

14. POLIARIZUOTOSIOS ŠVIESOS TYRIMAS

Užduotys

1. Ištirti tiesiai poliarizuotą šviesą.
2. Sukurti ir ištirti apskritai poliarizuotą šviesą.
3. Sukurti ir ištirti elipsiškai poliarizuotą šviesą.

Teorija

Iš elektromagnetinės šviesos teorijos išplaukia, kad šviesos bangos yra skersinės. Elektros lauko stiprio E , magnetinio lauko stiprio H ir bangos sklidimo greičio v vektoriai yra vienas kitam statmeni ir sudaro dešiniojo sraigto sistemą. Bendruoju atveju vektoriai E ir H gali būti bet kaip orientuoti sklidimo krypties atžvilgiu. Kiekvienu konkrečiu momentu jų orientacija yra laisva, todėl spindulys nėra elektromagnetinių bangų simetrijos ašis. Tokia asimetrija būdinga tik skersinėms bangoms.

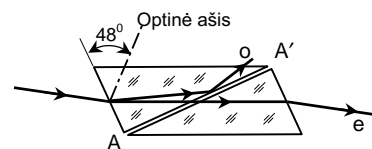
Šviesa su visomis galimomis vektoriaus E (kartu ir vektoriaus H) orientacijomis vadinama *natūraliąja* šviesa, o šviesa, kurioje E yra vienos krypties – *tiesiai poliarizuota*. Elektrinio vektoriaus virpesių plokštuma vadinama *poliarizacijos plokštuma*.

Poliarizuotai šviesai sukurti plačiai taikomas *dvejopo spindulių lūžio* kristaluose (kvarce, turmaline, lauko bei Islandijos špate ir kt.) reiškinys. Optikoje plačiai naudojamas Islandijos špatas (CaCO_3), romboedrinis kristalas (14.1 pav.). Krintant į tokį kristalą siauram šviesos pluošteliui iš jo išeina du pluošteliai net tada, kai pirminis pluoštelis į kristalo sienelę krinta statmenai. Vienas spindulys vadinamas *paprastuoju* (o), kitas – *nepaprastuoju* (e). Šių spindulių sklidimo greičiai yra skirtingi. Kai špate sklinda paprastas spindulys, špato lūžio rodiklis $n_o = c/v_o$ yra vienodas bet kokiam spindulio kritimo į kristalą kampui, kai nepaprastasis spindulys – $n_e = c/v_e$ priklauso nuo jo sklidimo krypties.

Islandijos špato kristale yra linkmė, išilgai kurios nesusidaro dvejopo spindulių lūžio, t. y. $n_o = n_e$. Krintančiosios bangos poliarizacijos pobūdis irgi nekinta. Ši linkmė vadinama *optine kristalo ašimi*. Ji sutampa su linija, jungiančia bukuosius špato kristalo kampus. Plokštuma, einanti per optinę ašį ir spindulį, vadinama *vyriausiąja kristalo plokštuma*.

Paprastoji ir nepaprastoji bangos yra visiškai tiesiai poliarizuotos tarpusavyje statmenose plokštumose. Paprastosios bangos elektrinio vektoriaus virpesiai yra statmeni vyriausiajai plokštumai, o nepaprastosios – lygiagretūs. Kai kuriuose kristaluose viena iš tų bangų sugeriam stipriau. Toks reiškinys vadinamas *dichroizmu*. Ši savybė taikoma tiesiai poliarizuotai šviesai sukurti. Tokie šviesos poliarizatoriai, vadinamieji *poliaroidais*, gaminami iš dichroinės medžiagos plėvelės, įklijuotos tarp stiklo plokštelių arba skaidrių plastikinių plėvelių. Šių poliaroidų šviesos poliarizacijos laipsnis gan didelis (per 99 %), matmenys gali būti irgi dideli, kampinė apertūra 180° , tačiau šviesos praleidžiama mažai ($\approx 30\%$), nelabai stabilūs temperatūros atžvilgiu.

