

23 darbas

POKELSO REIŠKINYS

Užduotys

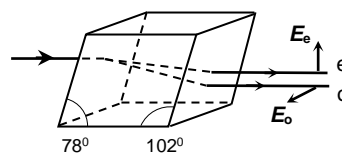
1. Sujustuoti Pokelso reiškinių stebėjimo optinę schemą.
2. Patikrinti tiesinę kristalo lūžio rodiklio anizotropijos priklausomybę nuo elektrinio lauko stiprio.
3. Nustatyti Pokelso ląstelės pusės bangos įtampą ir reiškinių pastoviąją.

Teorija

Šviesos sklidimui anizotropinėje terpėje būdingi saviti ypatumai.. Medžiagos savybių anizotropiją lemia medžiagos sandara.

Optinę anizotropiją, t. y. optinių savybių skirtumus įvairiomis kryptimis kristalinėje terpėje lemia skirtinga terpės reakcija į krintančios šviesos poveikį priklausomai nuo jos sklidimo krypties. Reakcija pasireiškia elektros krūvių poslinkiu veikiant šviesos bangos laukui. Optiškai anizotropinėse terpėse šis poslinkis priklauso nuo krypties, t. y. terpės dielektrinė skvarba (kartu ir lūžio rodiklis) skirtinga įvairiomis šviesos bangos elektrinio vektoriaus kryptimis. Terpės lūžio rodiklis (kartu ir šviesos greitis) priklauso nuo šviesos bangos sklidimo krypties ir jos poliarizacijos plokštumos orientacijos. Stebimas optinis reiškinys, kuris vadinamas *dvejopu spindulių lūžiu*. Tai šviesos spindulio dvejimasis jam sklindant anizotropinėje terpėje dėl lūžio rodiklio (kartu ir bangos greičio) priklausomybės nuo bangos poliarizacijos ir bangos vektoriaus orientacijos kristalografinių ašių atžvilgiu, t. y. nuo sklidimo krypties. Krintant šviesos bangai į anizotropinės terpės paviršių, terpėje atsiranda dvi lūžusios skirtingos poliarizacijos bangos, sklindančios skirtingomis kryptimis nevienodu greičiu. Dvejopas spindulių lūžis atrastas 1670 m. stebint šviesą, sklindančią pro kalcitą (Islandijos špatą).

Jei į pakankamai storą kalcito kristalą nukreipiamas siauras šviesos pluoštelis, tai po lūžimo susidaro du šviesos pluošteliai (23.1 pav.) net ir tada, kai pirminis pluoštelis į kristalo sienelę krinta statmenai. Lūžęs pluoštelis skyla į du: vienas yra kritusiojo tęsinys, o kitas nukrypsta ir jo lūžio kampas nelygus nuliui. Dėl šio reiškinio ir kitų nuokrypių nuo įprastų lūžio dėsnų pirmasis pluoštelis vadinamas *paprastuoju* (o), o antrasis – *nepaprastuoju* (e). Paprastojo spindulio atžvilgiu kalcito lūžio rodiklis n_o nepriklauso nuo spindulio kritimo į kristalą krypties, o nepaprastojo spindulio – n_e priklauso.



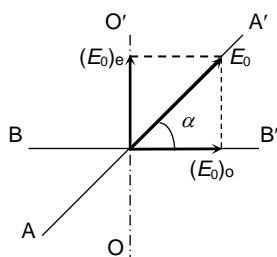
23.1 pav. Šviesos sklidimas pro kalcitą

Nuo kristalo savybių ir simetrijos priklauso, koks būna dvejopas spindulių lūžis – tiesinis ar elipsinis.

Skaidriuose nemagnetiniuose kristaluose (be erdvinės dispersijos) vyksta tiesinis dvejopas spindulių lūžis – atsiranda dvi tiesiai poliarizuotos bangos, kurių indukcijos vektoriai tarpusavyje statmeni. Skaidriuose magnetiniuose kristaluose be erdvinės dispersijos taip pat vyksta tiesinis dvejopas spindulių lūžis, tačiau dviejų susikūrusių bangų vektoriai nestatmeni. Skaidriuose nemagnetiniuose kristaluose su erdvine dispersija krintančioji banga skyla į dvi elipsiškai poliarizuotas bangas, sklindančias skirtingomis kryptimis nevienodu greičiu. Jų elipsių ašys statmenos, o vektorių galų judėjimo kryptys priešingos – tai elipsinis dvejopas spindulių lūžis.

Priklausomai nuo anizotropinės terpės simetrijos joje yra kelios išskirtinės kryptys, kuriomis nebūna dvejopo spindulių lūžio. Šios kryptys vadinamos *optinėmis ašimis*.

