

VILNIAUS PEDAGOGINIS UNIVERSITETAS

Stasys Pajeda

**POLIMERE DISPERGUOTO
NEMATINIO SKYSTOJO KRISTALO
ELEKTROOPTINĖS SAVYBĖS**

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, fizika, kondensuotos medžiagos (P260
)

Vilnius, 2001

Darbas atliktas 1990-2000 m. Vilniaus pedagoginiame universitete, Skystųjų kristalų laboratorijoje, teorinės fizikos katedroje.

Doktorantūros teisė suteikta kartu su Fizikos institutu 1998.04.14 Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimu Nr. 457.

Disertacija ginama eksternu .

Doktorantūros komitetas :

Pirmininkas ir darbo vadovas:

Doc. dr. **Rimas VAIŠNORAS** (Vilniaus pedagoginis universitetas, fiziniai mokslai, fizika, kondensuotos medžiagos P260) .

Nariai :

Prof. habil. dr. **Algirdas AUDZIJonis** (Vilniaus pedagoginis universitetas, fiziniai mokslai, fizika, kondensuotos medžiagos P260) .

Prof. habil. dr. **Aleksandr DEMENTJEV** (Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika, kondensuotos medžiagos P260) .

Prof. habil. dr. **Leonas VALKŪNAS** (Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika, kondensuotos medžiagos P260) .

Dr. **Alfonsas RĖZA** (Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika, puslaidininkių fizika P265) .

Oponentai:

Prof. habil. dr. **Liudvikas KIMTYS** (Vilniaus Universitetas, fiziniai mokslai, fizika, kondensuotos medžiagos P260) .

Dr. **Alfonsas PECKUS** (Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika, kondensuotos medžiagos 260).

Disertacija bus ginama viešame doktorantūros komiteto posėdyje, kuris įvyks 2001 m. birželio d. val. Vilniaus pedagoginio universiteto 204 auditorijoje .

Adresas: *Studentų g. 39, LT- 2034 Vilnius, Lietuva .*

Disertacijos santrauka išsiųsta 2001 m. gegužės ... d.

Su disertacija galima susipažinti Vilniaus pedagoginio universiteto ir Fizikos instituto bibliotekose .

Atsiliepimus siųsti adresu : *Mokslo skyriui, Vilniaus pedagoginis universitetas, Studentų 39, LT-2004 Vilnius, Tel. : (22)790 053, faks. : (22)790 548 .*

VILNIUS PEDAGOGICAL UNIVERSITY

Stasys Pajeda

**ELECTROOPTICAL PROPERTIES OF THE
POLYMER DISPERSED NEMATIC LIQUID
CRYSTAL**

Summary of doctoral dissertation
physical sciences, physics, condensed materials (P260)

Vilnius 2001

This work has performed in 1990 – 2000 at the Vilnius Pedagogical University. The right of doctoral studies is granted with Institute of Physics in 1998 04 14 by decision No. 457 of the Government of the Republic of Lithuania .

Doctoral Committee :

Chairman :

Doc. dr. **Rimas VAIŠNORAS** (Vilnius pedagogical university, physical sciences, physics, condensed materials P260) .

Members :

Prof. habil. dr. **Algirdas AUDZIJonis** (Vilnius pedagogical university, physical sciences, physics, condensed materials P260) .

Prof. habil. dr. **Aleksandr DEMENTJEV** (Institute of Physics, physical sciences, physics, condensed materials P260) .

Prof. habil. dr. **Leonas VALKŪNAS** (Institute of Physics, physical sciences, physics, condensed materials P260) .

Dr. **Alfonsas RĖZA** (Semiconductor Physics Institute, physical sciences, physics, semiconductor physics P265) .

Opponents :

Prof. habil. dr. **Liudvikas KIMTYS** (Vilnius University, physical sciences, physics, condensed materials P260) .

Dr. **Alfonsas PECKUS** (Institute of Physics, physical sciences, physics, condensed materials P260) .

The Doctoral dissertation will be presented for public defense at Vilnius Pedagogical University, Studentų str. 39, Vilnius, on 2001.

The abstract of the dissertation was sent on 2001.

A copy of the dissertattion is available at the libraries Vilnius pedagogical university and Institute of Physics .

Skystųjų kristalų fizikos pagrindai buvo sukurti trečiajame šio amžiaus dešimtmetyje, tačiau praktinę taikomąją reikšmę jie įgijo tik aštuntojo dešimtmečio pradžioje ir nuo tada prasidėjo tikras mokslo apie skystuosius kristalus (SK) šturmas. Pradėti smulkiai nagrinėti atskiri efektai įvairiose mezofazėse bei struktūrose - visa, kas aktualu praktiniam taikymui. Visa tai sąlygojo audringas elektronikos vystymasis ir poreikis lengvai suderinamoms su esamais elektroniniais elementais informacijos atvaizdavimo priemonėms (indikatoriai, displejai, kompiuterių bei televizorių ekranai). Skystųjų kristalų pagrindu pradėtos kurti ir sudėtingesnės informacijos optinio apdorojimo priemonės - tai įvairaus tipo modulatoriai, daugelio elementų matricos, optiškai valdomi elementai, atminties elementai.

Devintojo dešimtmečio pradžioje Kento universitete buvo pradėtos tirti polimere disperguoto nematinio skystojo kristalo (PDLC - "*polymer dispersed liquid crystal*", angl.) struktūros. Vėliau šie tyrimai pagrindė kompanijoje "Taliku" įdiegtą visiškai naujo tipo skystųjų kristalų technologiją, kuri sukėlė susidomėjimą visame pasaulyje, nes parodė kelią, kuriuo einant galima išspręsti daugelį skystakristalinių displejų gamybos technologinių problemų, o taip pat atsivėrė didelė naujų taikymų sritis. To pasekoje labai suaktyvėjo skystakristalinių kompozitų įvairiapusiai tyrimai. PDLC struktūros, kaip ir apskritai skystieji kristalai, yra daugiaplanis įvairių mokslo sričių tyrimo objektas. Sumaišytas (disperguotas) skystasis kristalas su polimeru suformuoja naują kompozicinę medžiagą su trimate struktūra. Keičiant polimero sudėtį, polimero struktūrą ar skystojo kristalo sudėtį ir fazes yra stebimi nauji efektai, kurių nėra vien polimere ar skystajame kristale. Todėl šios struktūros domina ir teoretikus, ir inžinierius, ieškančius konkrečių praktinių taikymų.

Šis darbas yra skirtas nematinės skystakristalinės (NSK) medžiagos, patalpintos į mažas polimero erdves (lašus, kanalus ir pan.), elektrooptinių savybių studijai. Šiose PDLC medžiagose stebimas didelis santykinis paviršinis plotas palyginus su tūriu. To pasekoje PDLC plėvės fizikinės charakteristikos yra sąlygotos tiek polimero paviršiaus, tiek NSK tūrio ir iki šiol dar gerai nesuprastos. PDLC medžiagos pasižymi stipria šviesos sklaida, kurią teoriškai nėra lengva tiksliai modeliuoti dėl skirtingo lašų dydžio bei jų formos.