Kitoks būdas poliarizuotai šviesai sukurti naudojamas *Nikolio* (Nicol) *prizmėje* (*nikolyje*). Nikolio prizmė (14.2 pav.) gaminama iš tam tikru būdu išpjauto Islandijos špato kristalo, kuris perpjaunamas palei AA' liniją ir po to suklijuojamas Kanados balzamu. Į nikolį kritęs spindulys špate skyla į du – paprastąjį ir nepaprastąjį. Jie prizmėje sklinda skirtingu greičiu skirtingomis kryptimis. Kanados balzamo lūžio rodiklio vertė ($n = 1,55$) yra tarpinė tarp Islandijos špato lūžio rodiklių verčių paprastajam ($n_o = 1,658$) ir nepaprastajam ($n_e = 1,486$) spinduliui. Parinkus tinkamą Nikolio prizmės geometriją ir tinkamą spindulių kritimo kampą, paprastasis spindulys nuo balzamo sluoksnio visiškai atsispindi, o nepaprastasis pereina prizmę.



14.2 pav. Nikolio prizmė

Iš Nikolio prizmės išėjusi šviesa yra tiesiai poliarizuota. Atsispindėjusį paprastąjį spindulį sugeria pajuodintas prizmės paviršius. Prizmę reikia padėti lygiagrečiųjų (arba beveik lygiagrečiųjų) spindulių kelyje taip, kad paprastasis spindulys patirtų visiškąjį vidaus atspindį. Didžiausias nuokrypis nuo lygiagretumo (kampinė apertūra) apie 29° .

Kai šviesos elektrinis vektorius bangoje kinta pagal tam tikrą dėsnį, šviesos banga yra poliarizuota. Kai bangos elektrinio vektoriaus modulis nekinta, o jo galas erdvėje nuosekliai brėžia spiralės pavidalo (projekcijoje apskritimo) kreivę, tokia banga vadinama *apskritai poliarizuota*, o kai kinta modulis ir jo galas nuosekliai brėžia elipsę – *elipsiškai poliarizuota*. Šių rūšių bangos yra nevienalytės, jos sukuriamos sumuojant dvi bangas, poliarizuotas tarpusavyje statmenose plokštumose ir sklindančias ta pačia kryptimi.

Tarkime, kad viena kryptimi z sklinda dvi tarpusavyje statmenose plokštumose tiesiai poliarizuotos monochromatinės bangos:

$$E_x = E_{10} \sin(\omega t - k z), \quad (14.1)$$

$$E_y = E_{20} \sin(\omega t - k z + \delta); \quad (14.2)$$

čia δ – pradinis virpesių fazių skirtumas, k – bangos skaičius.

Dėl superpozicijos $E = E_x + E_y$. Sudarykime atstojamąjį virpesį nusakančios kreivės lygtį. (14.2) išraišką galima užrašyti taip:

$$E_y = E_{20} \sin(\omega t - kz) \cos\delta + E_{20} \cos(\omega t - kz) \sin\delta.$$

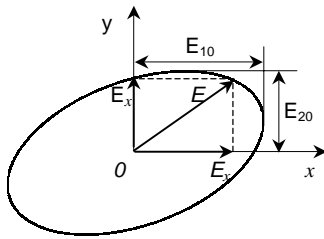
Panaudojus (14.1) išraišką gaunama tokia lygtis:

$$E_y = E_{20} \frac{E_x}{E_{10}} \cos\delta + E_{20} \sqrt{1 - \frac{E_x^2}{E_{10}^2}} \sin\delta.$$

Iš čia

$$\frac{E_x^2}{E_{10}^2} + \frac{E_y^2}{E_{20}^2} - 2 \frac{E_x}{E_{10}} \frac{E_y}{E_{20}} \cos\delta = \sin^2\delta. \quad (14.3)$$

Tai elipsės lygtis, kurios grafikas pavaizduotas 14.3 pav. Jei $\cos\delta = 0$ ir $\sin\delta = \pm 1$, tai



14.3 pav. Dviejų tarpusavyje statmenųjų virpesių sudėtis (bendrasis atvejis)

$$\frac{E_x^2}{E_{10}^2} + \frac{E_y^2}{E_{20}^2} = 1$$

ir elipsės ašys sutampa su koordinatinių x ir y ašimis.