Susikūrusios kalcite paprastoji ir nepaprastoji bangos yra tiesiai poliarizuotos tarpusavyje statmenose plokštumose. Paprastosios bangos elektrinio vektoriaus virpesiai statmeni vyriausiajai plokštumai, o nepaprastosios – lygiagretūs su ja.



23.2. pav. Paprastojo ir nepaprastojo spindulių vektorių orientacija kristale

Kai į kalcitą krinta natūralioji šviesa, tai paprastojo ir nepaprastojo spindulių intensyvumai yra vienodi. Tarkime, kad į kristalą krinta tiesiai poliarizuota šviesa. Bendruoju atveju iš kristalo išeis du tiesiai poliarizuoti nevienodo intensyvumo spinduliai. 23.2 pav. (spindulys krinta statmenai brėžinio plokštumai) pavaizduota: OO' – kristalo optinė ašis, nepaprastosios bangos elektrinio vektoriaus virpesių linkmė; BB' – paprastosios bangos elektrinio vektoriaus virpesių linkmė; AA' – į kristalą krintančios plokščiosios bangos elektrinio vektoriaus virpesių linkmė.

Šviesos interferencijos reiškiniuose be koherentiškumo, labai svarbi interferuojančiųjų bangų poliarizacija. Dvejopo spindulių lūžo reiškinyje atsiranda dvi koherentinės tarpusavyje statmenai poliarizuotas bangos (paprastoji ir nepaprastoji). Susitikdamos jos bendruoju atveju sukuria elipsiškai poliarizuotą bangą, interferencinio vaizdo nematome. Tačiau jei elektrinio vektoriaus virpesių plokštumos kuriuo nors būdu (pvz, naudojant nikolį arba poliaroidą) sutapdinamos vienoje plokštumoje, tai galima pamatyti interferenciją. Reiškiny, vykstantis susidedant vienodos poliarizacijos koherentinėms šviesos bangoms, vadinamas *poliarizuotųjų bangų interferencija*, dėl to atsiradusios anizotropinės medžiagos spalvos – *chromatinė poliarizacija*. Bendresniu chromatinės poliarizacijos

glaustiniuose spinduliuose atveju pro dvejopu spindulių lūžiu pasižyminčią plokštelę perėjęs tiesiai polirizuotas paprastas ir nepaprastasis spindulys įgyja fazių skirtumą

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h}{\cos \mathcal{G}} (n_o - n_e) \sin^2 \theta ;$$

čia \mathcal{G} – vidutinis spindulių lūžio kampas storio h plokštelėje, n_o ir n_e – paprastas ir nepaprastasis plokštelės lūžio rodiklis, θ – vidutinis kampas tarp lūžusių spindulių krypties ir kristalo optinės ašies.

Kai vienašio kristalo plokštelės optinė ašis lygiagreti su glaustinių spindulių kūgio ašimi, vienodo fazių skirtumo geometrinė vieta yra bendracentriai apskritimai, kurių centras yra optinėje ašyje. Interferencinis vaizdas sudarytas iš tamsių ir šviesių (arba spalvotų) bendracentrių žiedų. Būdingas tokio interferencinio vaizdo požymis yra tamsus arba šviesus kryžius (23.3 a pav.), kertantis šiuos žiedus dviem tarpusavyje statmenom kryptim. Toks interferencinis vaizdas vadinamas *interferencine*, arba *konoskopine*, figūra.



a b
23.3 pav. Konoskopinės figūros

Kristalo paviršiaus taškų, kuriuose $\varphi = \text{const}$ geometrinė vieta, vadinama izochromatine kreive (pastovios spalvos kreive). Erdvėje susidaro izochromatinis paviršius. Vienašio kristalo izochromatinis paviršius artimas sukimosi hiperboloidui, kurio ašis sutampa su optine kristalo ašimi.

23.3 b pav. pavaizduota konoskopinė figūra, kai vienašio kristalo plokštelės optinė ašis statmena glaustinių spindulių kūgio ašiai.

Dvejopas spindulių lūžis vyksta ne tik natūraliose anizotropinėse terpėse, bet ir terpėse su dirbtine anizotropija, atsirandančia dėl asimetrinės deformacijos, vidinių įtempimų (*fototamprumas*), akustinio lauko (*akustooptika*), elektrinio [*Kero* (*Kerr*) *reiškinys*] arba magnetinio [*Kotono-Mutono* (*Cotton-Mouton*) *reiškinys*] lauko, anizotropinio kaitinimo poveikio. Dvejopas spindulių lūžis gali vykti skysčio srovėse,

jei skysčio arba ištirpintos medžiagos molekulės yra nesferinės ir joms būdingas anizotropinis poliarizuotumas. Sugeriančiuose kristaluose dvejopas spindulių lūžis gana sudėtingas, nes bangos sugeriančiose terpėse yra nevienalytės ir sugertis anizotropinė (*dichroizmas*).