Pagrindinis šio darbo **tikslas** yra *nematinio skystojo kristalo, patalpinto į mažas polimero erdves (lašo ar kanalo formos), elektrooptinių savybių tyrimai bei tokių kompozicinių medžiagų panaudojimo galimybės optinės atminties realizavimui.*

Todėl **svarbiausieji uždaviniai**, kurie buvo suformuluoti pradedant tyrimus, buvo šie :

1. Įsisavinti PDLC plėvelių gaminimo technologiją, esant skirtingoms šios kompozicinės medžiagos matricoms: polivinilbutiraliui ir epoksidinei dervai, sukurti tam reikalingą įrangą.
2. Išnagrinėti įvairios sudėties PDLC sluoksnių optines charakteristikas bei sluoksnių morfologiją, surasti sąlygas, kada ši kompozicinė medžiaga efektyviausiai sklaido šviesą.
3. Išnagrinėti išorinių poveikių (elektrinio lauko, deformacijos, temperatūros, šviesos) įtaką PDLC plėvės charakteristikoms.

Šio eksperimentinio darbo *mokslinį naujumą* patvirtina tai, kad jame pirmą kartą buvo:

1. Geometriškai aproksimuojant PDLC struktūros parametrus ir remiantis Rayleigh - Gans šviesos sklaidos teorija, nustatyta, kad PDLC struktūros elektrooptines bei termooptines charakteristikas lemia SK šviesos lūžio rodiklio kitimas nuo suvidurkintos vertės iki vienos iš komponentių n_o ar n_e verčių, priklausomai nuo stebėjimo geometrijos ir SK dielektrinės anizotropijos ženklo. Nustatyta, kad orientuotos PDLC pralaidumo priklausomybę nuo šviesos poliarizacijos krypties apsprendžia NSK lašų geometriniai parametrai. Įrodyta, kad elektrooptinis efektas PDLC plėvėje vyksta be “slenksčio”, o pastarąjį imituoja tik funkcinė praėjusios šviesos intensyvumo priklausomybė nuo išorinio elektrinio lauko. Stebėtas ir aprašytas PDLC plėvės spektrinių charakteristikų kitimas veikiant išoriniam elektriniam laukui, pateiktas efekto modelis.
2. Stebėtas ir aprašytas termo-elektrooptinis atminties efektas PDLC struktūroje su polivinilbutiraliu matrica, ištirta efekto dinamika skirtingose struktūrose.
3. Nustatytas ryšys tarp šlyties deformacijos jėgos (kuomet kinta NSK lašų geometriniai parametrai) ir elektrooptinio perjungimo laikų.

Didelė dalis šiame darbe aprašytų tyrimų turi taikomąjį pobūdį. Iš tokių tyrimų rezultatų, pagal jų *praktinę vertę*, galima išskirti šiuos:

1. Sukurta metodika, leidžianti nustatyti NSK mikrolašų PDLC plėvėje vidutinį spindulį bei įgalinanti optimizuoti NSK sunaudojimą PDLC plėvelių gamyboje, sutaupant brangų skystąjį kristalą.
2. Parodyta daugiakartinio reversyvinės atminties įrašymo galimybė PDLC plėvėje bei ilgalaikis informacijos išsaugojimas.

Pagrindiniai disertacijoje ginami teiginiai:

1. PDLC struktūros elektrooptines bei termooptines charakteristikas lemia NSK šviesos lūžio rodiklio kitimas nuo suvidurkintos vertės iki vienos iš komponentų n_o ar n_e verčių, priklausomai nuo stebėjimo geometrijos ir NSK dielektrinės anizotropijos ženklo.
2. Elektrooptinis efektas PDLC plėvėje vyksta be “slenksčio”, o pastarąjį imituoja tik funkcinė praėjusios šviesos intensyvumo priklausomybė nuo pridėto išorinio elektrinio lauko.
3. Orientuotos PDLC pralaidumo priklausomybę nuo šviesos poliarizacijos krypties apsprendžia NSK lašų geometriniai parametrai.
4. PDLC spektrinių charakteristikų kitimą veikiant elektriniam laukui lemia NSK šviesos lūžio rodiklio kitimas stebėjimo kryptimi.
5. PDLC struktūrose su polivinilbutiraliu matrica stebimas termo-elektrooptinis atminties efektas.

1 skyrius paskirtas tyrimų objekto - polimere disperguoto nematinio skystojo kristalo struktūrų apibūdinimui. 1.1. skirsnyje bendrais bruožais apibūdinami skystieji kristalai. Svarbiausios nematinio skystojo kristalo fizinės savybės aptariamos 1.2. skirsnyje.

VPU skystųjų kristalų laboratorijoje nepriklausomai buvo sukurta originali laboratorinių pavyzdžių gaminimo technologija, konkrečiai pritaikyta PDLC struktūrai polivinilbutiraliu (PVB) pagrindu. Šis polimeras buvo pasirinktas dėl jo spektrinių savybių - skaidrus matomaj spektro srityje, ir taip pat dėl to, kad šviesos lūžio rodiklis yra artimas naudojamų NSK lūžio rodikliams.

Technologijos esmę sudaro liejimas iš tirpalo. Priklausomai, kokio uždavinio sprendimui skirti pavyzdžiai, jie gaminami dviem būdais:

I. Pradžioje paruošiamas būsimo kompozito 10% tirpalas dioksane (PVB ir NSK lygiomis dalimis). Po to, atsižvelgiant į būsimo pavyzdžio plotą ir norimą gauti storį, apskaičiuojamas reikalingas tirpalo kiekis ir išliejamas ant paruošto pagrindo, kuriuo dažniausiai naudojama stiklinė plokštelė ar polimerinė plėvė su iš anksto užgarintu skaidriu $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ elektrodu. Pagal norimą gauti vidutinį SK lašų spindulį, parenkamas atitinkamas kondensacijos greitis, kuris, savo ruožtu, priklauso nuo palaikomos temperatūros. Maksimalus kondensacijos greitis pasiekiamas esant 150°C temperatūrai (30min). Prie aukštesnių temperatūrų prasideda polimero destrukcija. Po to uždedamas antras elektrodas su jo nešėju ir, mechaniškai suspaudus, struktūra ataušinama.

II. Antras būdas naudingas tuo atveju, kai, panaudoję tik vieną pavyzdį, norime išbandyti skirtingus SK ar SK su skirtingais dažais, ar tiesiog norint sudaryti reikiamą darbinio ploto konfigūraciją (pavyzdžiui skirtingo pločio juostos, taškai ir t.t.). Pradžioje pagaminamas 10% polimero tirpalas (be SK) ir išliejamas ant paruošto pagrindo. Garuojant tirpikliui, gauname porėtą polimero struktūrą. Po to į reikiamas vietas įterpiamas SK (gali būti su įterptu dažu). Pakaitinus struktūrą iki SK izotropinės būsenos, SK įsiskverbia į polimero poras. Toks SK įvedimo į polimerą būdas be jau minėtų privalumų, yra naudingas dar ir tuo, kad technologinio proceso metu SK molekulės įsiskverbia tik į stambesnes poras ir labai mažai difunduoja į paties polimero tūrį, dėl ko lieka labiau apibrėžti polimero fiziniai parametrai. Tokiu būdu suformuotoje struktūroje galima daug tiksliau prognozuoti optines bei elektrooptines charakteristikas. Svarbu ir tai, kad šiuo atveju yra taupoma brangi skystakristalinė medžiaga, kas aktualu ir eksperimentuojant ir gamyboje. Antras elektrodas užgarinamas taip pat, kaip ir pirmuoju atveju.

