



Projekts: **Augstākā līmeņa fizikas studiju attīstība Latvijas Universitātē**
Projekta līguma Nr.: 2005/0114/VPD1/ESF/PIAA/04/APK/3.2.3.2/0009/0063
LU Reģistrācijas Nr.: ESS 2005/7

Latvijas Universitāte
Fizikas un matemātikas fakultāte
Fizikas maģistra programma

Fizi5011 : Cietvielu un materiālu fizikas laboratorija
Laboratorijas darba apraksts, autors Jānis Harja

Šķidro kristālu optiskās īpašības



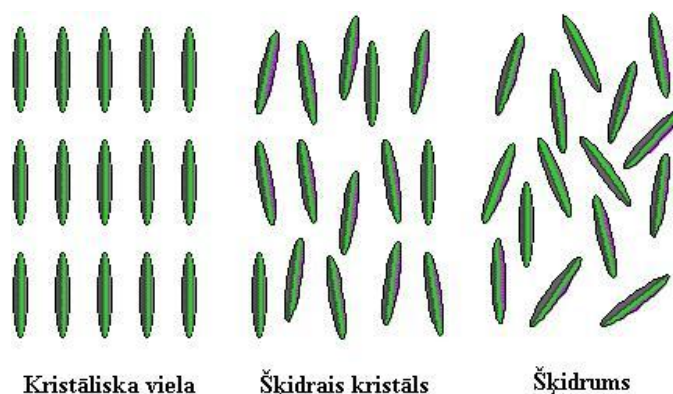
1. Darba mērķi

Attīstīt eksperimentālās un pētnieciskās prasmes; mācīties noteikt optimālos eksperimenta nosacījumus sistēmai "diožu lāzers - fotodetektors", mācīties izmērīt šķidro kristālu šūnu elektrooptiskos raksturlielumus, prast aprēķināt fāžu nobīdi un dubultlaušanu no iegūtajiem datiem, izprast šķidro kristālu ierīču darbības pamatprincipus.

2. Teorētiskais pamatojums

Vēsturisks apskats.

Jēdzienu "šķidrie kristāli" ievada vācu fiziķis Otto Lēmans 19.gs. otrajā pusē, lai raksturotu vielas stāvokli, kas nav ne šķidr, ne kristālisks. Pētīt šādu vielu stāvokli viņu pamudināja austriešu botāniķis Frīdrihs Reinicers, kurš 1888.gadā Vīnes ķīmiķu biedrībā ziņoja par holesterīna fizikāli ķīmisko īpašību pētījumiem. Reinicers bija ievērojis, ka holesterilbenzoātam ir divi kušanas punkti un ka šo temperatūru tuvumā novērojami interesanti krāsu efekti. Vielas kristāli vispirms kūst $145,5^{\circ}\text{C}$ temperatūrā, veidojot duļķainu gaismu izkliedējošu šķidrumu. Paaugstinoties temperatūrai, pie $178,5^{\circ}\text{C}$ šķidrums kļūst dzidrs. 1888.gada 14.martā Reinicers uzrakstīja 16 lapušu garu vēstuli tolaik pazīstamajam kristalogrāfam Lēmanam, cerībā, ka viņš ar savu paša izveidoto polarizācijas mikroskopu palīdzēs izskaidrot šīs vielas neparastās īpašības. O.Lēmanu vēstule ieinteresēja, un turpmāko divu gadu laikā daudzu eksperimentu rezultātā viņš secināja, ka dažām vielām patiešām eksistē stāvoklis, kurā viela nav ne šķidra, ne cieta, skat. 1.attēlu. Šādā stāvoklī vielai ir gan kristālisks vielas īpašības (piem., dubultlaušana), gan arī šķidruma īpašības (plūstamība).



1. att.: Molekulu izkārtojums dažādos vielas stāvokļos. Šķidro kristālu var iedomāties kā šķidrumu, kurā visas molekulas ir vienādi orientētas (kā kristālā), bet molekulu smagumcentri kustas haotiski (kā šķidrumā).

Gandrīz pusgadsimtu šādas vielas zinātnieku aprindās palika kā interesants kuriozs bez jēlķādas iespējas praktiskam pielietojumam.

1922.gadā franču fiziķis G.Frīdels ieteica klasifikācijas shēmu, kura tiek lietota arī šobrīd. Atkarībā no simetrijas pakāpes šķidros kristālus iedala trīs grupās: nematiskie, smektiskie un holesteriskie. Frīdels konstatēja arī, ka šķidro kristālu molekulas iespējams noorientēt ārējā elektriskā un magnētiskā laukā.

Šķidro kristālu teorijas pamatus izstrādāja tikai 1958.gadā vācu fiziķi V. Maijers un A. Zaupe. Teorija balstās uz pieņēmumu, ka katra molekula atrodas vidējā laukā, kuru nosaka blakus esošās molekulas. Mijiedarbība notiek tikai ar šī lauka starpniecību, ignorējot tuvās mijiedarbības efektus. Maijers un Zaupe ievada t.s. sakārtotības parametru (order parameter) S , ar kura palīdzību iespējams raksturot arī šķidro kristālu īpašību maiņu atkarībā no temperatūras:

$$S = \frac{1}{2} \langle 3\cos^2\theta - 1 \rangle, \quad (1)$$

kur

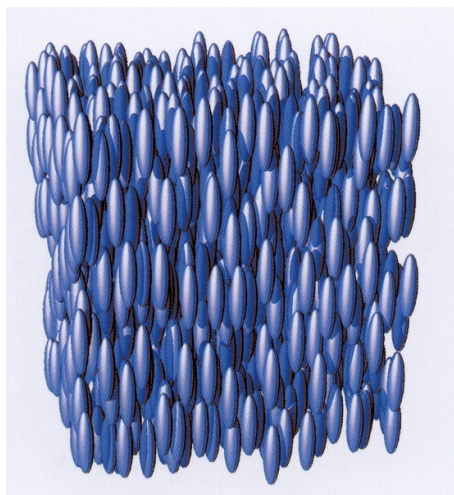
$$\cos^2\theta = \frac{1}{2} \int p(\theta) \cos^2(\theta) \sin(\theta) d\theta$$

Leņķis θ ir leņķis starp molekulas asi un vidējo molekulu orientācijas virzienu, kvadrātiekvānos norāda vidējo vērtību, bet $p(\theta)$ ir šādu molekulu sadalījums. Ideālas paralēlas orientācijas gadījumā $S = 1$, bet pilnīgas dezorientācijas gadījumā $S = 0$. Nematiskajā fāzē parametrs S pieņem starpvērtību, kuras lielums ļoti stipri atkarīgs no temperatūras.

Metodi, kas pavēra ceļu šķidro kristālu daudzajiem praktiskajiem pielietojumiem, pirmie piedāvāja M.Šadts un V.Helfrigs 1971.gadā. Tās pamatā ir t.s. "sagrieztā" nematisko šķidro kristālu šūna (twisted nematic liquid crystal cell), kurai ar nelielu ārējā sprieguma palīdzību iespējams mainīt caurizgājušās gaismas intensitāti. Ierīce, kurā šūna ievietota starp diviem polarizatoriem, veido pamatu visiem mūsdienīgu šķidro kristālu displejiem. Šobrīd zināmas tūkstošiem vielas, kuras var saukt par šķidrajiem kristāliem. Tipiskākās ir holesterola esteri, fenilbenzoāti, parafīni, glikolipīdi, celulozes atvasinājumi. Mūsdienās iespējama šķidro kristālu modelēšana, izmantojot kvantu mehāniskos aprēķinus. Izmantojot šo metodi, iegūstami molekulu dipola momenti un polarizējamības, no kuriem tālāk var prognozēt makroskopiskās īpašības, nesintezējot pašas molekulas.

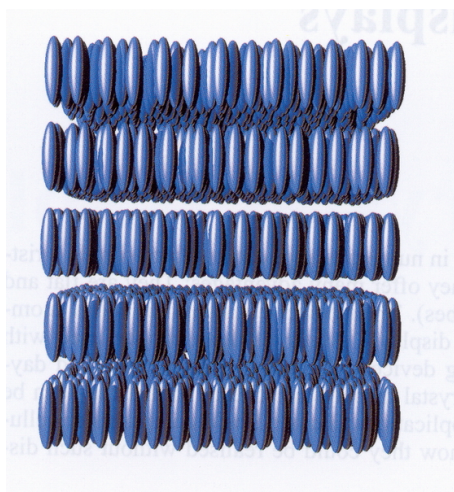
Šķidro kristālu fizikālās īpašības

Šķidro kristālu fizikālās īpašības nosaka tos veidojošo molekulu anizotropija. Vismākā simetrijas pakāpe ir *nematiskajiem* šķidrajiem kristāliem. Nematiskie šķidrie kristāli ir organiski savienojumi, kuri sastāv no garām adatveida molekulām. Šīm molekulām ir tikai virziena orientācija, skat. 2.attēlu. Molekulu orientāciju var viegli mainīt un kontrolēt ar ārēja elektriskā lauka palīdzību. Visās ierīcēs, kurās nepieciešama viendabīga vai labi kontrolējama molekulu orientācija, izmanto nematiskos šķidros kristālus.



2. att. Molekulu izkārtojums nematiskajos šķidrajos kristālos.

Ar augstāku simetrijas pakāpi ir *smektiskie* šķidrie kristāli. Tajos molekulas ir sakārtotas slāņos, skat. 3.attēlu. Šo kristālu grupa atkarībā no simetrijas pakāpes vēl ir sadalīta no A līdz O apakšgrupās.

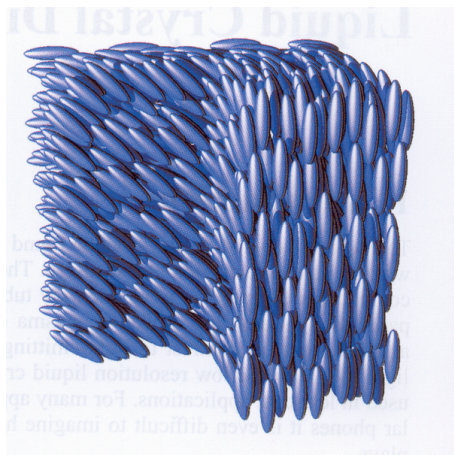


3. att. Molekulu izkārtojums smektiskajos šķidrajos kristālos.

Interessants smektisko un nematisko šķidro kristālu speciālgadījums ir *hirālās* molekulas. Tām piemīt optiskā aktivitāte, proti, spēja ievērojami (par vairākiem tūkstošiem grādu uz milimetru) pagriezt krītošās gaismas polarizācijas plakni.

Holesteriskajos šķidrajos kristālos molekulu asis maina savu virzienu, skat. 4.attēlu.

Dažreiz dažādos simetrijas veidus var novērot vienā un tajā pašā vielā. Mainoties

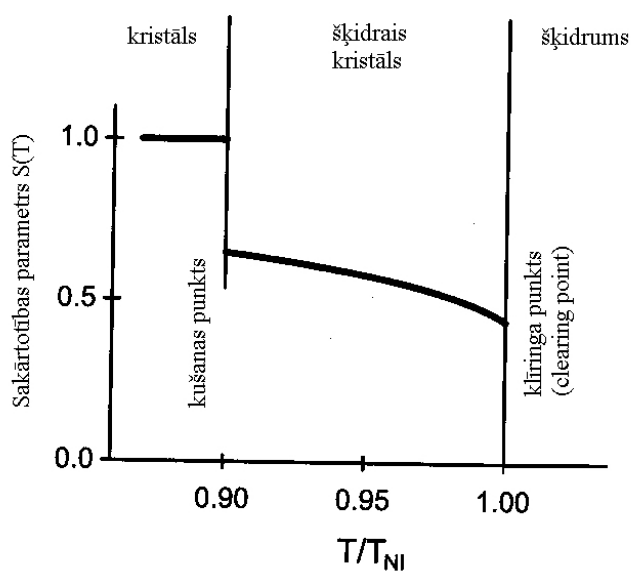


4. att. Molekulu izkārtojums holesteriskajos šķidrajos kristālos.

temperatūrai, notiek pāreja no augstākas simetrijas pakāpes uz zemāku, piemēram, kristāls $\rightarrow$ smektiskā fāze ($H \rightarrow A$) $\rightarrow$ nematiskā fāze $\rightarrow$ šķidrums. Simetrijas maiņu atkarībā no temperatūras raksturo, izmantojot sakārtotības parametru $S(T)$:

$$S(T) = (1 - \gamma \frac{T}{T_{NI}})^b, \quad (2)$$

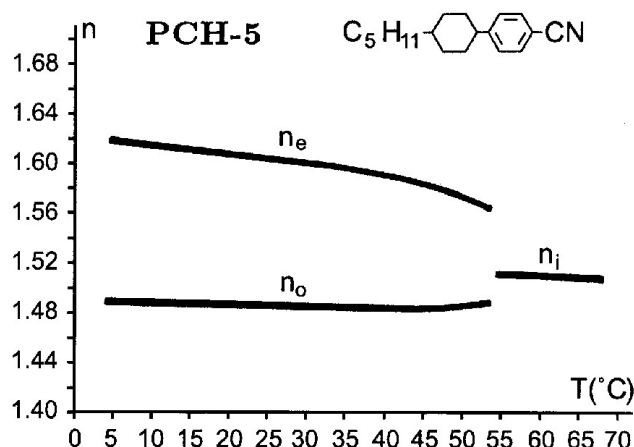
kur T_{NI} ir fāžu pārejas "nematiskā fāze - izotropā fāze" temperatūra, bet γ un b - empīriskas konstantes.