Sumuojant dvi tarpusavyje statmenas tiesiai poliarizuotas bangas, kai fazių skirtumas tarp jų $\delta = \pi/2 + m\pi$ (čia $m = 0, 1, 2, 3, \dots$), sukuriama atstojamoji *elipsiškai poliarizuota* banga.

Kai $E_{10} = E_{20}$, elipsė tampa apskritimu, kurio lygtis nusako *apskritai poliarizuotą* šviesą.

Kai $\cos\delta = \pm 1$ ir $\sin\delta = 0$, tai (14.3) lygtis yra tokio

pavidalo:

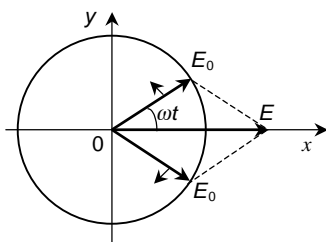
$$\left(\frac{E_x}{E_{10}} \mp \frac{E_y}{E_{20}} \right)^2 = 0,$$

t. y. gaunamos tiesių lygtys:

$$\frac{E_x}{E_{10}} - \frac{E_y}{E_{20}} = 0 \quad \text{ir} \quad \frac{E_x}{E_{10}} + \frac{E_y}{E_{20}} = 0.$$

Atstojamojo vektoriaus E galas juda tiese. Susidariusi *tiesinės poliarizacijos* banga yra ribinis elipsinės poliarizacijos atvejis. Iš to išplaukia, kad bet kokios poliarizacijos elektromagnetinė banga yra dviejų tiesinės poliarizacijos bangų, kurių vektorius E virpa tarpusavyje statmenose plokštumose, superpozicijos padarinys.

Galima įrodyti, kad *tiesiai poliarizuota banga atsiranda dėl apskritai poliarizuotų bangų superpozicijos*.



14.4 pav. Dviejų apskritai poliarizuotų bangų sudėtis

Tarkime, kad yra kairinės ir dešinės apskritiminės poliarizacijos bangos, kurių elektrinio vektoriaus projekcijos į koordinatinių ašis x ir y (14.4 pav.) reiškiamos taip:

$$E_{1x} = E_0 \cos\omega t, \quad E_{1y} = E_0 \sin\omega t,$$

$$E_{2x} = E_0 \cos\omega t, \quad E_{2y} = -E_0 \sin\omega t.$$

Dėl superpozicijos gaunama:

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} = 2 E_0 \cos\omega t,$$

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} = 0,$$

t. y. susidaro tiesiai poliarizuota banga. Atstojamasis vektorius E nukreiptas x ašies kryptimi. Jei tarp atskirų virpesių būtų fazių skirtumas, tai atstojamųjų virpesių linija su x ašimi sudarytų tam tikrą kampą.

Poliarizuotąsias bangas galima sukurti optiškai izotropinėmis plokštelėmis (kvarco, žėručio ir kt.), išpjautomis lygiagrečiai su optine kristalo ašimi. Statmenai krintantis šviesos pluošte-

lis plokštelėje skyla į paprastąjį ir nepaprastąjį, bet abu sklinda tą pačią pirmąją linkmę. Iš plokštelės išėjusios atstojamosios bangos poliarizacijos pobūdis bendruoju atveju pakinta.

