{1}{16}$: Տպ. մամուլ 4,25:
Տպաքանակը՝ 150 օրինակ:

ԵՊՀ հրատարակչություն

ք. Երևան, 0025, Ալեք Մանուկյան 1