5. att. Sakārtotības parametra $S(T)$ atkarība no temperatūras.

No 5.attēla redzams, ka, paaugstinoties temperatūrai, šķidro kristālu anizotropi-

ja samazinās. Molekulu anizotropija kopā ar molekulu simetrijas veidu šķidrajos kristālos nosaka vielas makroskopiskās īpašības, piem., dubultlaušanu, dielektrisko konstanti, elastības konstantes. Šie fizikālie lielumi mainās, mainoties temperatūrai, skat. 6.attēlu.



6. att.: Dubultlaušanas atkarība no temperatūras šķidrajā kristālā PCH-5. Augšējā likne raksturo ekstraordinārā laušanas koeficienta n_e , bet apakšējā - ordinārā laušanas koeficienta n_o maiņu. Pie temperatūras 54 °C notiek fāžu pāreja "nematiskā fāze - izotropā fāze", kuru raksturo vairs tikai viena laušanas koeficienta vērtība n_i .

Laušanas koeficientu maiņu var aprēķināt, izmantojot Lorenca - Lorenca vienādojumu:

$$\frac{n_i^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N}{3\varepsilon_0} \langle \alpha_{ii} \rangle, \quad (3)$$

kur n_i ir vai nu ekstraordinārais vai ordinārais laušanas koeficients, n - vidējais laušanas koeficients, α_{ii} - vidējā molekulārā polarizējamība, N - molekulu skaits tilpuma vienībā, ε_0 - dielektriskā konstante.

Dubultlaušanai ir ļoti liela nozīme šķidro kristālu tehniskajos pielietojumos, jo ar tās palīdzību iespējams kontrolēt gaismas caurlaidību cauri šķidro kristālu šūnai.

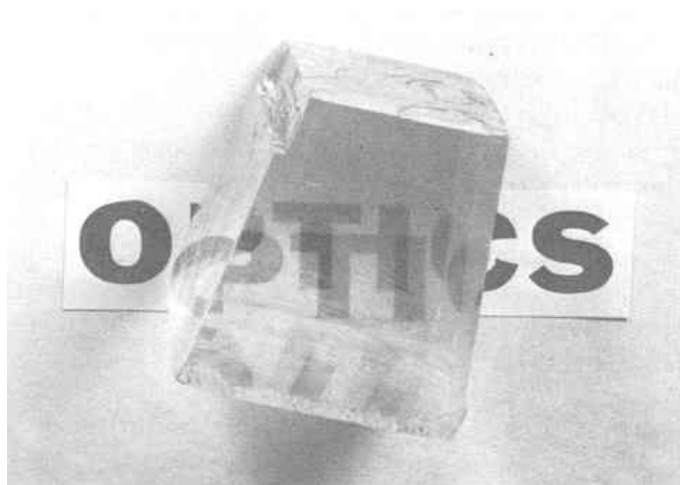
3. Teorētiskais pamatojums

Dubultlaušanu var novērot vidēs, kuru optiskās īpašības dažādos virzienos ir atšķirīgas. Šādas vides sauc par optiski anizotropām vidēm. Anizotropas ir visas kristāliskās vides ar nekubiskiem kristālrežģiem.

Dubultlaušanas efektu 1669.gadā atklāja Kopenhāgenas universitātes profesors Erasmus

Bartolins kalcītā ($CaCO_3$), kurš nesen bija atrasts Islandē un pazīstams ar nosaukumu "Islandes špats". Lūk, kā pats Bartolins aprakstīja kalcīta kristāla īpašības (aptuvenus tulkojums):

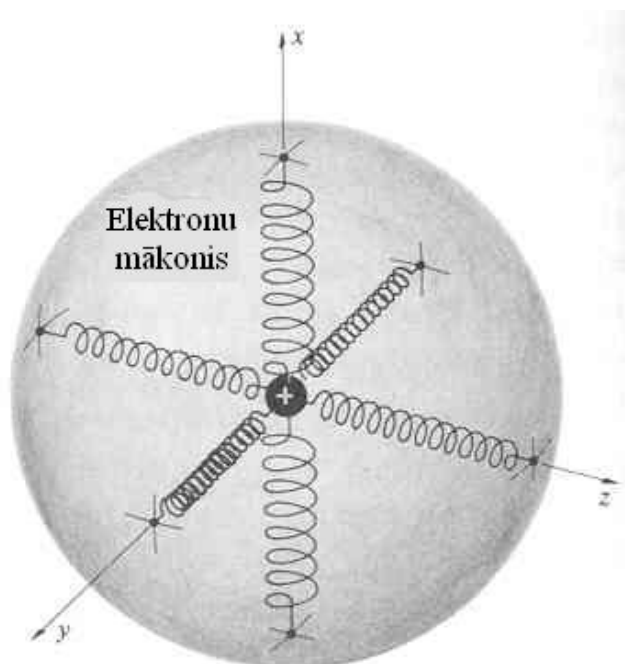
"Daudzi cilvēki apbrīno un priecājas par dimantiem, dārgakmeņiem, pērlēm. Bet tas, kurš dod priekšroku zināšanām par neparastām parādībām, ne mazāk priecāsies par šo caurspīdīgo kristālu, kurš nesen atvests no Islandes un kurš varbūt ir viens no vislielākajiem dabas radītajiem brīnumiem. Mani pētījumi rāda, ka šim kristālam piemīt neparasta, brīnišķīga īpašība: skatoties caur to, objektu attēli nav parasti, bet gan dubultošanas".



7. att. Attēla dubultošanās, skatoties caur kalcīta kristālu.

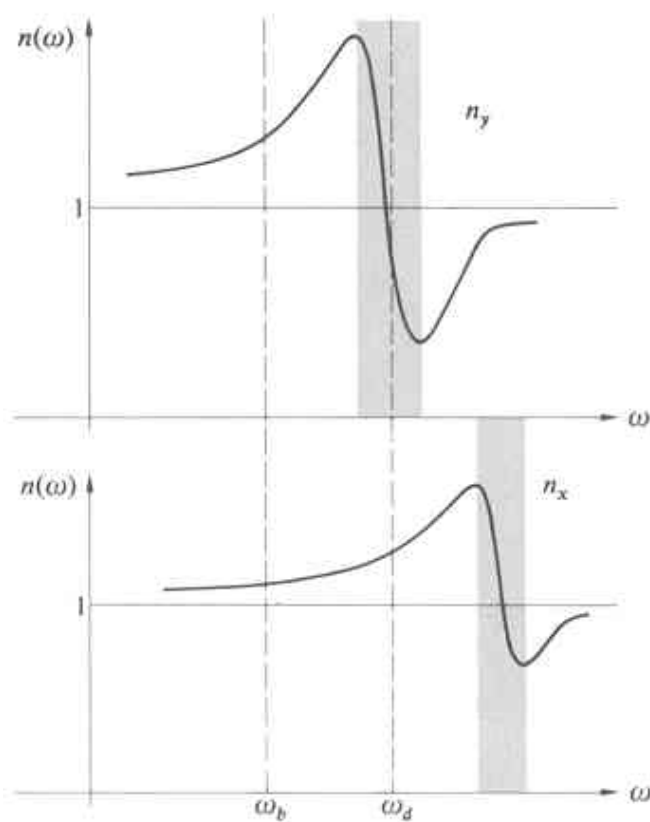
Bartolins novērotajai parādībai deva vārdu "dubultlaušana". Sarežģītāk veicās ar efekta izskaidrošanu. Pats atklājējs mēģināja to skaidrot ar poru sadalījumu kristālā. Savukārt, Ņūtons gaismas staram piedēvēja polāras īpašības: "katram gaismas staram ir divas pretējas puses, jau sākotnēji apveltītas ar īpašību, no kuras atkarīga neparastā laušana, un divas citas puses, kam šīs īpašības nepiemīt". Gaismas korpuskulu uzvedība būs atkarīga no tā, ar kuru pusi korpuskulas saskarsies ar vidi. Vislabāk, bet ne pilnīgi, izskaidrot dubultlaušanu izdevās holandiešu fiziķim Heigensam. Viņš pētīja dubultlaušanu arī kvarca kristālos un ieviesa jēdzienu "optiskā ass". Heigenss aplūkoja viļņu fronšu izplatīšanos un izstrādāja metodi, kā šīs frontes atrast. Metodes pamatā bija pieņēmums, ka katru telpas punktu, kur dotajā laika momentā pienācis primārais vilnis, var uzskatīt par sekundāru elementārviļņu centru. Viļņu fronti vēlākos laika momentos iegūst, konstruējot sekundāro viļņu ārējo aplieцоšo virsmu. Izotropās vidēs var iedomāties sfēriskas formas elementārviļņus, bet anizotropās vidēs tie ir elipsoidālas formas. Šādi Heigenss izskaidroja gaismas atstarošanos, laušanu un dubultlaušanu vienas kristālos, bet nespēja izskaidrot polarizāciju, interferenci, gaismas taisnvirziena izplatīšanos un ēnu veidošanos. Heigenss nonāca tuvu polarizācijas būtības izpratnei, taču traucēja tobrīd valdošais uzskats par gaismu kā garenviļņiem un nevis šķērsviļņiem.

Vispārīgā gadījumā dubultlauzējos kristālos elektriskā lauka svārstības vienā kaut kādā virzienā un tam perpendikulārā virzienā izplatās ar dažādiem ātrumiem. Bet, ja dažādi ir izplatīšanās ātrumi, tad dažādi ir arī laušanas koeficienti. Ja kristālrežģī atomi nav izkārtoti pilnīgi simetriski, elektronu pievilkšanās spēki arī ir dažādos virzienos dažādi, skat.8.attēlu.



8. att.: Mehāniskais modelis, kurš ar dažāda stinguma atsperu palīdzību attēlo dažādās elektronu mākoņa saites ar pozitīvi lādēto kodolu kristālrežģī.

Krītošās gaismas $\mathbf{E}$ vektors iesvārsta elektronus, tie izstaro sekundāros viļņus, kuriem pārklājoties, veidojas laužtais vilnis. Gaismas viļņa izplatīšanās ātrumu un līdz ar to arī laušanas koeficientu nosaka gaismas frekvences un elektronu pašsvārstību frekvences starpība. Atšķirīgi pievilkšanās spēki izpaužas kā atšķirīgi vielas laušanas koeficienti. Piemēram, ja gaismas elektriskā lauka $\mathbf{E}$ vektora svārstību virziens ir paralēls cietākajām atsperēm, kuras 2.zīmējumā attēlotas gar x asi, elektronu pašsvārstību frekvence būs lielāka (proporcionāla kvadrātsaknei no atsperes stinguma koeficienta vērtības). Savukārt, ja $\mathbf{E}$ vektors svārstās paralēli y asij, kur pievilkšanās spēki ir mazāki, elektronu pašsvārstību frekvence būs mazāka. Laušanas koeficienta maiņu atkarībā no frekvences attēlo t.s. dispersijas līknes $n(\omega)$. Anizotropiem materiāliem tās varētu būt līdzīgas tām, kuras attēlotas 9.zīmējumā.

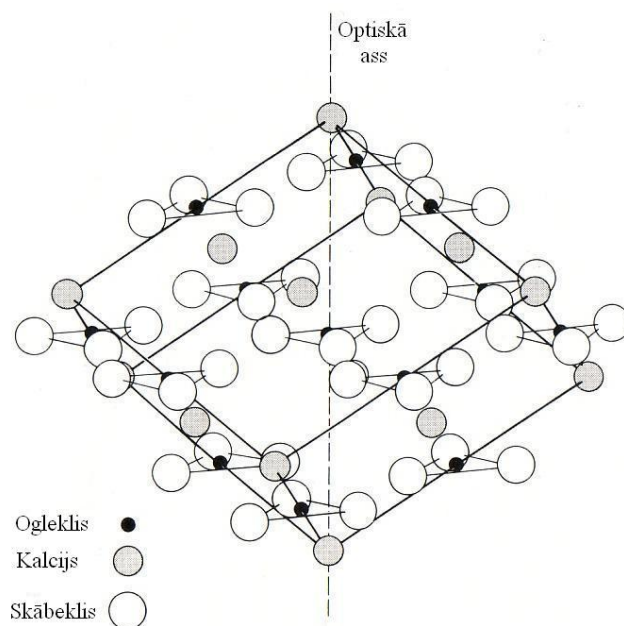


9. att.: Laušanas koeficienta atkarība no frekvences kristāla y ass un x ass virzienos. Iekrāsotie apgabali, kuros $dn/d\omega < 0$, atbilst absorbcijas joslām.

Ja krītošās gaismas frekvence ir ω_d apkārtņē, tad viela absorbē gaismu, kura polarizēta y ass virzienā, bet ir caurspīdīga gaismai, kura polarizēta x ass virzienā. Šādas vielas sauc par dihroiskām.