Optinės anizotropijos atsiradimą išoriniame elektriniame lauke 1879 m. aptiko Dž.Keras (*J.Kerr*). **Kero reiškinys** vyksta skysčiuose ir dujose. Jo stebėjimo schema pavaizduota 20.3 pav. Tiriamosios medžiagos pripildytas kondensatorius K dedamas tarp dviejų sukryžiuotų poliarizatorių P_1 ir P_2 taip, kad šviesa, kai nėra elektrinio lauko, per sistemą nepereitų. Atsiradus elektriniam laukui, kurio stiprio vektorius E su poliarizatorių plokštumomis sudaro 45° kampą, terpė tampa optiškai anizotropinė su optine ašimi elektrinio lauko kryptimi. Iš kondensatoriaus išėjusi šviesa yra elipsiškai poliarizuota ir iš dalies pereina pro analizatorių P_2 . Kompensatoriumi P (arba $\lambda/4$ plokštele) galima išmatuoti fazių skirtumą tarp nepaprastosios ir paprastosios bangos ir nustatyti tiriamosios medžiagos lūžio rodiklių skirtumą ($n_e - n_o$) elektriniame lauke.

Medžiagų optinę anizotropiją elektriniame lauke lemia pačių molekulių anizotropija. Molekulės anizotropija, kartu ir jos indėlis į terpės lūžio rodiklį, priklauso nuo molekulės orientacijos šviesos bangos elektrinio lauko stiprio krypties atžvilgiu. Kai nėra išorinio lauko, anizotropinės molekulės orientuotos netvarkingai ir terpė yra makroskopiškai izotropinė. Išoriniame elektriniame lauke molekulės daugiausia orientuojasi elektrinio lauko kryptimi ir terpė tampa optiškai anizotropinė, t. y. šviesos bangos sklidimo greitis priklauso nuo bangos poliarizacijos ir jos sklidimo krypties.

Dvejopas spindulių lūžis gali atsirasti ne tik išoriniame nuolatiniam, bet ir kintamajame elektriniame lauke. Lazeriais galima sukurti labai stiprius aukšto dažnio elektrinius laukus. Kai per ląstelę pereina galingas lazerio impulsas, skystis tampa anizotropinis.

Jei terpės anizotropinės molekulės turi nuolatinį magnetinį momentą, jų vyraujanti orientacija gali susidaryti nuolatiniam magnetiniame lauke. Todėl gana stipriame magnetiniame lauke terpė tampa anizotropinė ir joje vyksta dvejopas spindulių lūžis. Tai **Kotono-Mutono** (*Cotton–Mouton*) **reiškinys**, atrastas 1905 m. Šis reiškinys daug kuo panašus į Kero reiškinį.

Kristalo optinių savybių pokytis nuo išorinio elektrinio lauko poveikio išryškėja elektrooptiniame **Pokelso** (*Pockels*) **reiškinyje**. Kai kuriuose kristaluose (pvz., kalcio dihidrofosfate, ličio niobate), esančiuose išoriniame elektriniame lauke, pasireiškia dvejopas spindulių lūžis. Viešašiam kristale palei optinę ašį šviesa sklinda vienu faziniu greičiu $v_o = c/n_o$ nepriklausomai nuo poliarizacijos. Jei kristalas neturi simetrijos centro, tai esant išoriniam elektriniam laukui, bangų su ortogonaliomis poliarizacijos kryptimis faziniai greičiai palei šią ašį yra skirtingi.

Kai kristalo optinė ašis ir išorinis elektrinis laukas lygiagretus su šviesos spinduliu, išoriniame elektriniame lauke sukuriama antroji optinė ašis, statmena pirmajai. Indukuotoji optinė ašis yra statmena šviesos sklidimo kryptčiai ir šios ašies atžvilgiu šviesa patiria dvejopą lūžį. Lūžio rodiklių skirtumas proporcingas elektrinio lauko stipriui E (*tiesinis Pokelso reiškinys*):

$$n_e - n_o = \alpha E;$$

čia α – pastovioji.

Indukuotosios optinės ašies krypttis plokštumoje, statmenoje šviesos spindulio kryptčiai, priklauso nuo kristalo orientavimo.

Pokelso reiškinys būna ne tik elektriniame lauke, nukreiptame kristalo optine ašimi (*išilginis Pokelso reiškinys*), bet ir statmena jai kryptimi (*skersinis Pokelso reiškinys*), tačiau abiem atvejais šviesa turi sklisti kristalo optine ašimi.