2 skyrius skirtas PDLC sruktūros elektrooptinių savybių tyrimui. Aprašoma šviesos sklaida šioje kompozicinėje medžiagoje, bei pateikta stebimų elektrooptinių efektų PDLC plėvėje interpretacija.

Lašuose esančio NSK šviesos lūžio rodiklį, kai struktūra nėra veikiamą išorinių jėgų, pirmam artėjime galime laikyti izotropiniu, kurio vertė:

$$\bar{n}^2 = \frac{1}{3}(n_e^2 + 2 \cdot n_o^2) \quad . \quad (1)$$

Veikiant elektriniam laukui (kai $\Delta\varepsilon > 0$), SK molekulės susiorientuos lauko veikimo kryptimi ir SK šviesos lūžio rodiklis lašuose šiuo atveju bus lygus n_o .

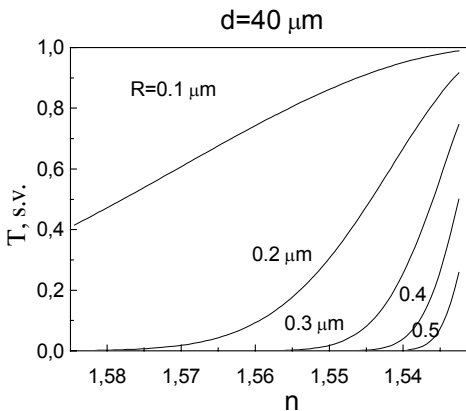
(į kitas komponentes galime neatsižvelgti, jei mus domina tik šviesos pluošto, praėjusio lauko veikimo kryptimi, intensyvumas). Jeigu atliekame stebėjimą lauko veikimo kryptimi, tai elektrooptinį efektą (teisingiau - jo eigą) PDLC struktūroje ir apspręs vienintelis, priklausomai nuo elektrinio lauko kintantis dydis, t.y. NSK šviesos lūžio rodiklis n , kintantis nuo \bar{n} iki n_0 . Esant apibrėžtoms struktūros komponentų optinių parametrų n_p , n_e , n_o (čia n_p - polimero šviesos lūžio rodiklis) vertėms, ryškų elektrooptinį atsaką įmanoma stebėti tik prie tam tikrų struktūros storio bei NSK lašų spindulių R verčių. Jei lašų spinduliai maži, tada plėvė lieka skaidri ir neužtamsėja, o jei spinduliai yra dideli, NSK lūžio rodiklio kitimas sąlygoja labai menką struktūros praskaidrėjimą (1.pav.) . Čia modeliavimui pasinaudota klasikinės Rayleigh - Gans išraiškos šviesos sklaidos efektyvumo faktoriui Q nustatyti :

$$Q = |m - 1|^2 \varphi(x) \tag{2}$$

ribiniu atveju:

$$Q = \frac{32}{27} (m - 1)^2 x^4 \tag{3}$$

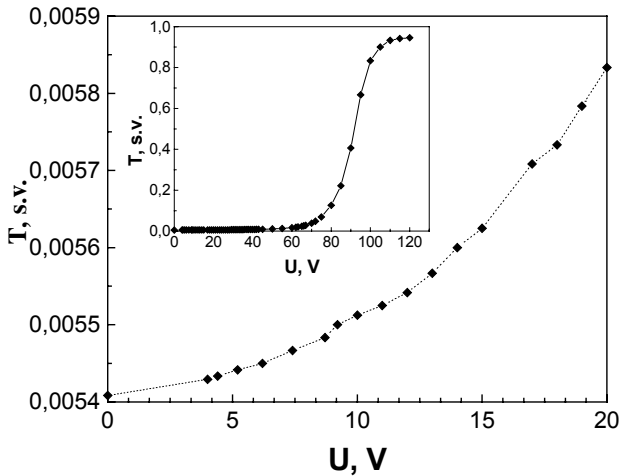
čia $x = \frac{2\pi R n_p}{\lambda}$ (4), ir $m = \frac{n}{n_p}$. (5)



1.pav. Apskaičiuotos optinio pralaidumo charakteristikos priklausomai nuo šviesos lūžio rodiklio kitimo esant skirtingiems SK lašų spinduliams. Struktūros storis $d=40\mu\text{m}$. Šviesos bangos ilgis $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$; $n_p=1.526$; $n_o=1.531$; $n_e=1.687$.

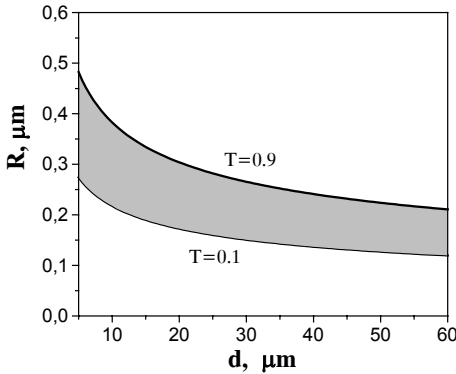
Galima pastebėti, kad net ir tiesiškai kintant NSK šviesos lūžio rodikliui, optinio pralaidumo charakteristika imituoja "slenkstį" skirtingose vietose, priklausomai nuo NSK lašų spindulio ar struktūros storio. Dėl to darosi problematiška įprastiniu būdu, remiantis kontinualine SK teorija, susieti optinio pralaidumo charakteristiką ir ypač, kas labai svarbu praktiniu požiūriu, slenkstinę jos vertę su SK medžiaginėmis konstantomis.

Yra žinoma, jei skystojo nematinio kristalo direktoriaus kryptis veikiančio magnetinio ar elektrinio lauko atžvilgiu sudaro tam tikrą kampą $0 < \phi < \pi/2$ ($\phi \neq 0$, $\phi \neq \pi/2$), tai Frederikso fazinis virsmas vyksta be ryškaus slenkščio. Tuo atveju, kai NSK yra disperguotas polimere, nepriklausomai ar turime radialinį, ar tangentinį NSK molekulių išsidėstymą lašuose - bet kuria kryptimi praeinant struktūrą, visada sutiksime NSK molekulių, orientuotų visomis kryptimis. Vadinasi PDLC plėvėje turėtumėme stebėti elektrooptinį atsaką net ir prie labai mažų laukų, daug mažesnių už tuos, prie kurių stebimas žymus struktūros praskaidrėjimas! 2.pav. parodyta eksperimentinė struktūros optinio pralaidumo priklausomybė nuo valdančios įtampos dydžio. Išnašoje parodyta pilna voltkontrastinė charakteristika. Gauti rezultatai rodo, kad NSK molekulės pradeda atsilenkinėti prie žymiai mažesnių įtampos verčių už "slenkstinę", iššaukiančias žymų PDLC struktūros praskaidrėjimą.



2.pav. PDLC struktūros optinio pralaidumo priklausomybė nuo valdančios įtampos dydžio. Išnašoje parodyta pilna voltkontrastinė charakteristika. Matuotos struktūros storis $d=40\mu\text{m}$.