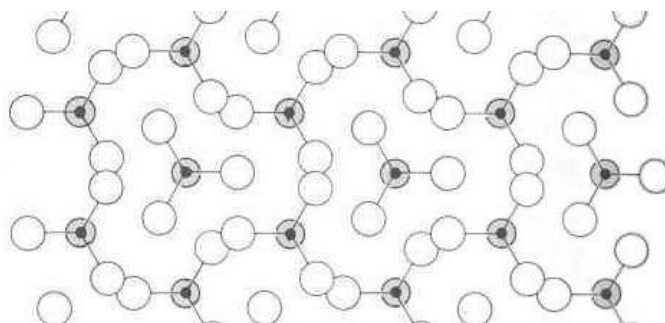
Pie frekvences ω_b gaisma netiek absorbēta, bet laušanas koeficienti ir dažādi gaismai, kura polarizēta y ass vai x ass virzienā. Šādus kristālus sauc par dubultlauzošiem. Ja kristālam ir tāda simetrija, ka pievilkšanās spēki y ass un z ass virzienos ir vienādi, bet atšķirīgi x ass virzienā, tad šī x ass nosaka optiskās ass virzienu kristālā. Jāatceras, ka optiskā ass ir virziens un nevis viena atsevišķa līnija.

Kalcīta kristāls, kurā pirmo reizi tika novērota dubultlaušana, redzamai gaismai ir pilnīgi caurspīdīgs. Tas mūsdienās ir izplatīts materiāls jaudīgu lāzeru starojuma pārveidošanai lineāri polarizētā starojumā.



10. att. Atomu izvietojums kalcīta ($CaCO_3$) kristālā.

Skatoties optiskās ass virzienā (no augšas lejup), redzams, ka katra CO_3 grupa veido trijstūrveida klāsteri, kura plakne ir perpendikulāra optiskajai asij, skat. 11.attēlu.

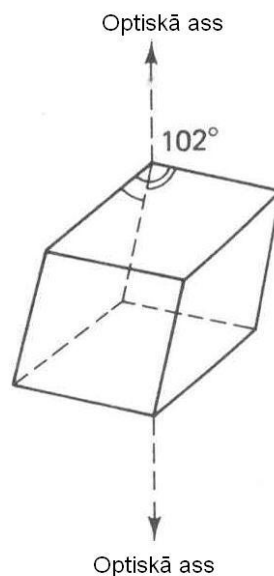


11. att. Atomu izvietojums kalcīta kristālā, skatoties optiskās ass virzienā.

Griežot atomus ap asi, kas iet caur oglekļa atomu, viena apgrieziena laikā trīs reizes tiks iegūta identiska konfigurācija. Tas nozīmē, ka tā ir trīskāršās simetrijas ass.

Kalcīta kristālus var viegli izveidot par romboedriem, saglabājot tiem raksturīgos leņķus. Tādā gadījumā kristālu ierobežo seši rombi ar platajiem leņķiem $102^\circ C$ un šaurajiem leņķiem $78^\circ C$.

No astoņiem telpas leņķiem pie visām romboedra virsotnēm tikai divus veido visi trīs platie leņķi. Taisne, kas iet caur šīm virsotnēm, ir kristāla simetrijas ass un kristalogrāfiskā ass. Par optisko asi šo virzienu sauc tādēļ, ka tajā gaismas izplatīšanās ātrums nav atkarīgs no $\mathbf{E}$ vektora svārstību virziena un līdz ar to dubultlaušana

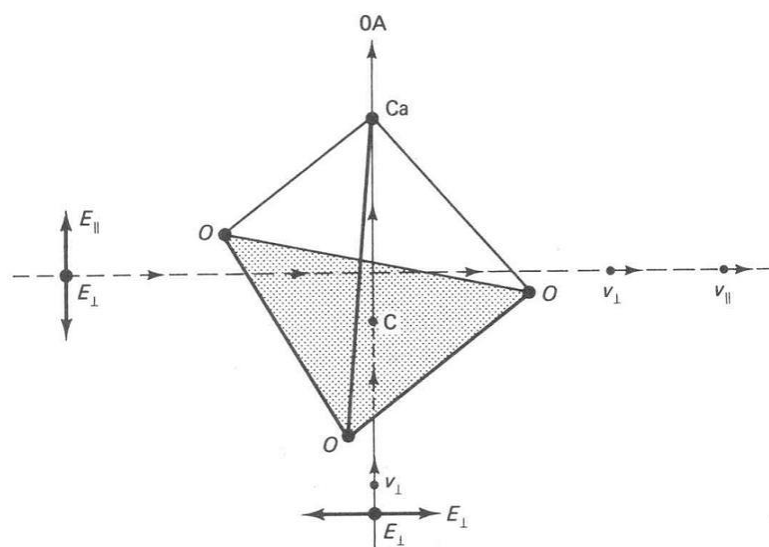


12. att.: Kalcīta kristāla romboedrs. Optiskā ass iet caur virsotnei, kuru veido trīs platie leņķi.

nenotiek. Ja kristālam ir viens šāds virziens, tad to sauc par vienass kristālu, ja divi, tad par divasu kristālu. Plakni, kas satur optisko asi un doto staru, sauc par galveno šķēlumu(šim staram).

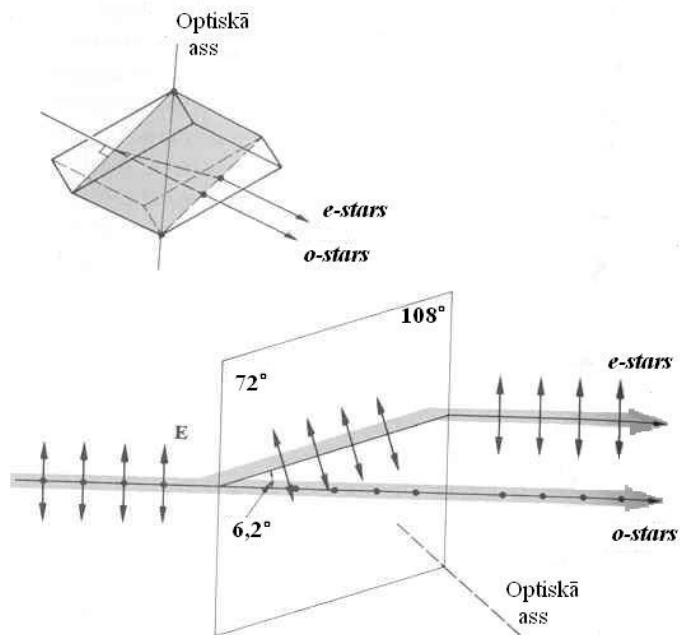
Dabiskas (nepolarizētas) gaismas elektriskā lauka intensitātes vektora svārstības var iedomāties kā divu savstarpēji perpendikulāru vektoru svārstības, fāzes starp kurām nepārtraukti haotiski mainās. Ja gaisma izplatās optiskās ass (OA) virzienā, abas komponentes $\mathbf{E}_{\parallel}$ un $\mathbf{E}_{\perp}$ svārstās perpendikulāri optiskajai asij un izplatās cauri kristālam ar vienādiem ātrumiem, skat. 13.attēlu. Dubultlaušana nenotiek.

Ja gaisma izplatās cauri kristālam virzienā no kreisās uz labo pusi, abu komponentu izplatīšanās apstākļi vairs nav vienādi, skat. 13.attēlu. Elektriskā lauka intensitātes komponente, kura paralēla optiskajai asij, izraisa elektronu svārstības, kuras perpendikulāras skābekļa atomu veidotajai plaknei. Perpendikulārā komponente, savukārt, izraisa svārstības, kuras paralēlas šai plaknei. Svārstības skābekļa atomu plaknē noris vieglāk nekā perpendikulārā virzienā, tāpēc optiskajai asij perpendikulārā komponente izplatās cauri kristālam ātrāk: $v_{\parallel} > v_{\perp}$. Ja mijiedarbība nenotiktu, izplatīšanās ātrums būtu vienāds ar c . Tā kā laušanas koeficients $n = c/v$, tad $n_{\perp} > n_{\parallel}$. Eksperimentāli noteiktās vērtības pie viļņa garuma $\lambda = 589,3 \text{ nm}$ kalcīta kristālam ir, atbilstoši $n_{\perp} = 1,658$ un $n_{\parallel} = 1,486$. Tātad, starp abām $\mathbf{E}$ vektora komponentēm veidojas fāžu starpība, bet no kristāla ārā iziet tikai viens stars.



13. att.: Dabiskas gaismas izplatīšanās caur kalcīta kristālu. Skābekļa atomi veido tetraedra pamatni. Optiskā ass iet caur kalcija un oglekļa atomiem. Gaismai izplatoties optiskās ass virzienā, dubultlaušana nenotiek: abas svārstību komponentes $\mathbf{E}_{\parallel}$ un $\mathbf{E}_{\perp}$ svārstās plaknē, kas paralēla skābekļa atomu veidotajai plaknei. Gaismai izplatoties perpendikulāri optiskās ass virzienam, abu komponentu izplatīšanās apstākļi vairs nav vienādi. Optiskajai asij perpendikulārā komponente izplatās cauri kristālam ātrāk nekā paralēlā komponente.

Ja kristālu pagriež tā, ka optiskā ass veido patvaļīgu leņķi ar krītošās gaismas $\mathbf{E}$ vektors abu komponentu svārstību virzieniem, no kristāla ārā iziet divi stari, kurus Bartolins nosauca par ordināro (parasto) un ekstraordināro (neparasto) staru, skat. 14.attēlu.



14. att.: Gaismas stara izplatīšanās caur kalcīta kristālu. Galvenais šķelums ietonēts pelēkā krāsā. Šādā ģeometrijā ordinārais (*o-stars*) un ekstrordinārais (*e-stars*) stars kristālā izplatās pa dažādiem ceļiem.

Ordinārais stars izturas kā parasts stars izotropā vidē un tas lūst saskaņā ar laušanas likumu:

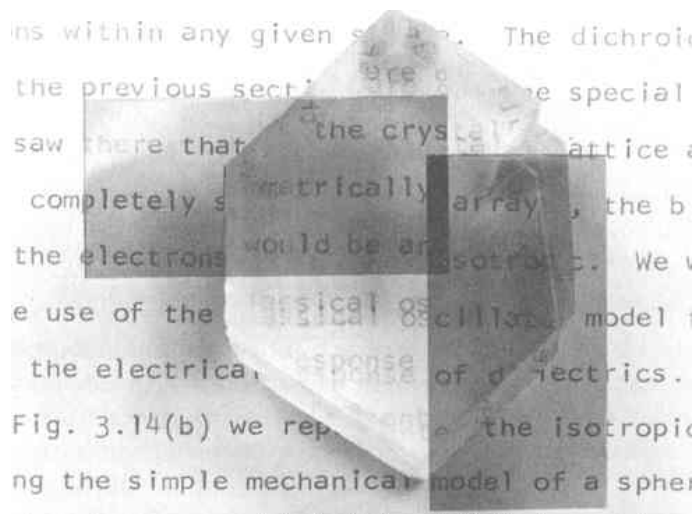
$$n_o = \frac{c}{\nu_o} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{const} \quad (4)$$

Islandes špatam $n_o = n_{\perp} = 1,658$. Lauztais ordinārais stars atrodas vienā plaknē ar krītošo staru un robežvirsmas normāli.

Ekstraordinārā stara laušanas koeficients, respektīvi, izplatīšanās ātrums nav konstants, bet ir atkarīgs no krītošā stara virziena attiecībā pret optisko asi:

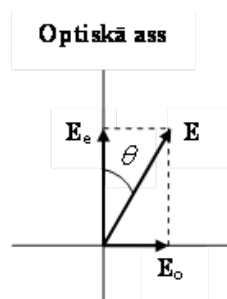
$$n_e = \frac{c}{\nu_e} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \neq \text{const} \quad (5)$$

Ordinārais un ekstraordinārais stars ir lineāri polarizēti, pie kam to polarizācijas virzieni ir savstarpēji perpendikulāri, skat. 14.un 15.attēlu.



15. att.: Skatoties caur kalcīta kristālu, attēls dubultojas. Aplūkojot šo dubultattēlu caur vienu vai otru polarizatoru (fotogrāfijā novietoti paralēli un perpendikulāri tekstam), redzams tikai viens attēls - ordinārais vai ekstrordinārais - atkarībā no polarizatora orientācijas.

Dubultlaušana notiek arī lineāri polarizētā gaismā, skat.16.attēlu.



16. att.: Lineāri polarizētas gaismas dubultlaušana. Lineāri polarizēts stars krīt uz anizotropu vidi perpendikulāri zīmējuma plaknei. Kristāla optiskā ass vērsta vertikāli.

Lineāri polarizēts stars krīt uz anizotropu vidi perpendikulāri zīmējuma plaknei. Optiskā ass vērsta vertikāli, tāpēc galvenais šķelums ir plakne, kas orientēta perpendikulāri zīmējuma plaknei. Elektriskā lauka intensitātes vektors $\mathbf{E}$ ar galveno šķelumu veido leņķi θ . Šo vektoru var sadalīt divās savstarpēji perpendikulārās komponentēs $\mathbf{E}_e$ un $\mathbf{E}_o$, kuras svārstās vienādās fāzēs. Komponente $\mathbf{E}_e$ veido ekstrordināro staru, bet komponente $\mathbf{E}_o$ - ordināro. No attēla redzams, ka

$$E_e = E \cos \theta \text{ un } E_o = E \sin \theta, \quad (6)$$

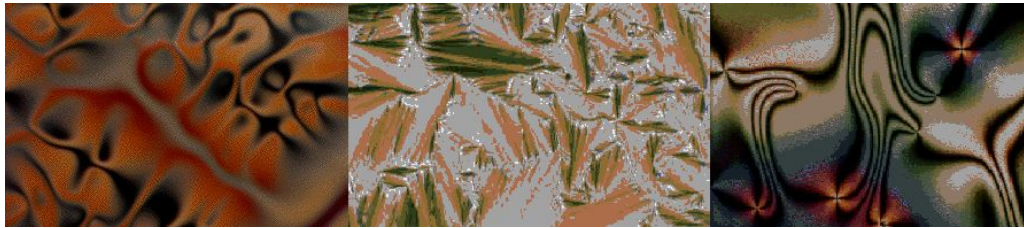
Tā kā gaismas intensitāte ir proporcionāla elektriskā lauka svārstību amplitūdas kvadrātam, tad, kāpinot vienādību abas puses kvadrātā, iegūst:

$$\frac{T_o}{T_e} = \operatorname{tg}^2 \theta, \quad (7)$$

kur T_o un T_e ir atbilstoši kristālam caurizgājušā ordinārā un ekstraordinārā stara intensitātes. Ja leņķis $\theta = 45^\circ$, tad abu staru intensitātes ir vienādas. Abi stari, kas radušies no lineāri polarizētas gaismas, ir koherenti un pārklājoties var interferēt.