Tarkime, kad į dvejopai šviesą laužiančią plokštelę krinta tiesiai poliarizuota monochromatinė λ ilgio banga (14.5 pav.). Kadangi plokštelėje paprastosios ir nepaprastosios bangų fazinis sklidimo greitis nevienodas, išėjime tarp jų susidaro fazių skirtumas δ , kuris priklauso nuo plokštelės storio d :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d.$$

Norint dvejopai šviesą laužiančia plokšte sukurti apskritai poliarizuotą šviesą, fazių skirtumas turi būti lygus

$$\delta = (2k + 1) \frac{\pi}{2};$$

čia k – sveikasis skaičius. Ši sąlyga tenkinama tinkamai parinkus plokštelės storį, t. y.

$$(n_o - n_e) d = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}.$$

Tokia plokštelė vadinama *ketvirčio bangos ilgio plokšte*.

Banga apskritai poliarizuojama tada, kai krintančiosios tiesiai poliarizuotos bangos poliarizacijos plokštuma su plokštelės optine ašimi sudaro $\pm \pi/4$ kampą. Tada abiejų bangų amplitudės vienodos ir plokštelė papildo fazių skirtumą dydžiu $\pi/2$.

Jei plokštelės storis toks, kad bangų eigos skirtumas

$$(n_o - n_e) d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

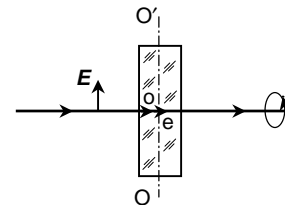
tai fazių skirtumas $\delta = (2k + 1)\pi$ ir šviesa išlieka tiesiai poliarizuota, tik elektrinio vektoriaus virpesių linkmė pakinta 2α kampu (α – kampas tarp plokštelės optinės ašies ir krintančios šviesos elektrinio vektoriaus).

Jei plokštelės storis toks, kad

$$(n_o - n_e) d = k \lambda,$$

tai išėjime sukuriama tiesiai poliarizuota šviesa su tokia pat elektrinio vektoriaus virpesių plokštuma kaip ir įėjime.

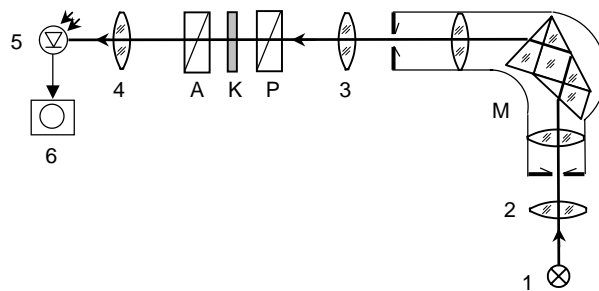
Reikalingas fazių skirtumas susidaro tik tam tikro dažnio bangai. Tą lemia tiesioginė fazių skirtumo δ priklausomybė nuo dažnio ω ir lūžio rodiklių dispersija.



14.5 pav. Šviesos sklidimas per kristalo plokštelę.

Tyrimas

Tyrimo aparatūros schema pavaizduota 14.6 pav. Kaitinamosios lempuotės (1) šviesą kondensorius (2) nukreipia į monochromatoriaus (M) įeinamąjį plyšį. Monochromatiniai spinduliai, išėję iš monochromatoriaus pro išeinamąjį plyšį, kondensoriumi (3) lygiagrečiu pluoštu nukreipiami į tiriamuosius objektus (P – poliarizatorių poliaroidą, K – ketvirčio bangos ilgio žėručio plokštelę, A – analizatorių poliaroidą) ir lęšiu (4) fokusuojami į fotojutiklį (5). Susikūrusi fotosrovė, proporcinga krintančiosios šviesos intensyvumui, stiprinama ir matuojama prietaisu (6). Poliarizatorių, žėručio plokštelę ir analizatorių galima sukinti apie optinę sistemos ašį ir keisti poliarizacijos plokštumų ir kristalo optinės ašies tarpusavio orientaciją.