Įvertinę realias darbinės moduliacijos sąlygas, kai optinio pralaidumo koeficientas kinta $0.1 < T < 0.9$ ribose, galime apskaičiuoti ir sudaryti diagramą, rodančią, prie kokių NSK lašų spindulių R bei struktūros storių d įmanoma realizuoti tokį pralaidumo koeficiento kitimą. (3.pav.)



3.pav. Apskaičiuota R-d diagrama, nusakanti PDLC darbinę sritį priklausomai nuo struktūros storio d ir NSK lašų spindulio R .

Ši diagrama leidžia pasirinkti tinkamus struktūros geometrinius parametrus, atsižvelgiant į konkretų sprendžiamą uždavinį. Pavyzdžiui, jei reikalingi mažesni elektrooptinio perjungimo laikai, o tai pasiekama esant mažesnio spindulio NSK lašams, galime apskaičiuoti, koks turėtų būti struktūros storis, kad gautumėme reikiamą moduliacijos gylį.

Pasinaudoję darbe pateiktu modeliu, galime nustatyti ryšį tarp SK kiekio polimere (lašų koncentracijos) ir geometrinių struktūros parametrų. Kai ne tiek svarbios laikinės perjungimo charakteristikos, šimtaprocentinę moduliaciją galima realizuoti struktūros gaminimui sunaudojus šimtą ir daugiau kartų mažesni SK kiekį. Tai leistų gaminant struktūras naudoti nominalų SK kiekį gaunant didžiulį ekonominį efektą.

2.6. skirsnyje pateikiama kombinuota skystojo kristalo lašų polimere dydžio nustatymo metodika. Tarkime, kad žinome SK ir polimero šviesos lūžio rodiklius n_0 , n_e ir n_p , taip pat nėra sudėtinga išmatuoti struktūros storį d . Tada galime išmatuoti struktūros optinio pralaidumo koeficientą T nesužadintoje būsenoje, arba esant visiškam praskaidrėjimui, ir, pasinaudoję Rayleigh - Gans teorijos išraiškėmis bei Reido ir Kuperio lentelėmis, galime rasti, kokios SK lašų spindulio vertės tenkina analitinę išraišką :

$$R_x = -\frac{3 V_s \cdot d}{4 \ln(T)} \left(\frac{n}{n_p} - 1 \right)^2 \varphi(x). \quad (6)$$

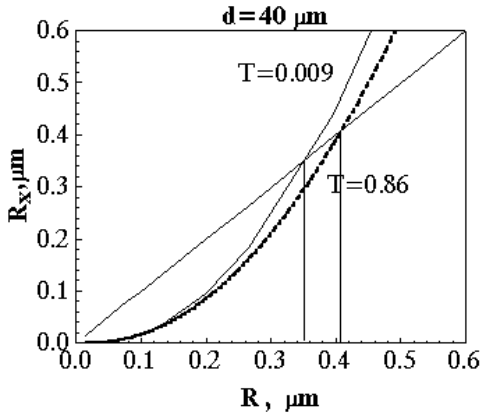
čia V_s - tūrinis SK ir polimero santykis;

$\varphi(x)$ - šiuo atveju šios funkcijos reikšmės paimtos iš Reido ir Kuperio lentelių atitinkamai įvairioms R reikšmėms.

Kad maksimaliai išvengtume optinio pralaidumo matavimo metu daromų paklaidų, geriausia apskaičiuoti R_x abiem atvejais, kai struktūra stipriai sklaidanti šviesą (pradinė būseną, ir tada $n = \bar{n}$), ir, kai elektriniu lauku yra pervesta į skaidrią būseną (tada $n = n_0$). Tokiu būdu galime tikėtis, kad tiksli vidutinio lašų spindulio vertė bus intervale tarp šiais abiem atvejais gautų verčių. Imame atitinkamai tokias reikšmes:

$$\begin{aligned} \text{kai } T=T_{\min} & - n=\bar{n}, \\ \text{kai } T=T_{\max} & - n=n_0. \end{aligned}$$

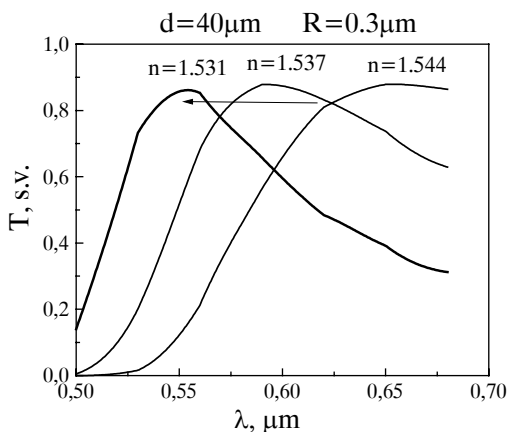
Tai galima pailiustruoti grafiškai (4.pav).



4.pav. Grafike pateiktiems skaičiavimams naudotos reikšmės:
 $V_s=0.32$; $n_p=1.516$; $n_0=1.531$;
 $\bar{n}=1.596$.

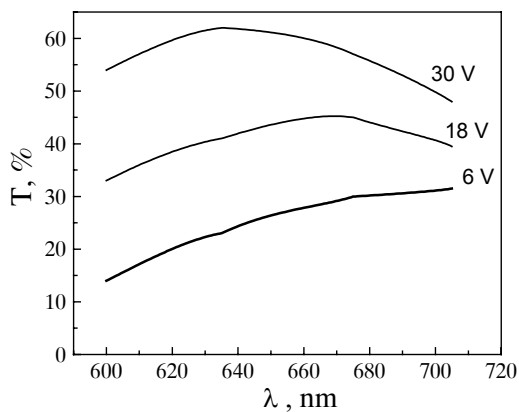
Tuo pačiu randama tinkama $\varphi(x)$ reikšmė, kurią galima panaudoti tolimesniems skaičiavimams.

2.7.skirsnyje aptariamos spektrinės PDLC charakteristikos. Pasinaudojant Rayleigh - Gans aproksimacija, o taipogi anksčiau minėtomis prielaidomis, imant konkrečias eksperimentiškai nustatytas SK bei polimero šviesos lūžio rodiklių vertes., sumodeliuotas spektrinių optinio struktūros pralaidumo charakteristikų kitimas (5.pav.), kintant SK šviesos lūžio rodikliui (kaip jau minėta, SK šviesos lūžio rodiklio kitimą stebėjimo kryptimi inicijuoja išorinis elektrinis laukas).



5.pav. Apskaičiuotas PDLC struktūros optinio pralaidumo spektrinės charakteristikos esant skirtingoms NSK šviesos lūžio rodiklio vertėms.

Pasinaudoję analitiškai gautomis spektrinėmis charakteristikomis, galime konkrečiai suformuluoti reikalavimus kuriamai struktūrai. Iš pateiktų grafikų (disertacijoje) matyti, kad, kai yra sąlyginai didelis PDLC struktūros storis ir NSK lašų diametras, galima gauti selektyvią spektrinę elektriniu lauku valdomą charakteristiką. 6.pav. pateiktas eksperimentiškai užfiksuotas spektrinis optinio pralaidumo maksimumo pokytis prijungus skirtingo dydžio elektros įtampą.