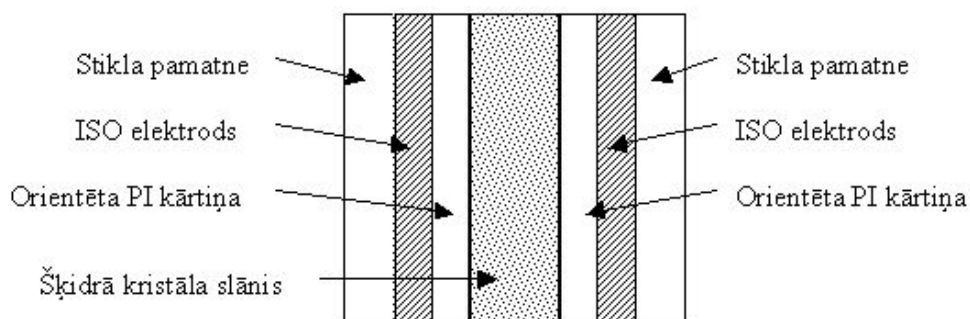
Fāžu nobīde starp abiem stariem ir atkarīga arī no optiskās anizotropijas, t.i., laušanas koeficientu starpības. Ja dubultlauzošu kristālu ievieto starp krustotiem polarizatoriem un apgaismo ar baltu gaismu, starojumiem ar dažādu viļņa garumu caur analizatoru izgājušās gaismas intensitātes būs dažādas. Griezot analizatoru, novērojama ļoti interesanta krāsu maiņa. Tādējādi hromatiskā polarizācija ir ļoti jutīgs indikators dubultlaušanas konstatēšanai.

Nematisko šķidro kristālu īpašības ir analogiskas vienas kristālu īpašībām. Ievietojot šķidro kristālu starp krustotiem polarizatoriem, dubultlaušanas dēļ novērojami skaisti krāsu efekti.



17. att.: Ievietojot šķidros kristālus starp krustotiem polarizatoriem un apgaismojot ar baltu gaismu, dubultlaušanas dēļ novērojami skaisti krāsu efekti.

Šajā darbā izmantotās šķidro kristālu šūnas struktūra ir parādīta 18.attēlā. Stikla pamatnes vispirms ir pārklātas ar elektriski vadošu, bet optiski caurlaidīgu indija - alvas oksīda (ISO) slāni un pēc tam - ar plānu, orientēt iespējamu poliimīda (PI) kārtiņu. Šis poliimīda virsmas pēc tam ir notīrītas ar papīru, kas paredzēts lēcu virsmu tīrīšanai - ar mērķi radīt mikrorievas. Mikrorievu virzienā iespējams noorientēt šķidrā kristāla molekulas, kuras novietotas starp poliimīda slāņiem. Šāda metode ļauj sasniegt labu šķidrā kristāla molekulu orientāciju uz pamatnes virsmām un, sekojoši, arī visā nematiskā šķidrā kristāla slānī sasniegt viendabīgu molekulu orientāciju. Molekulu orientācijas virziens nosaka šķidrā kristāla polarizācijas īpašības (t.s. optiskās ass virzienu).



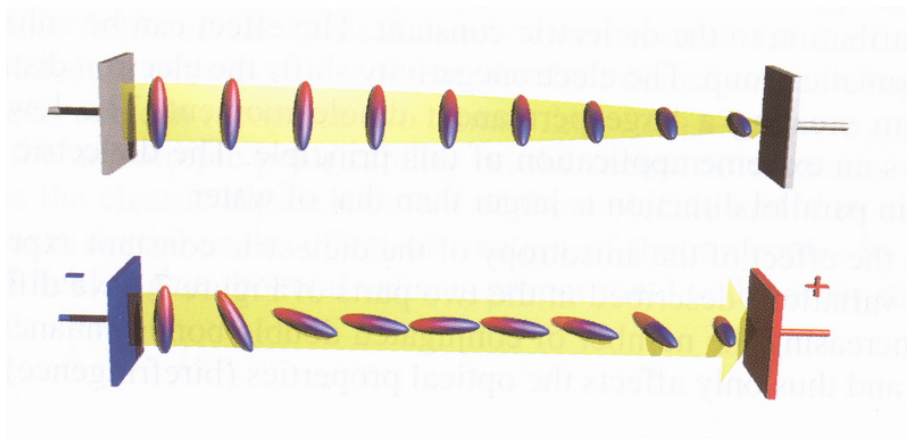
18. att. Šķidro kristālu šūnas uzbūves struktūra.

Šķidro kristālu šūnai piemīt t.s. gaismas dubultlaušanas īpašība, kuru var izskaidrot, ievērojot divus galvenos laušanas koeficientus. Kad gaisma izplatās optiskās ass virzienā, visas polarizācijas komponentes izplatās cauri kristāla ar vienādu ātrumu: $v_o = c/n_o$, kur no tiek saukts par ordināro laušanas koeficientu.

Ja gaisma izplatās perpendikulāri optiskās ass virzienam, tad, vispārīgā gadījumā, ir divi izplatīšanās ātrumi. Kad polarizētas gaismas elektriskā lauka intensitātes vektora svārstību virziens ir perpendikulārs (vai paralēls) optiskajai asij, tad gaisma izplatās ar ātrumu $v_o = c/n_o$, (vai $v_e = c/n_e$, kur n_e tiek saukts par ekstraordināro laušanas koeficientu).

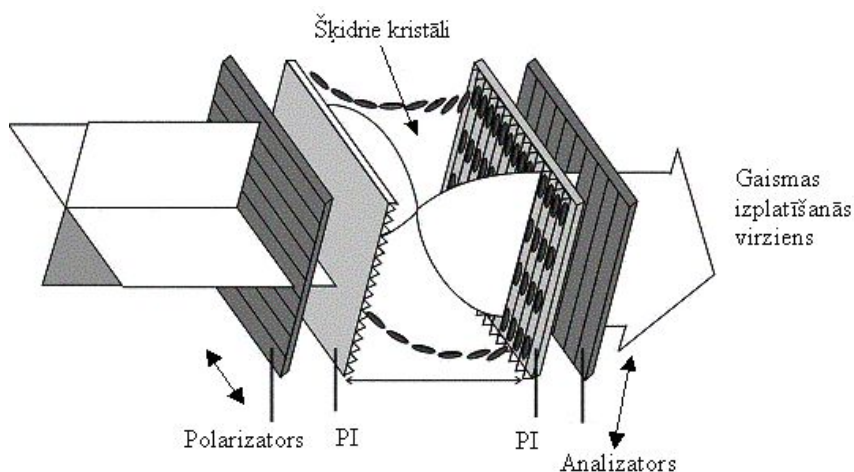
Dubultlaušana (optiskā anizotropija) tiek definēta kā starpība starp ekstraordināro un ordināro laušanas koeficientu $\Delta n = n_e - n_o$.

Nematiskā šķidrā kristāla šūnai ar 90°C pagriezienu (twisted nematic, turpmāk tekstā arī - TN šūna), kas parādīta 19.attēlā, aizmugurējās virsmas molekulu orientācijas virziens ir pagriezts par 90°C attiecībā pret priekšējās virsmas molekulu orientācijas virzienu.



19. att.: Molekulu orientācija sagrieztajā nematisko šķidro kristālu šūnā. Elipsoīdi parāda molekulu orientācijas virzienu un līdz ar to arī optiskās ass virzienu. Zīmējuma apakšējā daļā redzams, ka ārējā elektriskā laukā molekulas cenšas noorientēties lauka virzienā.

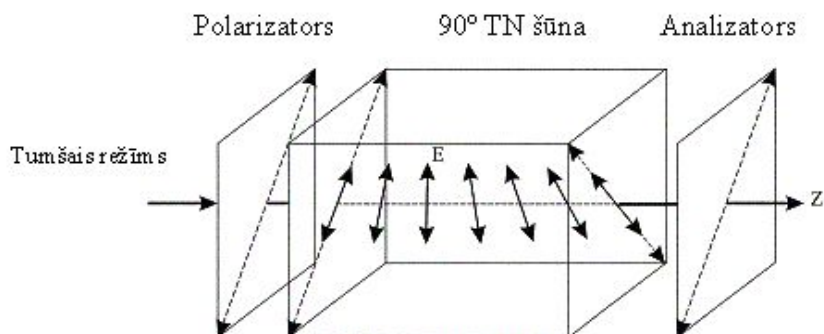
Ja TN šūnu ar 90°C pagriezienu novieto starp krustotiem polarizatoriem, uz polarizatoru krītošā nepolarizētā gaisma tiek pārveidota par lineāri polarizētu gaismu. Pieņemsim, ka šķidro kristālu šūnas priekšējā virsma ir noorientēta paralēli polarizatora caurlaidības asij, skat. 20.attēlu.



20. att.: Nematiskā šķidrā kristāla šūna ar 90°C pagriezienu (90°C TN šūna). Šūna ievietota starp krustotiem polarizatoriem.

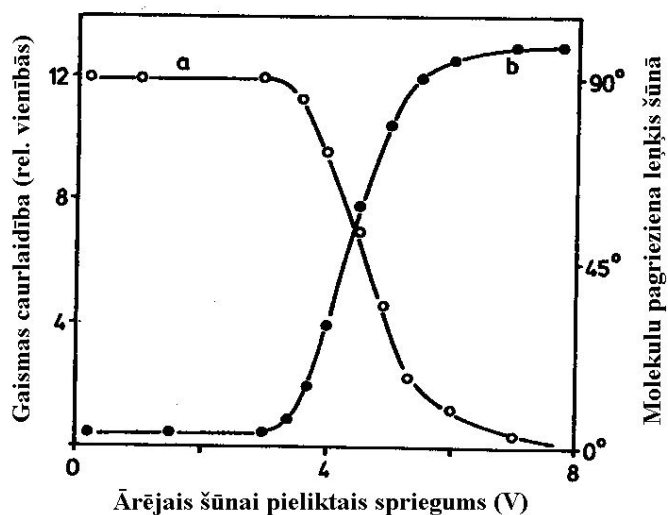
Kad lineāri polarizēta gaisma izplatās cauri 90°C TN šūnai, tās polarizācija izmainās atbilstoši šķidrā kristāla molekulu orientācijas virzienam - par 90°C . Tādējādi no šūnas izejošais stars paliek lineāri polarizēts, vienīgi polarizācijas virziens ir pagriezies par 90°C (to sauc par n_e polarizācijas plaknes griešanas efektu, līdzīgi iespējams noteikt arī n_o polarizācijas plaknes griešanas efektu). Izmantojot 90°C TN šūnu t.s.

normālā "tumšajā režīmā", analizatora (otrā polarizatora) caurlaidības ass ir novietota paralēli pirmā polarizatora caurlaidības asij, skat. 21.attēlu. Tādējādi gaisma sistēmai cauri neiet.



21. att.: Eksperimenta shēma darbam ar 90 °C TN šūnu. Polarizatora un analizatora caurlaidības ass noorientēti paralēli.

Kad šūnai pieliktais ārējais spriegums V pārsniedz sprieguma kritisko vērtību V_c , šķidrā kristāla molekulas cenšas noorientēties ārējā elektriskā lauka virzienā, kurš sakrīt ar gaismas izplatīšanās virzienu. Līdz ar to polarizācijas sekošanas efekts šķidro kristālu šūnā tiek ievērojami samazināts, un gaisma sāk iet cauri analizatoram, skat. 22.attēlu.