14.6 pav. Tyrimo įrangos schema

Tiesiai poliarizuota šviesa sukuriama poliaroidu P. Išimama žėručio plokštelė ir apie optinę sistemos ašį sukinėjamas analizatorius A iki matuoklio (6) rodmenys tampa didžiausi. Monochromatoriaus plyšiais šviesos intensyvumas reguliuojamas taip, kad matuoklio rodmenys skalėje būtų pakankamai dideli. Uždengus šviesos pluoštelį patikrinama matuoklio nulinis rodmuo.

Nuosekliai sukant analizatorių A per dvi padalas, išmatuojamas fotosrovės stipris, kuris proporcingas krintančios šviesos intensyvumui. Matuojama visam analizatoriaus sūkiui apie ašį.

Polinėje koordinatinių sistemoje nubrėžiamas išmatuoto šviesos intensyvumo (fotosrovės stiprio) priklausomybės nuo kampo tarp poliaroidų grafikas. Po to nubrėžiama teorinė priklausomybė, kuri apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha ;$$

čia I_0 – krintančios šviesos intensyvumas (vertė parenkama laisvai), α – kampas tarp poliaroidų poliarizacijos plokštumų.

Apskritai poliarizuota šviesa sukuriama poliaroidu P ir ketvirčio bangos ilgio ($\lambda/4$) plokšte K. Tarp poliaroido poliarizacijos plokštumos ir $\lambda/4$ plokštelės optinės ašies (arba jai statmenos linkmės) turi būti 45° kampas. Plokštelės pagrindinių krypčių orientacija poliaroido poliarizacijos plokštumos (laisvai pasirinktos) atžvilgiu nustatoma taip. Analizatorius sukryžiuojamas su poliarizatoriumi. Tada šviesa pro sistemą nepereina ir matuoklis srovės

neregistruoja. Tarp analizatoriaus ir poliarizatoriaus dedama $\lambda/4$ plokštelė ir ji pamažu sukama apie sistemos ašį. Monochromatoriaus plyšių plotis parenkamas optimaliai fotosrovės vertei. Išmatuojamas fotosrovės stipris kiekvienai plokštelės padėčiai. Matavimai atliekami visam plokštelės sūkiui.

Polinėje koordinatinių sistemoje brėžiamas išmatuotų intensyvumų ir plokštelės pasukimo kampo priklausomybės grafikas. Iš jo nustatomos keturios plokštelės padėties, atitinkančios didžiausias fotosrovės vertes. Pasukus plokštelę į vieną kurią nors iš šių padėčių turėtų susidaryti apskritai poliarizuota šviesa. Ji tiriama tolygiai sukant analizatorių ir matuojant srovę kiekvienai analizatoriaus padėčiai per visą sūkį. Taip matuojama ir kitoms didžiausią šviesos intensyvumą atitinkančioms plokštelės padėtimis. Suvidurkinus matavimų duomenis, polinėje koordinatinių sistemoje brėžiamas intensyvumo ir analizatoriaus pasukimo kampo priklausomybės grafikas. Palyginimui brėžiamas apskritimas.

Elipsiškai poliarizuota šviesa taip pat sukuriama naudojant poliaroidą ir $\lambda/4$ plokštelę. Šiuo atveju plokštelė pasukama 20° kampu iš padėties, kuri atitiko apskritai poliarizuotos šviesos sukūrimo sąlygas. Toliau šviesa tiriama analogiškai sukant analizatorių ir matuojant fotosroves. Brėžiamas šviesos intensyvumo ir analizatoriaus pasukimo kampo priklausomybės grafikas.

Po to nustatoma elipsiškai poliarizuotos šviesos vektoriaus virpesių forma. Tam naudojama anksčiau nubrėžta figūra. Išmatuojama didžiausios ir mažiausios stygos ilgiai l . Elipsės pusašių santykis apskaičiuojamas ištraukus kvadratinę šaknį iš tų stygų ilgių santykio:

$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{l_{\max}}{l_{\min}}}$$

Brėžiama elipsė:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Toliau apskritai ir elipsiškai poliarizuota šviesa tiriama pakeitus iš monochromatoriaus išėjusios šviesos bangos ilgį.