6.pav. PDLC struktūros optinio pralaidumo spektrinė priklausomybė prie skirtingų valdančios įtampos amplitudžių.

Pateikti skaičiavimai bei eksperimentiniai rezultatai rodo, kad, pasinaudojus geometrinėmis struktūros aproksimacijomis, pasidaro labai paprasta taikyti Rayleigh – Gans šviesos sklaidos teoriją PDLC struktūrų optinių bei elektrooptinių charakteristikų įvertinimui. Šis, nors apytikslis metodas, yra naudingas praktiniam taikymui. Tuo pačiu šis metodas leidžia daryti ir platesnius apibendrinimus numatant struktūros kitimą veikiant elektriniam laukui, esant įvairiems geometriniais parametrams. Eksperimentiškai patvirtinta išvada, kad elektrooptinio atsako slenkstinį charakterį pirmiausia apsprendžia struktūros geometriniai parametrai, o ne SK savybės. Antras svarbus rezultatas - tai sukurta metodika, leidžianti, žinant struktūros komponenčių medžiagines charakteristikas, tiesiog iš praėjusios šviesos intensyvumo nustatyti SK lašų polimere vidutinį spindulį.

3 skyriuje nagrinėjamos PDLC dinaminės charakteristikos, veikiant struktūrą įvairiais kintančio elektrinio lauko dažniais, o taipogi pavieniais impulsais. Tyrimui panaudota šlyties deformacija PDLC struktūros geometrinių parametrų kontrolei Laikinėms tokių struktūrų charakteristikoms įtakos turi polimero bei skystojo kristalo fiziniai ir cheminiai parametrai, struktūros gavimo technologija, geometriniai struktūros parametrai.

Esant nedidelei deformacijai, darome prielaidą, kad galioja Huko dėsnis, o Puasono koeficientas lygus nuliui. Tada geometrinius deformuojamo lašo parametrus galime tiesiog susieti su veikiančios tangentinės jėgos dydžiu:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F}{S \cdot G} \quad (7)$$

čia S - pavyzdžio plotas, G - šlyties modulis, o šlyties kampo tangentas randamas pasinaudojus šlyties deformacijos ir geometrinių SK lašo parametrų sąryšio formulėmis:

$$\varphi_a = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (8)$$

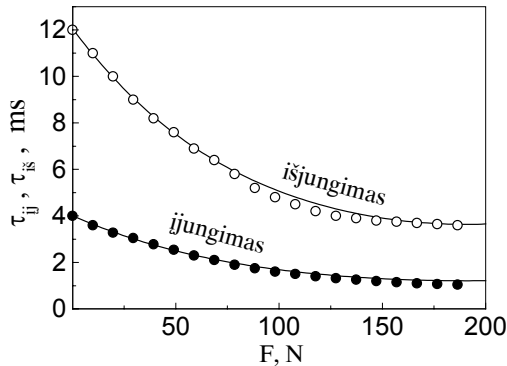
$$a^2 = R^2 \left(1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot \sin 2\varphi_a + \sin^2 \varphi_a \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \right) \quad (9)$$

čia R - sferinio SK lašo spindulys pradinėje, nedeformuotoje būsenoje,

a - deformuoto SK lašo ilgoji elipsoido pusašė.

φ_a – kampas tarp ilgosios elipsoido ašies ir pavyzdžio paviršiaus plokštumos.

Pasinaudojant gautomis išraiškėmis bei apytikslėmis Frederikso efekto dinamikos išraiškėmis, buvo apskaičiuoti elektrooptinio įjungimo ir išjungimo laikai. Gauti rezultatai pavaizduoti grafiškai 7.pav. ištisinėmis kreivėmis. Tame pačiame paveiksle taškais atvaizduotos eksperimentiškai išmatuotos įjungimo ir išjungimo laikų vertės. Matavimai buvo atliekami registruojant praėjusio lazerio spindulio šviesos intensyvumą tuo pačiu metu paduodant į elektrodus 100V amplitudės ir 100ms trukmės stačiakampius impulsus. Tangentinė jėga buvo keičiama diskretiškai, o matavimai atliekami praėjus 30 min po kiekvieno jėgos vertės pakeitimo.



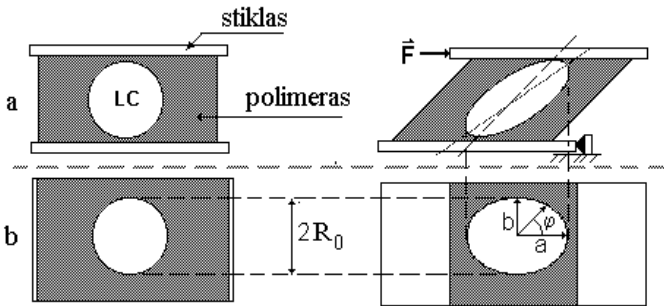
7.pav. PDLC įjungimo ir išjungimo laikų priklausomybė nuo tangentinės jėgos dydžio šlyties deformacijos metu. Apskaičiuotos reikšmės atidėtos ištisinėmis linijomis, matavimų rezultatai pažymėti taškais.

Palyginę apskaičiuotus ir eksperimentinius rezultatus (taškai), gauname gerą atitikimą. Reiškia, kad pagrindinės prielaidos yra teisingos. Šis pateiktas modelis nėra fundamentalaus pobūdžio, o yra tik eksperimentinis įrankis, įgalinantis greitai, nors ir apytiksliai, įvertinti praktikoje svarbius dydžius. Be to, tinkamai įvertinę visus parametrus, šlyties deformaciją galime naudoti kaip technologinį įrankį reikiamai struktūrai gauti.

4 skyrius skirtas orientuotos PDLC struktūros optinių savybių tyrimui. Orientuotos PDLC struktūros gebėjimas poliarizuoti šviesą, t.y. praleisti tik tam tikros poliarizacijos spindulius turi didelę praktinę taikomąją reikšmę. Tai yra dėl to, kad šią orientuotos PDLC struktūros savybę apsprendžia ne sugerties anizotropija kaip įprastinėse poliarizacinėse plėvėse, o šviesos sklaidos anizotropija. Ši ypatybė

leidžia panaudoti orientuotą PDLC šviesos poliarizacijai labai plačiame spektriniame diapazone ir gali būti taikoma daug didesnės energijos šviesai poliarizuoti, nei leidžia įprastinės poliarizacinės plėvės. Be to išlieka galimybė keisti optines struktūros charakteristikas elektriniu lauku.

Kad gautume orientuotą PDLC, pasižyminčią poliarizacinėmis savybėmis, panaudojame šlyties deformaciją 20 μm storio 5 cm^2 ploto pavyzdyje paveikdami 100 N jėga (8.pav.). Šiuo atveju visam pavyzdyje šlyties deformaciją galima laikyti vienalytiška, dėl to labai supaprastėja struktūros geometrinių parametru įvertinimas. Laikant, kad SK lašų bei polimerinės matricos tūris šlyties deformacijos metu nekinta, nėra sudėtinga rasti SK lašų geometrinių parametru kitimo priklausomybę nuo veikiančios tangentinės jėgos dydžio.