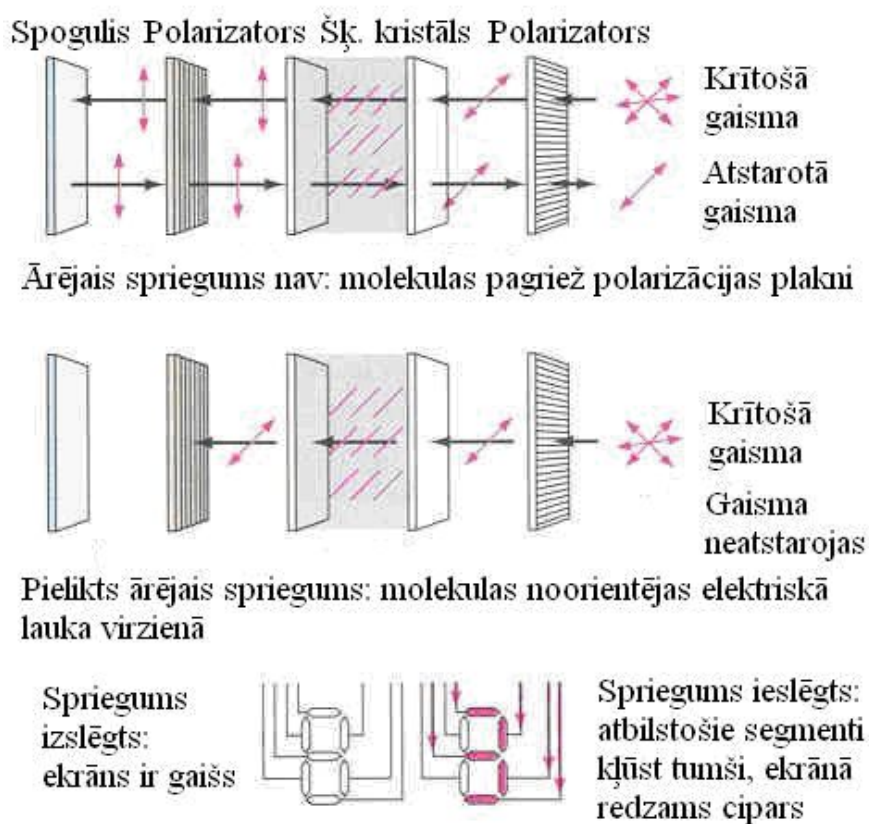


22. att.: Sagrieztās nematiskās šūnas gaismas caurlaidības - ārējā sprieguma raksturlīknes. (a) polarizācijas pagriešanas leņķa atkarība no ārējā sprieguma; (b) caurizgājušās gaismas intensitāte atkarībā no ārējā sprieguma, ja šūna ievietota starp paralēliem polarizatoriem ("tumšais režīms").

Šis elektrooptiskās pārslēgšanās raksturotājlīkums - koeficients γ tiek ievests kā atiecība $(V_{90} - V_{10})/V_{10}$, kur V_{10} un V_{90} ir tādi pieliktie ārējie spriegumi, kuru darbības rezultātā izejošās gaismas intensitāte sasniedz atbilstoši 10% un 90% no maksimālās intensitātes vērtības.

Šķidro kristālu displejs.

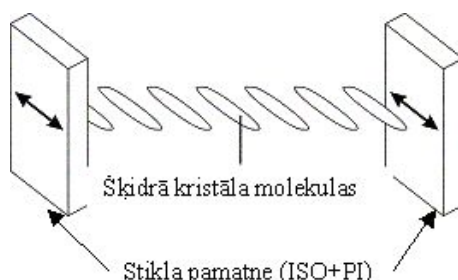
Iespēju ar nelielu ārējo spriegumu mainīt cauri 90 °C TN šūnai caurizgājušās gaismas intensitāti mūsdienās izmanto visos šķidro kristālu displejos, skat. 23.attēlu.



23. att.: Šķidro kristālu displeja darbības princips. Kad ārējais spriegums vienāds ar nulli, 90 °C TN šūnā molekulas pagriež gaismas polarizācijas virzienu par 90 °C, un gaisma iet cauri gan analizatoram, gan polarizatoram. Kad šūnai pielikts ārējs spriegums, molekulas pagriežas ārējā lauka virzienā, un gaisma cauri analizatoram vairs neiet.

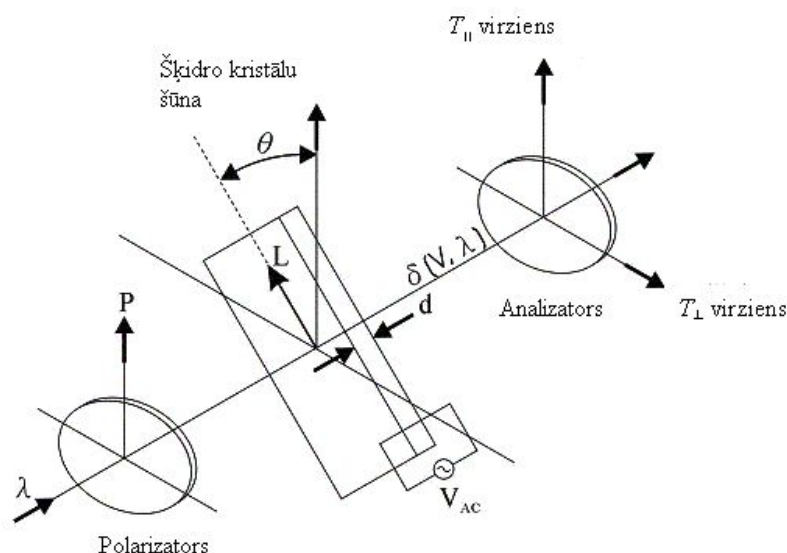
4. Homogēna paralēli orientēta šķidrā kristāla šūna

Paralēli orientētai šķidro kristālu šūnai molekulu orientācijas virzieni uz priekšējās un aiz mugurējās virsmas ir paralēli, skat. 24.attēlu. Kad lineāri polarizēta gaisma krīt uz paralēli orientētu šķidrā kristāla šūnu tā, ka tās polarizācijas virziens ir paralēls molekulu orientācijas (mikrorievu izveidošanas) virzienam, notiek tikai fāzes izmaiņa (modulācija), jo gaismas stars izplatās cauri šūnai kā ordinārs stars.



24. att. Homogēna paralēli orientēta šķidro kristālu šūna

Savukārt, ja lineāri polarizētas gaismas stars normāli krīt uz paralēli orientētu šūnu, bet gaismas polarizācijas virziens veido $\theta = 45^\circ$ ar molekulu orientācijas virzienu, parādās fāžu nobīde, jo ordinārais un ekstraordinārais stars izplatās cauri šķidrā kristāla šūnai ar dažādiem ātrumiem, skat. 25.attēlu.



25. att.: Eksperimentālās iekārtas shēma. (ar bultiņu L parādīts šķidro kristālu molekulu optiskās ass virziens)

Šajā $\theta = 45^\circ\text{C}$ shēmā paralēli orientētas šķidro kristālu šūnas normēta gaismas caurlaidība uzrakstāma šādi:

$$T_{\uparrow\uparrow} = \cos^2 \frac{\delta}{2}. \quad (8)$$

Fāžu nobīde δ izsakāma:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \Delta n(V, \lambda), \quad (9)$$

kur d ir šķidrā kristāla slāņa biezums, λ ir gaismas viļņa garums gaisā, V ir pieliktā ārējā maiņsprieguma efektīvā vērtība un Δn - (kā funkcija no λ un V) šķidrā kristāla dubultlaušana. Jāatzīmē, ka gadījumā, kad $V = 0$, laušanas koeficientu starpībai $\Delta n = (n_e - n_o)$ un fāžu nobīdei δ ir maksimālās vērtības. (Lielums Δn samazinās, ja palielinās spriegums V). Vispārīgā gadījumā ir spēkā intensitāšu sakarības:

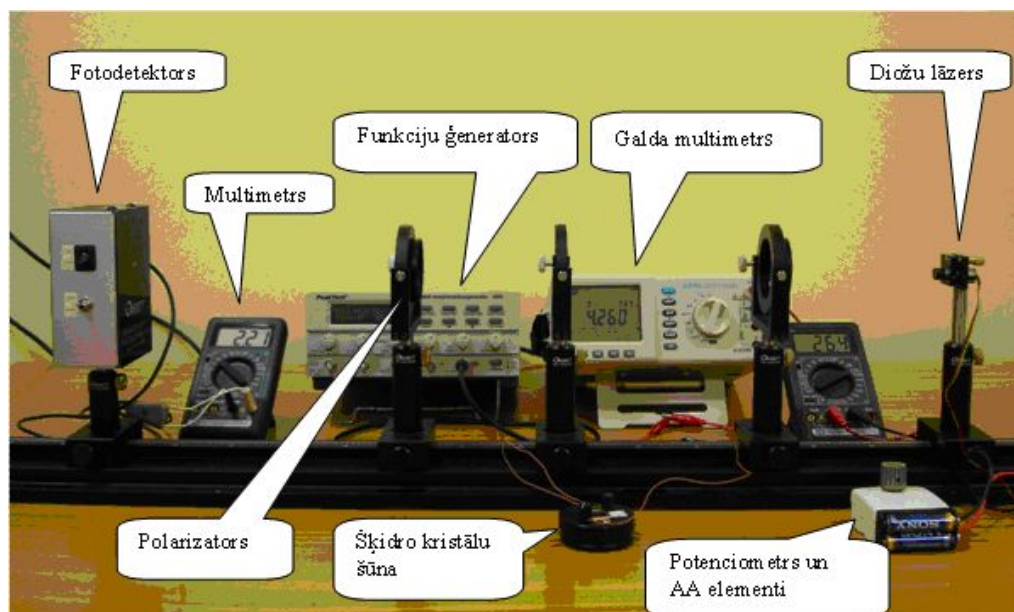
$$T_{\uparrow\uparrow} = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (10)$$

$$T_{\perp} = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (11)$$

Indeksi $\uparrow\uparrow$ un $\perp$ norāda, ka analizatora caurlaidības ass ir atbilstoši paralēla un perpendikulāra polarizatora caurlaidības asij.

5. Darba piederumi

- Optiskā sliede, turētāji
- Diožu lāzers (izstarotās gaismas viļņa garums 650 nm)
- Fotodetektors
- Polarizators - 2 gab.
- Šķidro kristālu šūna - 2 gab.
- Multimetrs - 2 gab.
- Galda multimetrs
- Funkciju ģenerators
- Potenciometrs un divi AA tipa galvaniskie elementi



26. att. Laboratorijas darbā izmantojamās ierīces

Kontroljautājumi

1. Kādu vielas stāvokli sauc par šķidro kristālu?
2. Kā pēc simetrijas pakāpes klasificē šķidros kristālus?
3. Kāds molekulu izkārtojums raksturīgs nematiskai šķidro kristālu fāzei?
4. Kā mainās šķidro kristālu simetrija paaugstinoties temperatūrai?
5. Kādi raksturlielumi mainās, gaismai izplatoties cauri šķidrajiem kristāliem?
6. Kas ir dubultlaušana?
7. Kas ir ordinārais un ekstraordinārais vielas laušanas koeficients?
8. Kā eksperimentāli iespējams novērot polarizācijas virziena maiņu, gaismai izplatoties cauri šķidro kristālu šūnai?
9. Kas izmainīsies, ja eksperimentos ar šķidrajiem kristāliem diožu lāzeri aizstās ar baltās gaismas avotu?
10. Kāpēc šķidros kristālus ir iespējams izmantot displejos?
11. Kāpēc šķidros kristālus ir iespējams izmantot kā temperatūras indikatorus?

1. Darba uzdevumi un darba gaita

A daļa. Diožu lāzera un fotodetektora raksturlielumi

A1. Noteikt diožu lāzera gaismas intensitātes U atkarību no strāvas stipruma I . Attēlot grafiski sakarību $U = f(I)$.

A2. Ar bultām ($\downarrow$) atzīmēt grafika lineāro posmu. Atrast maksimālās strāvas vērtību I_{max} un sliekšņa strāvas stiprumu I_{sl} . Novērtēt iegūtā rezultāta kļūdu. Aprēķināt optimālās strāvas I_{opt} vērtību.

Diožu lāzers

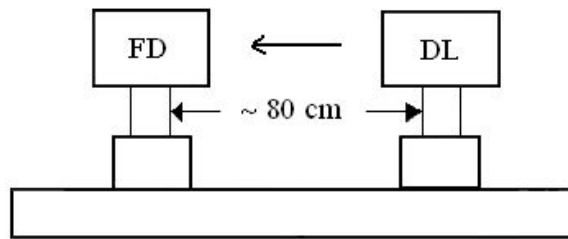
Laboratorijas darbā izmantotais gaismas avots ir lāzera diode jeb diožu lāzers (DL), kas izstaro gaismu ar viļņa garumu ~ 650 nm. Kad strāva diodē pārsniedz noteiktu lielumu (sliekšni), diode var izstarot monohromatisku, daļēji polarizētu un koherentu gaismu. Kad strāva, kas plūst caur diožu lāzeri ir mazāka par sliekšņa strāvu, izstarotās gaismas intensitāte ir ļoti niecīga. Virs sliekšņa, pieaugot strāvai, izstarotās gaismas intensitāte ļoti strauji palielinās un mainās lineāri atkarībā no strāvas. Ja strāva turpina palielināties, lāzera diodes temperatūra paaugstinās, un gaismas intensitāte vairs tik strauji nepalielinās. Tādējādi, optimālais darba režīms lāzera diodei ir strāvas apgabals, kurā izstarotās gaismas intensitāte mainās lineāri atkarībā no strāvas. Vispārīgā gadījumā, sliekšņa strāva I_{sl} tiek noteikta kā lineārās daļas ekstrapolācijā iegūtais krustpunkts ar strāvas asi.