Pokelso reiškinys taip pat kaip ir Kero reiškinys neįnertiškas, todėl jis plačiai taikomas sparčioms optinėms užtūroms bei aukštadažniams šviesos modulatoriams kurti. Statmenai optinei ašiai išpjauta KDP (kalio dihidrofosfato) plokštelė įstatoma tarp sukryžiuotų nikolių. Toks įrenginys vadinamas *Pokelso ląstele*. Praėjusios pro tokią ląstelę šviesos intensyvumo priklausomybė nuo išorinio lauko įtampos U reiškia dėsniu:

$$I \sim \sin^2[\pi U / (2U_{\lambda/2})];$$

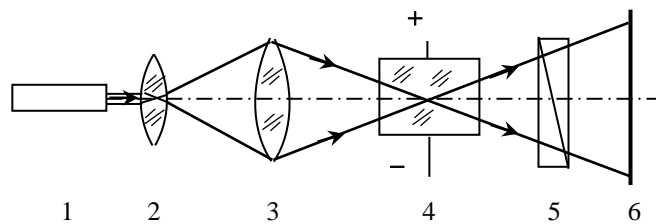
čia $U_{\lambda/2}$ – mažiausia įtampa, kuriai esant ortogonalų polirizacijų bangų fazių postūmis lygus π .

Tyrimas

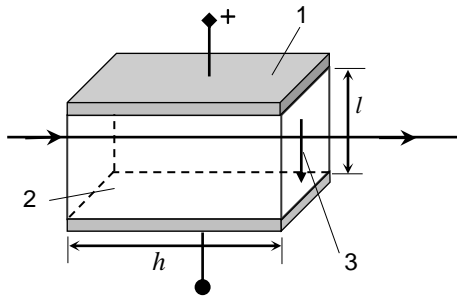
Pokelso reiškinio tyrimo optinė schema pavaizduota 23.4 pav. Ant bėgio visi objektai statomi taip, kad jie būtų vienoje optinėje ašyje palei lazerio (lazerio sklaidžiamos bangos yra tiesiai poliarizuotos) spindulį.

Lęšiu 2 išskleidžiamas lazerio spindulį pluoštas, o lęšiu 3 suglaudžiamas ir spindulį sankirtoje statoma Pokelso ląstelė 4. Pokelso ląstelė (23.5 pav.) pagaminta iš

ličio niobato (LiNbO_3) kristalo ir išpjauta taip, kad jo optinė ašis būtų lygiagreti su kristalo įėjimo ir išėjimo paviršiais. Už ląstelės statomas poliarizatorius ir ekrane 6 (arba pro okuliarą) stebimas interferencinis vaizdas (konoskopinė figūra), sudarytass iš



23.4 pav. Tyrimo optinė schema



23.5 pav. Pokelso ląstelė
(1 – kondensatoriaus plokštės, 2 – kristalas,
3 – kristalo optinės ašies ir lauko kryptis)

hiperbolinių juostelių šeimų, pasuktų viena kitos atžvilgiu 90° kampu (23.3 b pav.). Įjungus nuolatinės srovės šaltinį, ląstelėje sukuriama elektrinis laukas ir konoskopinėje figūroje stebima, kaip tamsios interferencinės juostelės keičiasi vietomis su šviesiomis dėl eigos skirtumo tarp paprastojo ir nepaprastojo spindulio pokyčio. Kai tamsios interferencinės juostelės užima šviesių vietą, optinis spindulių eigos skirtumas pakinta $\frac{1}{2}\lambda$:

$$\Delta = (n_e - n_o) h = \frac{1}{2}\lambda .$$

Kadangi Pokelso reiškinyje $(n_e - n_o) h = \alpha E$, tai

$$\alpha E_{\lambda/2} h = \alpha \frac{U_{\lambda/2}}{l} = \frac{\lambda}{2} .$$

Iš čia Pokelso reiškinio pastovioji

$$\alpha = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{l}{h} \right) \frac{1}{U_{\lambda/2}} .$$

Keičiant įtampą tarp kondensatoriaus plokštelių šviesios ir tamsios juostelės keičiasi vietomis kai tenkinama sąlyga $\Delta = m \frac{1}{2}\lambda$ (čia $m = 2, 3 \dots$ konoskopinių figūrų pasikartojimo eilė). Šiuo tyrimu galima patikrinti tiesinį Pokelso reiškinio pobūdį – įtampų vertės, kurioms esant minėtosios juostelės keičiasi vietomis, turi būti kartotinės $U_{\lambda/2}$, t.y. $U_{\lambda/2,m} = m U_{\lambda/2}$.

Atlikus matavimus, grafiškai vaizduojama $U_{\lambda/2,m}$ priklausomybė nuo m ir iš tiesės polinkio randama $U_{\lambda/2}$. Žinant $U_{\lambda/2}$ vertę skaičiuojama Pokelso reiškinio pastovioji α .