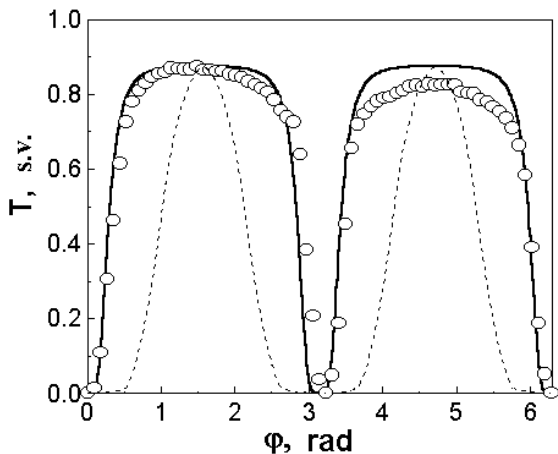


8.pav. Nedeformuotos ir deformuotos struktūros projekcijos. Schematiškai pavaizduotas tik vienas SK lašas

Be to, pasirinkę tokią eksperimento schemą laimime dar vieną privalumą: realių struktūrų storis paprastai matuojamas dešimtimis mikronų, o jų plotas siekia keletą kvadratinų centimetrų, todėl galime manyti, kad statmena deformacijai kryptimi SK lašų geometriniai parametrai deformacijos metu nekinta. Galime daryti išvadą, kad deformuotoje struktūroje SK lašo elipsoido mažoji pusašė b išlieka apytiksliai lygi pradiniam lašo spinduliui R . Tokiu būdu gauta orientuota PDLC struktūra buvo peršviečiama tiesiškai poliarizuotu lazerio spinduliu ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$). Pavyzdį sukant apie ašį, sutampančią su lazerio spinduliu, buvo registruojamas praėjusios šviesos intensyvumas. Gauti matavimo rezultatai atvaizduoti taškais 9.pav.. Iš pateiktų rezultatų aiškiai matyti, kad apskaičiuota optinio pralaidumo charakteristika priklausomai nuo kintančios tiesiškai

poliarizuotos šviesos poliarizacijos krypties, gana pakenčiamai atspindi eksperimentiškai gautus rezultatus. Netikėtas rezultatas yra ta, kad geriausiai

eksperimentinius rezultatus atitinka charakteristika, gauta naudojant vidutinį SK šviesos lūžio rodiklį \bar{n} . Tuo atveju, kai bandome įvertinti galimą SK molekulių orientaciją deformacijos kryptimi, charakteristika žymiai nukrypsta nuo eksperimentinės. Vadinasi, interpretuodami eksperimentinius poliarizacinių orientuotos PDLC struktūros savybių rezultatus, galime neatsižvelgti į galimą SK molekulių orientaciją lašuose deformacijos kryptimi.



9.pav. Optinio pralaidumo priklausomybė nuo kampo tarp struktūros orientavimo krypties ir krintančio šviesos poliarizacijos krypties. Ištininės kreivės apskaičiuotos, taškai - pagal eksperimento duomenis, punktyrinė linija atspindi apskaičiuotą atvejį, kai visos SK molekulės laše yra susiorientavusios deformacijos kryptimi.

5 skyrius yra skirtas nematinio skystojo kristalo tyrimui struktūrose su dideliais užsukimo kampais. Buvo tirti įvairūs tolanų mišiniai, skirti dviem dažniais valdomam tvisto efektui (dielektrinės anizotropijos $\Delta\epsilon$ ženklo inversija prie 5 - 50 kHz kambario temperatūroje ir $f_c > 1 \cdot 10^6$ Hz, kai $T^0 \rightarrow T^0_{NI}$).

Priverstinę tvist-efekto relaksaciją elektrinio lauko pagalba galima realizuoti NSK su sąlyginai žemadažne dielektrinės anizotropijos ženklo inversija, t.y. kai prie $f < f_c$, $\Delta\epsilon > 0$, ir esant $f > f_c$, $\Delta\epsilon < 0$. Kai $f < f_c$ ir išorinis laukas viršija slenkstinį - NSK molekulės pasukamos ilgosiomis ašimis veikiančio lauko kryptimi (paprastas tvist-efektas). Šioje būsenoje prijungus įtampą su $f > f_c$, molekulės yra verčiamos pasisukti 90° kampu atžvilgiu elektrinio lauko veikimo krypties. Prie tam

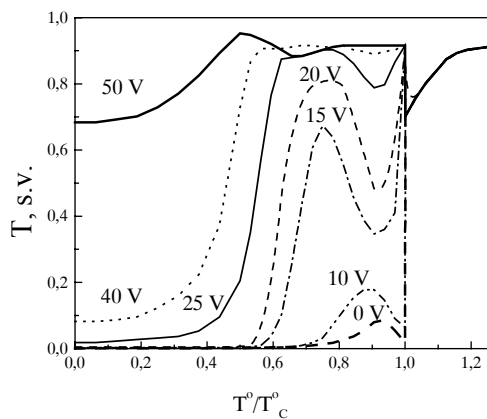
tikrų dažnių ir įtampos reikšmių, šios priverstinės relaksacijos metu gaunamas sukamasis momentas, sąlygojantis stuktūros užsukimą kampais, didesniais nei 90° . Praktiškai pavyko realizuoti užsukimą kampu 270° .

NSK užsukimo kampų nustatymui buvo pasinaudota Viljamso domenų ypatumais. Yra pastebėta, kad pagal Viljamso domenų kryptį galima nustatyti tvistuosios nematiko struktūros užsukimo kryptį, kas praktiškai labai palengvina eksperimentatoriaus darbą. Yra stebėta, kad Viljamso domenai susiformuoja kryptimi $\pm 45^\circ$ į tvist(90°) struktūros NSK direktoriaus kryptį ant ribojančių paviršių (orientavimo kryptis). Priešpriešinio tvisto atveju domenų kryptis skiriasi nuo pradinės 90°

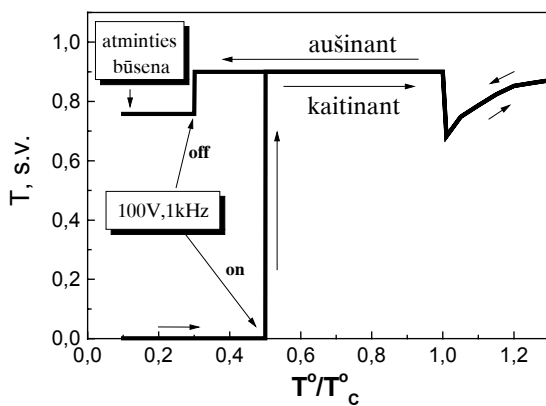
6 skyriuje nagrinėjami termo-elektrooptiniai reiškiniai PDLC struktūrose.

Dažniausiai skystakristaliniai optiniai atminties elementai ir su elektrine, ir su optine adresacija veikia įvairių efektų pagrindu nemato-cholesteriniuose mišiniuose bei smektiniuose SK. Pastaruoju metu pastebimas išaugęs susidomėjimas optinės atminties efektu polimere disperguotame nematiniame skystajame kristale. Nepaisant to, kad dar nėra iki galo aiški pati atminties efekto tokiose struktūrose prigimtis, jau yra bandoma realizuoti šį efektą konkrečiuose įrenginiuose.