Fotodetektors

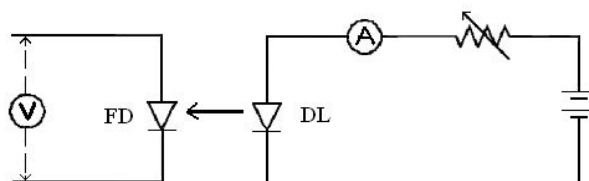
Šajā eksperimentā izmantotais gaismas detektors jeb fotodetektors (FD) sastāv no fotodiodes un strāvas pastiprinātāja. Kad fotodiodei tiek pielikts ārējs nobīdes spriegums, uz fotodiodei krītošā gaisma rada fotostrāvu. Ja krītošā gaisma ir monohromatiska, pie nemainīgas temperatūras fotostrāvas lielums ir proporcionāls gaismas intensitātei. Savukārt, ar strāvas pastiprinātāja palīdzību fotostrāva tiek pārveidota, lai varētu izmērīt izejas spriegumu. Dotajam fotodetektoram šādai strāvas pārveidošanai ir divi proporcionalitātes koeficienti - augstais un zemais (attēlā pie darba piederumiem "HI" un "Low"). **Šajā eksperimentā tiks izmantots tikai zemais.** Tomēr jāievēro, ka pie pārāk lielām gaismas intensitātēm izejas spriegums var sasniegt piesātinājumu (tas parasti notiek apmēram pie 8V sprieguma vērtības) un fotodiodes rādījumi vairs pareizi neatspoguļo krītošās gaismas intensitātes lielumu. Tādējādi, piemērotais fotodetektora darba režīms ir tad, kad izejas spriegums patiešām ir proporcionāls gaismas intensitātei.

Diožu lāzera un fotodetektora raksturlielumi

1. Nostiprini diožu lāzeri un fotodetektoru uz optiskā sola apmēram 80 cm attālumā vienu no otra, skat. 27.attēlu. Diožu lāzerim jau ir pievienots potenciometrs un turētājs ar diviem AA elementiem.



1. att. Diožu lāzera (DL) un fotodetektora (FD) novietojums uz optiskā sola.



2. att.: Diožu lāzera (DL) gaismas intensitātes mērījumu elektriskā shēma. Zīmējumā nav parādīta fotodiodes strāvas pastiprinātāja shēma.

2. Pieslēdzot multimetru līdzstrāvas mērīšanas režīmā "DC", tas rādīs cauri diodei plūstošo strāvu. Melno vadu pievieno "COM", sarkano - "mA" ligzdai. Slēdzi pagriež uz 200 mA mērījumu diapazonu.



3. att. Multimetrs līdzstrāvas mērījumu režīmā.

3. Fotodetektoram pieslēdzot multimetru līdzsprieguma mērīšanas režīmā "DC", tas rādīs spriegumu, kas proporcionāls uz fotodiodei krītošās gaismas intensitātei. Melno vadu pievieno "COM", balto - "VΩ" ligzdai. Slēdzi pagriez uz 20 V mērījumu diapazonu.



4. att. Multimetrs līdzsprieguma mērījumu režīmā.

4. Noregulē potenciometru tā, lai strāvas stiprums caur lāzera diodi būtu apmēram 25 mA un diode izstarotu gaismu. Izvēlies fotodetektora zemo proporcionalitātes koeficienta režīmu "Low". Noregulē diožu lāzeri un fotodetektoru tā, lai gaisma no lāzera nokļūtu fotodetektora korpusa mazajā caurumā un fotodetektora rādījumi sasniegtu maksimālo vērtību (apmēram 5-7 volti)

Uzmanību! Neskaties tiešā lāzera starā! Tā var nopietni sabojāt redzi.

5. Ar potenciometru maini strāvu I , kas plūst cauri lāzera diodei, no minimālās vērtības ($\sim 0,8$ mA) līdz maksimālajai vērtībai (~ 30 mA) un mēri fotodetektora spriegumu U . Pievērs uzmanību piemērota strāvas stipruma izmaiņas soļa izvēlei - straujāku izmaiņu apgabalos mērījumus veic biežāk. Novērtē strāvas un sprieguma mērījumu kļūdu. Rezultātus apkopo tabulā un attēlo grafiski sakarību $U = f(I)$.

6. Ar bultiņām atzīmē grafika $U = f(I)$ lineāro posmu un uzzīmē to atsevišķi. Nosaki maksimālo strāvu I_{max} . Aproximē lineāro daļu ar taisni un nosaki sliekšņa strāvas vērtību I_{sl} . Novērtē kļūdu.

7. Aprēķini optimālo strāvas vērtību, izmantojot sakarību $I_{opt} = I_{sl} + 2(I_{max} - I_{sl})/3$.



5. att. Ierīču izvietojums, nosakot diožu lāzera un fotodetektora raksturlielumus.

2. Mērījumu rezultāti un datu apstrāde

1. tabula. Fotodetektora spriegums atkarībā no diodei cauri plūstošās strāvas. Attēlo grafiski sakarību $U = f(I)$.

$I \pm \Delta I$ (mA)	$U \pm \Delta U$ (V)	$I \pm \Delta I$ (mA)	$U \pm \Delta U$ (V)

6. att. Ierīču izvietojums, nosakot diožu lāzera un fotodetektora raksturlielumus.

Ar bultiņām atzīmē grafika $U = f(I)$ lineāro posmu un uzzīmē to atsevišķi palielinātā mērogā.

Nosaki maksimālo strāvu I_{max} .

Aproximē lineāro daļu ar taisni un nosaki sliekšņa strāvas vērtību I_{sl} . Novērtē kļūdu.

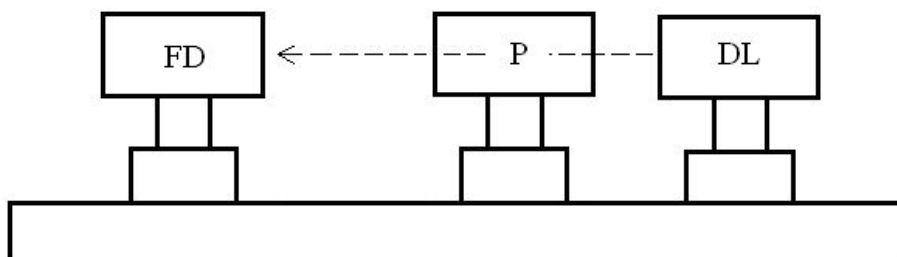
Aprēķini optimālo strāvas vērtību, izmantojot sakarību $I_{opt} = I_{sl} + 2(I_{max} - I_{sl})/3$.

B daļa. Nematisko šķidro kristālu 90 °C šūnas (TN) raksturlielumi

B1. Veic mērījumus, un uzzīmē 90 °C TN (twisted nematic) šūnas elektrooptiskās pārslēgšanās grafiku (intensitātes jeb fotodetektora sprieguma U atkarību no ārējā sprieguma V). Nosaki pārslēgšanās koeficientu γ , kur γ tiek definēts kā attiecība $(V_{90} - V_{10})/V_{10}$.

B2. Nosaki 90 °C TN šūnas sprieguma kritisko vērtību V_c . Uzzīmē grafiku un detalizēti parādi, kā šī sprieguma vērtība tika noteikta.

1. Lāzeru diodei ieregulē optimālās strāvas vērtību. Nostiprini polarizatoru uz optiskā sola tuvu lāzera diodei, kā parādīts 32.attēlā. Pārļiecinies, ka gaisma no lāzera diodes krīt uz polarizatora centrālo daļu. Orientē polarizatoru tā, lai krītošās gaismas stars būtu perpendikulārs polarizatora virsmai.
(Norāde: vari izmantot baltu papīru kā ekrānu, lai pārbaudītu vai viens ar otru sakrīt krītošais un atstarotais stars, t.i., vai krītošais stars ir perpendikulārs polarizatora virsmai).



7. att.: Polarizatora (P), diožu lāzera (DL) un fotodetektora (FD) novietojums uz optiskā sola.

2. Griez polarizatoru P, līdz fotodetektors FD uzrāda maksimālo sprieguma vērtību. Tas nozīmē, ka tagad polarizatora caurlaidības ass ir orientēta **paralēli** diožu lāzera starojuma polarizācijas virzienam.

3. Nemainot strāvas stiprumu lāzera diodē, nostiprini otro polarizatoru (turpmāk to sauksim arī par analizatoru) uz optiskā sola tuvāk fotodetektoram un pārļiecinies, ka sasniegta nepieciešamā orientācija:

- gaismas avots, fotodiode un abu polarizatoru centri atrodas uz vienas taisnes;
- arī otra polarizatora virsma ir perpendikulāra gaismas staram;
- arī otra polarizatora caurlaidības ass ir paralēla lāzera starojuma polarizācijas virzienam.

4. Ieslēdz funkciju generatoru un noregulē tā, lai izejā būtu 100 Hz taisnstūrveida spriegums. Funkciju generators jāieslēdz, iespiežot taustiņu "Power". Pēc noklusējuma izejā "Func Out" tiek padots sinusveida "SIN" spriegums ar 11.16 kHz frekvenci.



8. att.: Funkciju ģenerators. Ar bultiņām iezīmēti darbā izmantojamie taustiņi, regulatori kontaktligzdas.

Lai ieregulētu 100 Hz diapazonu, jānospiež taustiņš "Range/Attn" un ar virziena taustiņiem ◀ vai ▶ jāpārslēdz uz 20 - 200 Hz diapazonu. Frekvences precīzu vērtību ieregulē ar grozāmo regulatoru "Frequency".

Lai ieregulētu taisnstūrveida 100 Hz spriegumu, jānospiež taustiņš "Mode/Func" un tad ar virziena taustiņiem ◀ vai ▶ jāpārslēdz uz "SQUARE".

Izejas spriegumu maina ar grozāmo regulatoru "Amplitude".

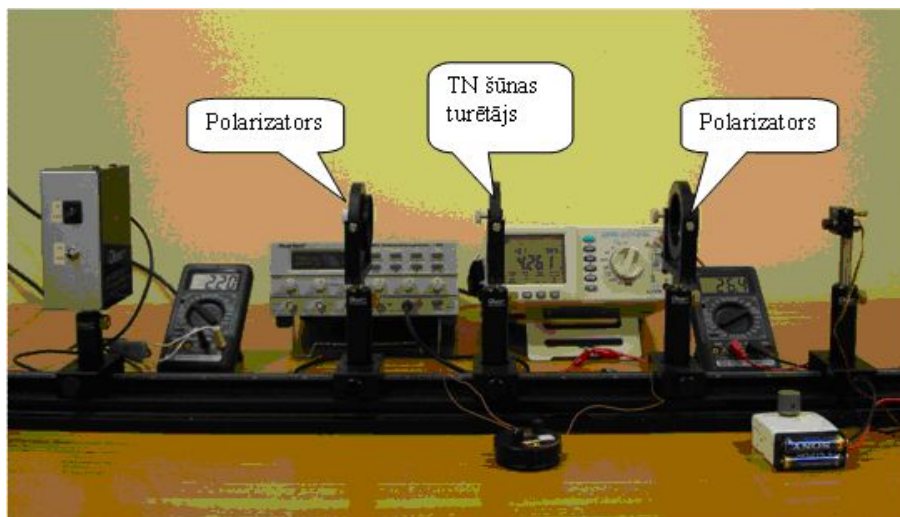
5. Lai varētu mērīt izejas spriegumu, izmanto galda multimetru "APPA 207". To ieslēdz, pagriežot rokturi pret atzīmi " $V \cong$ ". Melno vadu pievieno kontaktligzdai "COM", sarkano vadu - kontaktligzdai " $\varnothing CV\Omega$ ".

Lai mērītu maiņspriegumu, jānospiež zilais taustiņš. Uz displeja redzama taisnstūrveida sprieguma efektīvā vērtība, kā arī frekvence.



9. att.: Galda multimetrs APPA 207. Ar bultiņām iezīmēti darbā izmantojamie taustiņi un regulatori.

6. Novieto uz optiskās slīdes starp abiem paralēli noorientētajiem polarizatoriem šķidro kristālu šūnu ar 90 °C pagriezienu leņķi (turpmāk tekstā - 90 °C TN šūna).



10. att.: Eksperimentālā iekārta šķidro kristālu šūnas (TN) raksturlielumu noteikšanai. Šūna jāievieto turētājā, kas atrodas starp abiem polarizatoriem.

8. Griez šūnu, līdz fotodetektors rāda minimālo izejas spriegumu. Tas nozīmē, ka šūna ieregulēta t.s. "tumšajā" režīmā.

9. Noregulē funkciju ģeneratora izejā minimālo taisnstūrveida 100 Hz izejas spriegumu (apmēram 0,7 V) un pievieno šūnai spriegumu.

10. Ar funkciju ģeneratora grozāmo regulatoru "Amplitude" maini šūnai pielikto spriegumu līdz apmēram 7,2 V un nolasi atbilstošās fotodetektora sprieguma U vērtības. Rezultātus apkopo tabulā un attēlo grafiski sakarību $U = f(V)$ Norāde. Kad ārējā elektriskā lauka spriegums pārsniedz kritisko vērtību, gaismas caurlaidība ļoti strauji un pēkšņi palielinās. Straujas eksperimentālo datu maiņas apgabalos mērījumus veic biežāk.

11. Nosaki tās ārējā sprieguma vērtības V_{90} un V_{10} , kas atbilst 90% un 10% no gaismas maksimālās intensitātes vērtībām U . Ja nepieciešams, rezultātu iegūšanai izmanto interpolāciju. Aprēķini pārslēgšanās koeficienta skaitlisko vērtību:

$$\gamma = \frac{V_{90} - V_{10}}{V_{10}}$$

Novērtē γ noteikšanas kļūdu.

12. Uzzīmē atsevišķu grafiku $U = f(V)$, lai precīzi noteiktu kritiskā sprieguma vērtību V_c . Ja nepieciešams, rezultāta iegūšanai izmanto interpolāciju. Novērtē rezultāta kļūdu.

Mērījumu rezultāti un datu apstrāde

2. tabula. Fotodetektora sprieguma atkarība no ārējā pieliktā sprieguma

$V \pm \Delta V$ (V)	$U \pm \Delta U$ (V)	$U \pm \Delta U$ (V)	$V \pm \Delta V$ (V)

Attēlo grafiski sakarību $U = f(V)$

Nosaki tās ārējā sprieguma vērtības V_{90} un V_{10} , kas atbilst 90% un 10% no gaismas maksimālās intensitātes vērtībām U . Ja nepieciešams, rezultātu iegūšanai izmanto interpolāciju.

Aprēķini pārslēgšanās koeficienta γ skaitlisko vērtību un novērtē kļūdu. Uzzīmē atsevišķu grafiku $U = f(V)$ palielinātā mērogā, lai precīzi noteiktu kritiskā sprieguma vērtību V_c . Novērtē rezultāta kļūdu.

C daļa. Paralēli orientētas šķidro kristālu šūnas dubultlaušana un elektrooptiskās pārslēgšanās raksturlielumi.

Darba uzdevumi

C1. Izmērīt paralēlās $T_{\parallel}$ un perpendikulārās $T_{\perp}$ gaismas intensitātes komponentes un aprēķināt fāzu nobīdes un dubultlaušanas lielumu šķidro kristālu šūnai.

C2. Iegūt elektrooptiskās pārslēgšanās grafiku kā intensitātes $T_{\parallel}$ atkarību no ārējā sprieguma V paralēli orientētai šķidro kristālu šūnai pie $\theta = 45^\circ$ konfigurācijas.

C3. No grafika atrast ārējā pieliktā elektriskā sprieguma vērtību V_{π} , kas šajā šķidro kristālu šūnā izsauc fāzu nobīdi par π (vai 180°).

Darba gaita

1. Ieregulē analizatora caurlaidības asi **perpendikulāri** polarizatora caurlaidības asij. Fotodetektoram jāuzrāda ļoti niecīga (tuva nullei) gaismas intensitāte.

2. Ievieto starp krustotajiem polarizatoriem paralēli orientēto šķidro kristālu šūnu.

3. Izveido $\theta = 45^\circ$ konfigurāciju pie ārējā sprieguma $V = 0$, kā parādīts 25.attēlā. Griez šūnu, līdz caurizgājušās gaismas intensitāte sasniedz maksimālo vērtību. Šādi iekārta tiek ieregulēta 45° darba režīmā.

4. Nolasi perpendikulārās $T_{\perp}$ intensitātes vērtību.

5. Pagriez analizatoru par 90° un izmēri caurizgājušās gaismas intensitāti $T_{\parallel}$, kad analizatora caurlaidības ass noorientēta paralēli polarizatora asij (pie ārējā sprieguma $V = 0$).

6. Izmantojot izmērītos $T_{\perp}$ un $T_{\parallel}$ lielumus, izrēķini precīzu fāzu nobīdes lielumu δ un precīzu dubultlaušanas Δn lielumu šķidro kristālu šūnai pie $V = 0$. Pieņem, ka diožu lāzera gaismas viļņa garums vienāds ar 650 nm, šķidro kristālu slāņa biezums - $7,7\mu m$., Aptuveni zināms arī, ka $\Delta n \approx 0,25$.

7. Ar funkciju ģeneratora palīdzību pievadi 100 Hz taisnstūrveida spriegumu šūnas stikla pamatnes elektrodiem. Maini ārējo spriegumu no 0 līdz 5 voltiem un uzņem elektrooptiskās pārslēgšanās līkni (intensitātes $T_{\parallel}$ atkarību no sprieguma V). **Analizatora un polarizatora caurlaidības asīm jābūt paralēlām.**

Norāde. Straujas eksperimentālo datu izmaiņas apgabalos veic mērījumus biežāk (it īpaši, 0, 5 – 4, 0V spriegumu apgabalā).

8. Mērījumu rezultātus apkopo tabulā un attēlo grafiski sakarību $T_{\parallel} = f(V)$.

9. Uzzīmē otru grafiku palielinātā mērogā ārējā pieliktā elektriskā sprieguma vērtības

V_π . noteikšanai. Lai noteiktu precīzu V_π lielumu, iespējams, būs nepieciešama interpolācija.

Mērījumu rezultāti un datu apstrāde

Izmantojot izmērītos $T_\perp$ un $T_\parallel$ lielumus, izrēķini precīzu fāzu nobīdes lielumu δ un precīzu dubultlaušanas Δn lielumu šķidro kristālu šūnai pie $V = 0$.

3.tabula. Fotodetektora sprieguma atkarība no ārējā pieliktā sprieguma paralēli orientētai šķidro kristālu šūnai.

$V \pm \Delta V$ (V)	$U \pm \Delta U$ (V)	$V \pm \Delta V$ (V)	$U \pm \Delta U$ (V)

Attēlo grafiski sakarību $T_\parallel = f(V)$.

Uzzīmē otru grafiku precīzai ārējā pieliktā elektriskā sprieguma vērtības V_π . noteikšanai. Novērtē rezultāta kļūdu.

Rezultāti un secinājumi

Diožu lāzera strāvas un fotodetektora sprieguma atkarības lineārā daļa ir mA diapazonā.

Sliekšņa strāvas skaitliskā vērtība ir

Optimālās strāvas vērtība ir

Spriegumu V_{90} un V_{10} skaitliskās vērtības ir

Pārslēgšanās koeficienta μ skaitliskā vērtība ir
Kritiskā sprieguma V_c vērtība ir

Fāžu starpības δ skaitliskā vērtība ir
Dubultlaušanas Δn precīza vērtība ir
Ārējā sprieguma V_π skaitliskā vērtība ir

Literatūra

1. Nanoelectronics and Information Technology. Advanced Electronic Materials and Novel devices. Rainer Waser (Editor). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2003. ISBN 3-527-40363-9
2. Interneta resurss: 3. O.Students. Optika. Rīga: "Zvaigzne", 1971.

Papildliteratūra

1. S.Chandrasekhar. Liquid crystals. Cambridge University Press, 1977. (CFI ir pieejams tulkojums krievu valodā)
2. E.Hecht. Optics. Addison-Wesley publishing company, 1987. ISBN 0-201-11611-1.

Latvijas Universitāte
Fizikas un matemātikas fakultāte
Fizikas bakalaura studiju programma
1.kurss

(vārds, uzvārds)

Laboratorijas darbs

"Šķidro kristālu optiskās īpašības"

200 . gada

Darba uzdevumi

A daļa. Diožu lāzera un fotodetektora raksturlielumi

A1. Noteikt diožu lāzera gaismas intensitātes U atkarību no strāvas stipruma I . Attēlot grafiski sakarību $U = f(I)$.

A2. Ar bultām ($\downarrow$) atzīmēt grafika lineāro posmu. Atrast maksimālās strāvas vērtību I_{max} un sliekšņa strāvas stiprumu I_{sl} . Novērtēt iegūtā rezultāta kļūdu. Aprēķināt optimālās strāvas I_{opt} vērtību.

B daļa. Nematisko šķidro kristālu 90 °C šūnas (TN) raksturlielumi

B1. Veic mērījumus, un uzzīmē 90 °C TN (twisted nematic) šūnas elektrooptiskās pārslēgšanās grafiku (intensitātes jeb fotodetektora sprieguma U atkarību no ārējā sprieguma V). Nosaki pārslēgšanās koeficientu γ , kur γ tiek definēts kā attiecība $(V_{90} - V_{10})/V_{10}$.

B2. Nosaki 90 °C TN šūnas sprieguma kritisko vērtību V_c . Uzzīmē grafiku un detalizēti parādi, kā šī sprieguma vērtība tika noteikta.

C daļa. Paralēli orientētas šķidro kristālu šūnas dubultlaušana un elektrooptiskās pārslēgšanās raksturlielumi.

C1. Izmērit paralēlās perpendikulārās $T_{\perp}$ gaismas intensitātes komponentes un aprēķināt fāzu nobīdes un dubultlaušanas lielumu šķidro kristālu šūnai.

C2. Iegūt elektrooptiskās pārslēgšanās grafiku kā intensitātes sprieguma V paralēli orientētai šķidro kristālu šūnai pie $\theta = 45^\circ$ konfigurācijas.

C3. No grafika atrast ārējā pieliktā elektriskā sprieguma vērtību V_{π} , kas šajā šķidro kristālu šūnā izsauc fāzu nobīdi par π (vai 180°).

Darba piederumi

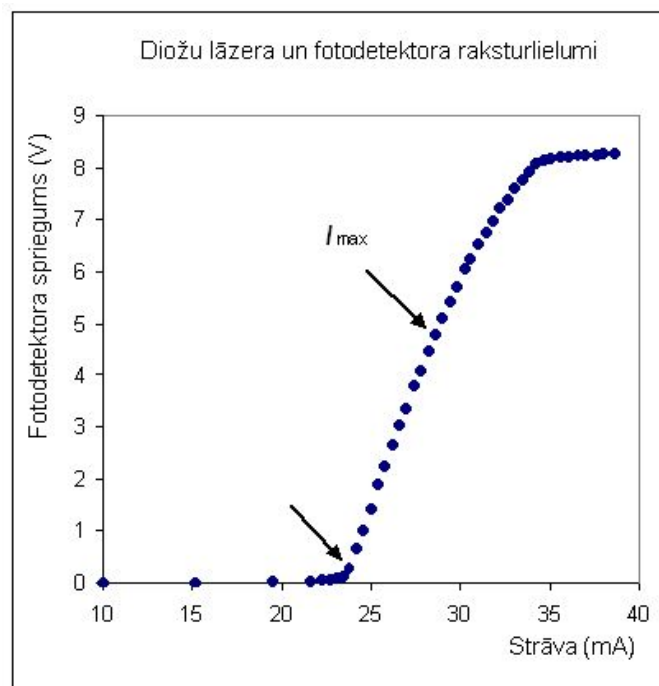
- Optiskā sliede, turētāji
- Diožu lāzers (izstarotās gaismas viļņa garums 650 nm)
- Fotodetektors
- Polarizators - 2 gab.
- Šķidro kristālu šūna - 2 gab.
- Multimetrs - 2 gab.
- Galda multimetrs
- Funkciju ģenerators
- Potenciometrs un divi AA tipa galvaniskie elementi

Mērījumu rezultāti un datu apstrāde

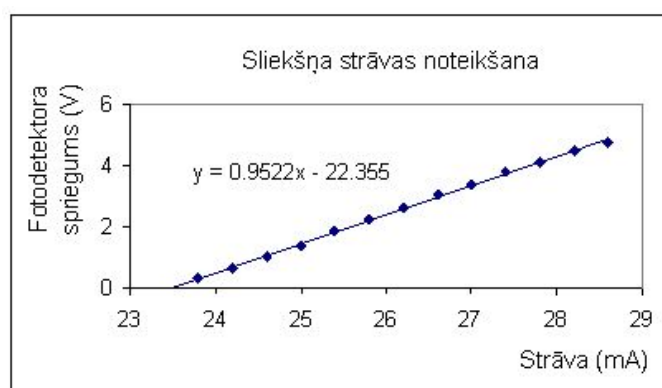
A. daļa. Diožu lāzera un fotodetektora raksturlielumi

1. tabula Fotodetektora spriegums atkarībā no cauri diodei plūstošās strāvas.

$I \pm \Delta I$ (mA)	$U \pm \Delta U$ (V)	$I \pm \Delta I$ (mA)	$U \pm \Delta U$ (V)
10.00 ± 0.1	0.00 ± 0.01	29.40 ± 0.1	5.44 ± 0.01
15.20	0.01	29.80	5.72
19.50	0.02	30.20	6.05
21.60	0.03	30.50	6.25
22.20	0.05	31.00	6.55
22.70	0.06	31.40	6.75
23.00	0.09	31.80	6.99
23.40	0.12	32.20	7.22
23.80	0.30	32.60	7.40
24.20	0.66	33.00	7.60
24.60	1.02	33.40	7.78
25.00	1.41	33.80	7.93
25.40	1.88	34.20	8.07
25.80	2.23	34.60	8.14
26.20	2.64	35.00	8.18
26.60	3.04	35.50	8.20
27.00	3.36	36.00	8.22
27.40	3.78	36.50	8.24
27.80	4.12	37.00	8.24
28.20	4.48	37.60	8.25
28.60	4.79	38.00	8.26
29.00	5.13	38.60	8.27



Grafika $U = f(I)$ lineārais posms ir no 23,40 mA līdz 28,60 mA. Maksimālā strāva $I_{max} = 28,6$ mA



Aproksimējot grafika lineāro posmu ar taisni, iegūst vienādojumu, no kura aprēķināma sliekšņa strāvas vērtība. Ja $y = 0$, tad

$$x = \frac{22.355}{0.9522} = 23.48 \text{ mA}$$

Lai novērtētu kļūdu, ērti izmantot regresijas analīzi. Excel programmā komandu joslā uzklikšķinām "Tools", tad "Data Analysis", pēc tam - "Regression". (Ja MS Excel rīkos nav atrodama datu analīzes programma, tad tā ir jāinstalē. Uzklikšķinām "Tools", tad "Add-Insert", pēc tam "Analysis Toolpak").