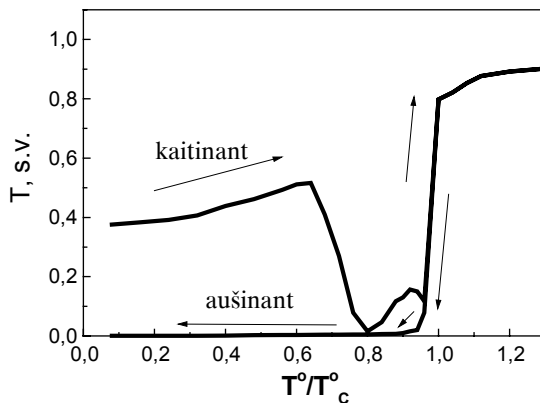
Suformuota struktūra tarp stiklo plokštelių su skaidriais elektrodais buvo talpinama į termostatą, ir registruojamas lazerio spindulio praėjusios šviesos intensyvumas. Keičiant temperatūrą, keičiasi polimero ir NSK fizinės savybės, bei pati struktūra, tai ir atspindi praėjusios šviesos intensyvumas. Temperatūrinės optinio pralaidumo charakteristikos buvo matuojamos prijungus prie elektrodų skirtingų dydžių kintamą elektrinį lauką (1kHz) (10.pav.). Buvo stebėta, kad aušinant kai kurias kompozicines PDLC struktūras, elektriniame lauke, atjungus elektrinį lauką, stebimas liekamasis sklaidos sumažėjimas. 11.pav. parodytas tiriamos struktūros optinio pralaidumo kitimas pavyzdį šildant ir po to šaldant, kai tuo pačiu metu prie elektrodų buvo prijungta 1kHz 100V įtampa. 12.pav.. pateikiamas optinio pralaidumo kitimas pakartotinai atliekant ciklą šildymas-aušinimas praslinkus 3000 valandų (be elektrinio lauko).



10.pav. Optinio pralaidumo temperatūrinės charakteristikos PDLC struktūroje polivinilbutirialio pagrindu, esant skirtingoms valdančios įtampos vertėms ($f=1$ kHz).



11.pav. Optinio pralaidumo kitimas pavyzdį šildant ir aušinant prijungus elektrinį lauką.



12.pav. Optinio pralaidumo kitimas pakartotinai atliekant šildymo-aušinimo ciklą be elektrinio lauko po 3000 valandų

Reikia pabrėžti, kad tokia struktūra be atminties efekto, gali puikiai dirbti ir dinamiame režime, visiškai nenaudojant elektrinio valdančio lauko -jeigu už tiriamo pavyzdžio vietoj šviesos imtuvo patalpinsime ekraną, galėsime stebėti ekrane aberacinių žiedų sistemą, panašią į kai kuriais atvejais stebimą įprastinėse NSK kiuvetėse. Aberacinių žiedų vaizdas yra pakankamai stabilus laike ir tai įgalina panaudoti šį efektą praktiniams tikslams- pavyzdžiui greitam apytiksliam lazerio spinduliavimo galios nustatymui pagal aberacinių žiedų diametrą, o tai paranku atliekant tikslų lazerio sujustravimą (praktiškai buvo naudota esant galioms 5 - 50 mW).

IŠVADOS

- 1) Geometriškai aproksimuojant PDLC struktūros parametrus ir remiantis Rayleigh - Gans šviesos sklaidos teorija, nustatyta, kad PDLC struktūros elektrooptines charakteristikas lemia NSK šviesos lūžio rodiklio kitimas nuo suvidurkintos vertės iki vienos iš komponentų n_o ar n_e verčių, priklausomai nuo stebėjimo geometrijos ir NSK dielektrinės anizotropijos ženkle.

- 2) Nustatyta, kad elektrooptinis efektas PDLC plėvėje vyksta be “slenksčio”, o pastarąjį imituoja tik funkcinė praėjusios šviesos intensyvumo priklausomybė nuo veikiančio išorinio elektrinio lauko.
- 3) Nustatyta, kad orientuotos PDLC pralaidumo priklausomybę nuo šviesos poliarizacijos krypties apsprendžia NSK lašų geometriniai parametrai.
- 4) Nustatytas ryšys tarp šlyties deformacijos jėgos (kuomet kinta NSK lašų geometriniai parametrai) ir elektrooptinio perjungimo laikų.
- 5) Stebėtas ir aprašytas PDLC plėvės spektrinių charakteristikų kitimas veikiant išoriniam elektriniam laukui, aprašytas efekto modelis.
- 6) Stebėtas ir aprašytas termo-elektrooptinis atminties efektas PDLC struktūroje su polivinilbutirialio matrica, ištirta efekto eiga skirtingose struktūrose.

Didelė dalis šiame darbe aprašytų tyrimų turi taikomąjį pobūdį. Iš tokių tyrimų rezultatų, pagal jų *praktinę vertę* galima išskirti šiuos:

- 1) Sukurta metodika, leidžianti nustatyti NSK mikrolašų PDLC plėvėje vidutinį spindulį.
- 2) Praktiniu požiūriu didelę reikšmę turi pateikto modelio taikymas NSK lašų koncentracijos polimere įtakai optiniams PDLC parametrams įvertinti. Tai leidžia optimizuoti sunaudojamą struktūros gamybai NSK kiekį, sutaupant brangų SK.
- 3) Plačias galimybes praktiniam taikymui atveria pateikta spektrinių charakteristikų analizė - parodyta galimybė elektriniu lauku keisti praėjusio šviesos spektrinę sudėtį, t.y. eksperimentiškai realizuoti Kristjanseno efektą
- 4) Rastas praktinis netiesinio optinio persifokusavimo efekto pritaikymas (laboratorinėmis sąlygomis) - lazerio spindulio galios indikatoriaus vaidmenyje.
- 5) Parodyta daugiakartinio reversyvinės atminties įrašymo galimybė PDLC plėvėje bei ilgalaikis informacijos išsaugojimas.

PAGRINDINĖS AUTORIAUS PUBLIKACIJOS, APIBENDRINAMOS
DAKTARO DISERTACIJOJE :

1. Вайшнорас Р.А., Паеда С.И., Паедене С.И. Новый электрооптический эффект в ЖК композитах // Письма в ЖТФ - т. 16, в. 13 (1990), с. 73-75.
2. Вайшнорас Р.А., Паеда С.И., Паедене С.И. Эффект памяти в псевдокапсулированном НЖК // Письма в ЖТФ - т. 18, в. 3 (1992), с. 46-48.
3. Pajeda S., Pajedienė S., Vaišnoras R. and Adomėnienė O. A Discrete Change Of The Rotation Angle In Twisted Structures // Mol.Cryst.Liq.Cryst. - vol. 265 (1995) p. 283-290.
4. Pajeda S., Pajedienė S., Vaišnoras R., Adomėnienė O. Gasparrini F., Rogante M., Rustichelli F., Yang B. Shear deformation and electrooptical switch "on" and "off" in PDLC film // in Liquid Crystals:Physics, Technology and Applications : Proceedings of SPIE - vol.3318 (1998) p. 418-421.
5. Pajeda S., Pajedienė S., Vaišnoras R., Adomėnienė O. Gasparrini F., Rogante M., Rustichelli F., Yang B. Electrooptical response in PDLC film // in Liquid Crystals:Physics,Technology and Applications, Proceedings of SPIE - vol. 3318, (1998) p. 422-426.
6. Pajeda S., Pajedienė S., Vaišnoras R., Adomėnas P., Rogante M. Polarization features of the deformed PDLC film // Mol.Cryst.Liq.Cryst. - vol. 351 (2000) p. 43-51.
7. Pajeda S., Pajedienė S., Vaišnoras R., Adomėnas P., Rogante M. Thermoelectric phenomena in the PDLC films // Proceedings of SPIE, vol. 4415, (2000) p. 156-162 .