Veicot regresijas analīzi datiem I un V , iegūst apjomīgu tabulu (visas kolonas nav attēlotas), no kuras šobrīd nepieciešama tikai abu mainīgo lielumu ("Intercept" un "X Variable 1") standartklūdas:

SUMMARY OUTPUT			
<i>Regression Statistics</i>			
Multiple R	0.99953945		
R Square	0.99907911		
Adjusted R Square	0.99899539		
Standard Error	0.04703602		
Observations	13		
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>
Intercept	-22.3545055	0.228740812	-97.7285
X Variable 1	0.9521978	0.008716355	109.2427

Relatīvā kļūda

$$\frac{\Delta I_{sl}}{I_{sl}} = \frac{0.0087}{0.9522} + \frac{0.2287}{22.3545} = 0.0092 + 0.0102 = 0.0194$$

$$\Delta I_{sl} = 0.0194 \cdot 23.48 = 0.46 \approx 0.5$$

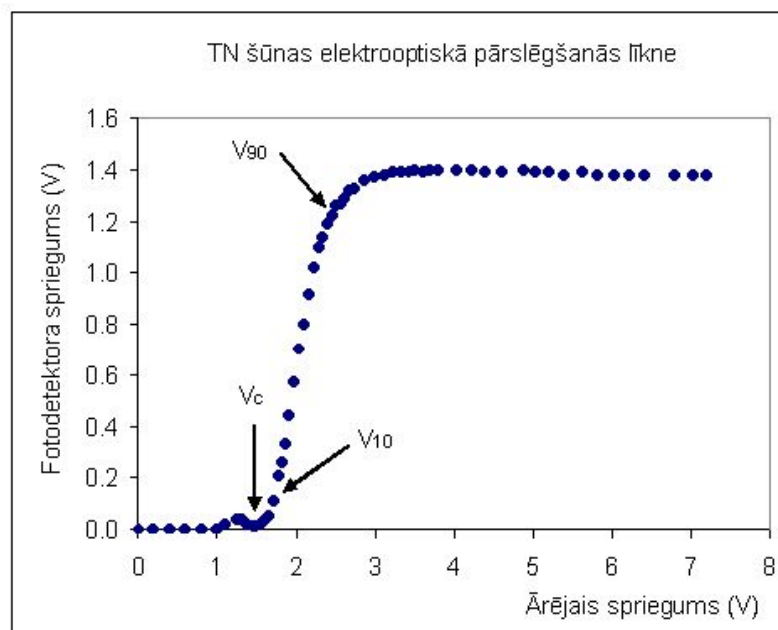
Sliekšņa strāvas skaitliskā vērtība $I_{sl} = 23,5 \pm 0,5mA (\approx 2\%)$. Kļūda atbilst vienai standartnovirzei.

Optimālā strāvas vērtība $I_{opt} = I_{sl} + 2(I_{max} - I_{sl})/3 = 26,9mA$.

B daļa. Nematisko šķidro kristālu 90 °C šūnas (TN) raksturlielumi

2. tabula. Fotodetektora sprieguma atkarība no ārējā pieliktā sprieguma

$V \pm \Delta V (V)$	$U \pm \Delta U (V)$	$V \pm \Delta V (V)$	$U \pm \Delta U (V)$
$\Delta V = \pm 0.01 V$	$\Delta U = \pm 0.01 V$	$\Delta V = \pm 0.01 V$	$\Delta U = \pm 0.01 V$
0.00	0.00	2.44	1.22
0.20	0.00	2.50	1.26
0.40	0.00	2.55	1.27
0.60	0.00	2.60	1.29
0.80	0.00	2.67	1.32
1.00	0.00	2.72	1.33
1.10	0.02	2.85	1.36
1.24	0.04	2.97	1.37
1.30	0.04	3.11	1.38
1.34	0.03	3.20	1.39
1.38	0.02	3.32	1.39
1.45	0.01	3.41	1.39
1.48	0.01	3.50	1.40
1.55	0.02	3.60	1.39
1.59	0.03	3.70	1.40
1.64	0.05	3.80	1.40
1.71	0.11	4.03	1.40
1.78	0.21	4.22	1.40
1.81	0.26	4.40	1.39
1.85	0.33	4.61	1.39
1.90	0.44	4.87	1.40
1.96	0.57	5.03	1.39
2.03	0.70	5.20	1.39
2.08	0.80	5.39	1.38
2.15	0.92	5.61	1.39
2.21	1.02	5.81	1.38
2.28	1.10	6.02	1.38
2.33	1.14	6.21	1.38
2.39	1.19	6.40	1.38
		6.80	1.38
		7.02	1.38
		7.20	1.38



Ārējā sprieguma vērtības $V_{90} = 2,50V$ un $V_{10} = 1,74V$, kas atbilst 90% un 10% no gaismas maksimālās intensitātes vērtības: $U_{max} = 1,40V$.
 (90% no $U_{max} = 1,26V$, 10% no $U_{max} = 0,14V$)
 Pārslēgšanās koeficients:

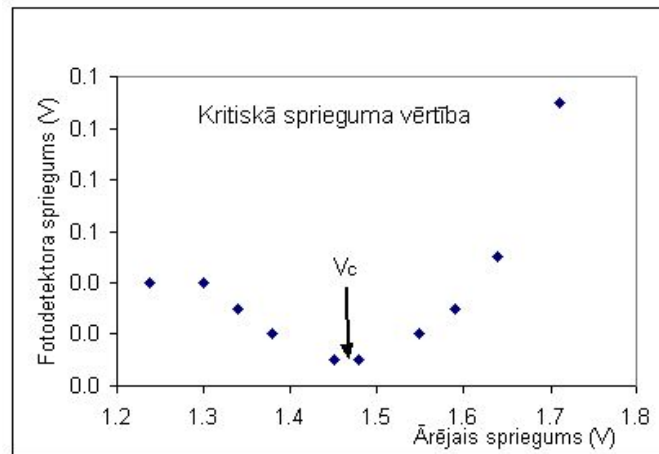
$$\gamma = \frac{2.50 - 1.74}{1.74} = \frac{0.76}{1.74} \approx 0.44$$

Relatīvā kļūda:

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{0.01 + 0.01}{2.50 - 1.74} + \frac{0.01}{1.74} = \frac{0.02}{0.76} + \frac{0.01}{1.74} = 0.026 + 0.006 = 0.032$$

$$\Delta\gamma = 0.032 \cdot 0.44 = 0.014 \approx 0.01$$

$\gamma = 0.44 \pm 0.01 (\approx 2\%)$, kļūda atbilst vienai standartnovirzei.



Kritiskā sprieguma vērtība $V_c = 1,47 \pm 0,01 V$.

C daļa. Paralēli orientētas šķidro kristālu šūnas dubultlaušana un elektrooptiskās pārslēgšanās raksturlielumi.

$$T_{\uparrow\uparrow} = 0.31 \pm 0.01 V \text{ un } T_{\perp} = 1.04 \pm 0.01 V.$$

$$\delta = 2 \cdot 1.07 = 2.14 + 2\pi m,$$

vai

$$\delta = 2 \cdot (-1.07) = -2.14 + 2\pi m,$$

No dotā zināms, ka fāžu starpības aptuvenā skaitliskā vērtība ir

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \Delta n \approx \frac{2\pi}{0.65} 7.7 \cdot 0.25 \approx 18.61 \text{ rad}$$

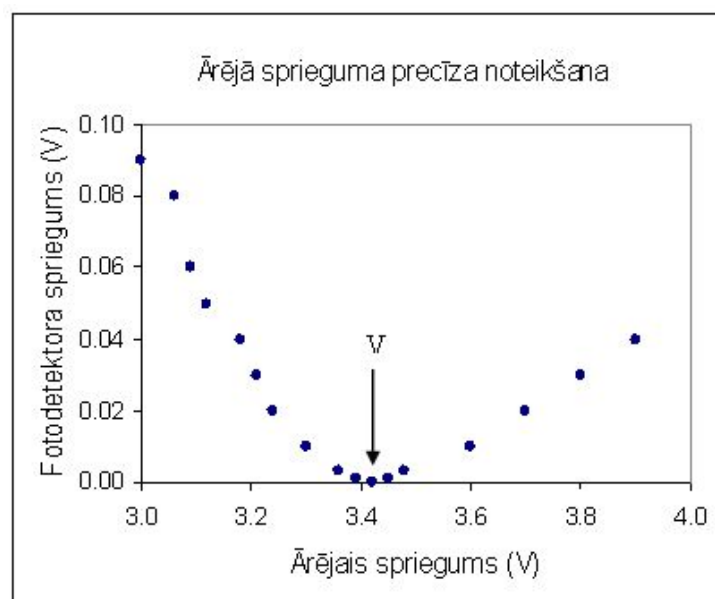
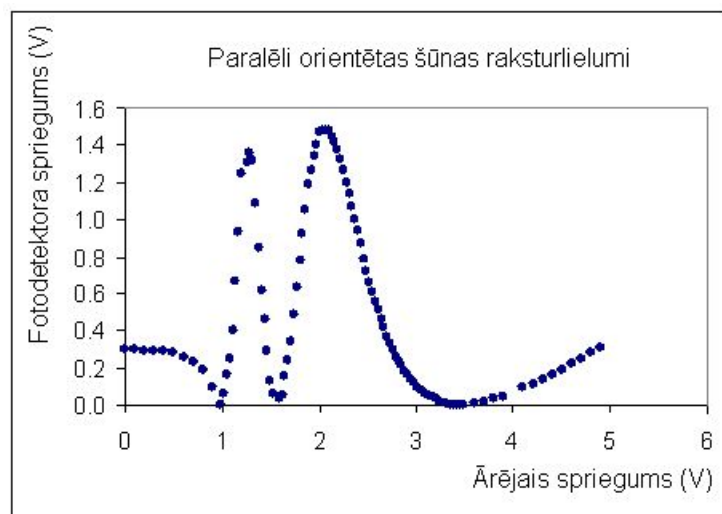
Vistuvāko skaitli šai vērtībai iegūst, ja $m = 3$ un $\delta = -2.14 + 2\pi m$; $\delta = 16.71$.

Dubultlaušanas lielums šķidro kristālu šūnai pie $V = 0$ ir:

$$\Delta n = \frac{\delta \lambda}{2\pi d} = \frac{16.74 \cdot 0.65}{2\pi \cdot 7.7} \approx 0.22$$

3.tabula. Fotodetektora sprieguma atkarība no ārējā pieliktā sprieguma paralēli orientētai šķidro kristālu šūnai.

$V \pm \Delta V (V)$	$U \pm \Delta U (V)$	$V \pm \Delta V (V)$	$U \pm \Delta U (V)$
$\Delta V = \pm 0.01 V$	$\Delta U = \pm 0.01 V$	$\Delta V = \pm 0.01 V$	$\Delta U = \pm 0.01 V$
1.80	0.78	2.85	0.21
1.83	0.92	2.88	0.18
1.86	1.05	2.91	0.16
1.89	1.19	2.94	0.14
1.92	1.27	2.97	0.12
1.95	1.34	3.00	0.09
1.98	1.40	3.06	0.08
2.01	1.47	3.09	0.06
2.04	1.48	3.12	0.05
2.07	1.48	3.18	0.04
2.10	1.48	3.21	0.03
2.13	1.45	3.24	0.02
2.16	1.42	3.30	0.01
2.19	1.38	3.36	0.003
2.22	1.33	3.39	0.001
2.25	1.27	3.42	0.000
2.28	1.20	3.45	0.001
2.31	1.14	3.48	0.003
2.34	1.07	3.60	0.010
2.37	1.00	3.70	0.020
2.40	0.94	3.80	0.030
2.43	0.87	3.90	0.040
2.46	0.79	4.10	0.090
2.49	0.72	4.20	0.110
2.52	0.66	4.30	0.140
2.55	0.61	4.40	0.160
2.58	0.56	4.50	0.190
2.61	0.51	4.60	0.220
2.64	0.46	4.70	0.250
2.67	0.42	4.80	0.280
2.70	0.37	4.90	0.310
2.73	0.33		
2.76	0.30		
2.79	0.26		
2.82	0.23		



Ārējā elektriskā sprieguma skaitliskā vērtība, pie kuras fāžu nobīde kļūst vienāda ar 180° , $V_\pi = 3,42 \pm 0,01V$.

Rezultāti un secinājumi

Diožu lāzera strāvas un fotodetektora sprieguma atkarības lineārā daļa ir strāvu diapazonā no 23,4 mA līdz 28,6 mA.

Maksimālā strāva lineārajam apgabalam $I_{max} = 28,6 \text{ mA}$.

Sliekšņa strāvas skaitliskā vērtība $I_{sl} = 23,5 \pm 0,5 \text{ mA}$.

Optimālā strāvas vērtība $I_{opt} = I_{sl} + 2(I_{max} - I_{sl})/3 = 26,9 \text{ mA}$.

Ārējā sprieguma vērtības $V_{90} = 2,50 \text{ V}$ un $V_{10} = 1,74 \text{ V}$, kas atbilst 90% un 10% no gaismas maksimālās intensitātes vērtības $U_{max} = 1,40 \text{ V}$.

Pārslēgšanās koeficients $\gamma = 0,44 \pm 0,01$.

Kritiskā sprieguma vērtība $V_c = 1,47 \pm 0,01 \text{ V}$.

Fāžu nobīdes skaitliskā vērtība $\delta = 16,70$.

Dubultlaušanas lielums šķidro kristālu šūnai pie $V = 0$ ir $\Delta n = 0,22$.

Ārējā elektriskā sprieguma skaitliskā vērtība, pie kuras fāžu nobīde kļūst vienāda ar 180° , $V_\pi = 3,42 \pm 0,01 \text{ V}$.