MOKSLINIŲ DARBŲ REZULTATAI BUVO SKELBTI ŠIOSE
KONFERENCIJOSE:

1. Адоменас П.В., Вайшнорас Д-Р., Варейкис А.Ю., Данилов В.В., Захажевски Я.В., Макушка Р.Ю., Паеда С.И., Паедене С.И., Савельев Д.И., Салучка С.Ф., Модуляция излучения в различных диапазонах посредством микрокапсулированного ЖКИ, 6 Всесоюз. Конференция “Жидкие кристаллы и их практическое использование”, Чернигов, 1988, тезисы докладов, т.4, с.489.
2. Kliuschin E.B., Mashnikov N.N, Pajeda S., Pajedienė S., Vaishnoras R., An application of the LC- polymeric Film composite for stroboscope // European Conf. On Liquid Crystals, 1991, Vilnius, Lithuania, Abstracts, p.186.
3. Pajeda S., Pajedienė S., Adomėnienė O., Danys E., Vaišnoras, R. Thermo-electrooptical Phenomenon of the NLC encapsulated in Polymeric Film // European Conference on Liquid Crystals: Science and Technology, 7-12 March, 1993, Flims, Switzerland, Abstracts, p.90.
4. Pajeda S., Pajedienė S., Vaišnoras R., Adomėnienė O., Gasparrini F., Rogante M Rustichelli F., Yang B., Shear deformation and alectrooptical switch "on" and "off" in PDLC film // European conference on liquid crystals, Science and Technilogy, 3-8 March 1997, Zakopane, Poland, Abstracts, p.300, (D-4).
5. Pajeda S., Pajedienė S., Vaišnoras R., Adomėnienė O., Gasparrini F., Rogante M., Rustichelli F., Yang B., Electrooptical response in PDLC film // European conference on liquid crystals, Science and Technilogy, 3-8 March 1997, Zakopane, Poland, Abstracts, p.301, (D-5).
6. Pajeda S., Pajedienė S., Vaišnoras R, Adomėnas P. and Rogante M., Polarization features of the deformed PDLC film // European Conference on Liquid Crystals 99(ECLC99), April 25-30, 1999, Hersonissos, Crete, Grece, Book of Abstracts, P4-006.

7. Pajeda S., Vaišnoras R., Adomėnas P., Optical memory effect in polymer dispersed liquid crystal films // International Conference “Advanced Optical Materials and Devices” (ADOM-2), 16-19 August, 2000, Vilnius, Lithuania, Abstracts, p 85.

KITOS AUTORIAUS PUBLIKACIJOS SUSIJUSIOS SU DAKTARO DARBU

1. Kazlauskas P-A., Pajeda S., Zhindulis A. Light scattering by an optically addressed light modulator// Mol.Cryst. and Liq.Cryst, v.101, Nr ¾ (1983) p.p.261-266.
2. Вистинь Л. К., Казлаускас П-А. В., Паеда С. И. Фотоэлектрический эффект в жидких кристаллах// ДАН СССР т.275, N 1 (1984). с 60-63.
3. Вистинь Л.К., Казлаускас П-А.В., Паеда С.И., Яковенко С.С. Фотонапряжение в НЖК// Кристаллография, т.30, в.1.(1985) с.136-139.
4. Береснев Л.А., Блинов Л.М., Дергачев Д.И., Жиндулис А.И., Клименко И.С., Паеда С.И., Сергеев А.А. Фоточувствительная структура сегнетоэлектрический жидкий кристалл- фотополупроводник// Письма в ЖТФ, т.14, в.3(1998). с. 263-266.
5. Vaišnoras R., Pajedienė S., Pajeda S., Martūnas D., Ravinskas J., Adomėnienė O., Gasparini F., Rogante M., Rustichelli F., Yang B. Spectral investigation of Cu(II) and Ni(II) metallo-organic complexes// in Liquid Crystals: Chemistry and Structure, Proceedings of SPIE , vol.3319 (1998) pp.170-173.
6. Vaišnoras R., Pajedienė S., Pajeda S., Martūnas D., Ravinskas J., Galymetdinov J., Gasparini F., Rogante M., Rustichelli F., Yang B. Spectroscopic and thermodynamic properties of Er³⁺, Nd³⁺ and Tb³⁺ containing LC// in Liquid Crystals:Chemistry and Structure, Proceedings of SPIE , vol.3319 (1998) pp.174-176.
7. Вайшнорас Д-Р.А., Левитас И.С., Паеда С.И., Якубенене М.Ф. Жидкокристаллическая индикаторная панель// Авторское свид. SU1617401, 1991.03.07.

Summery

As in other areas concerning liquid crystals, the field of polymer dispersed liquid crystals (PDLC) is quite interdisciplinary. Interest ranges from purely scientific aspects of liquid crystals confined to small cavities, to the engineering of display devices using a novel electrooptical effect produced by PDLC films. Many of the scientific aspects of liquid crystal dispersions have impact to applications.

The performed scientific research work is devoted to investigation of electrooptical properties of the polymer dispersed liquid crystal films (PDLC). The dissertation consist of 6 chapters. *Chapter 1* presents a short introduction, including the physical properties of the nematic liquid crystal and the technology of preparation of the PDLC film. Main goals of the investigations, scientific novelty, practical importance, and main statements are presented in the introduction. *Chapter 2* is devoted to investigation of electrooptical properties of the PDLC structure, theris described light scattering and considered conditions for interpretations of obtained electrooptical effects in the PDLC film. Electrooptical characteristics of the polymer dispersed liquid crystal structure were estimated using Rayleigh-Gans scattering theory. This simple method used for an approximate estimation of the influence of geometrical parameters of the PDLC structures on electrooptical characteristics. A conclusion has been made, that “threshold” voltage of the electrooptical response is caused by geometrical parameters of the PDLC structures mainly, but not by the properties of the LC.

In *chapter 3* where considered dynamical characteristic of the PDLC by electric field action at different frequencies and by single pulse action. The shear deformation was used for checking of geometrical parameters of the PDLC structure. The experimental results are in a good agreement with calculated formula. *Chapter 4* is devoted to the study of optical features of

the PDLC structure. Polarization features of polymer dispersed liquid crystal films were investigated experimentally. An alignment of PDLC films was achieved by a shear deformation of the films at an accurate control of geometric parameters. A numerical interpretation of experimental results was made by means of the Rayleigh-Gans light scattering theory. In *chapter 5* the study of the electrooptical properties of nematic liquid crystal, supertwist effect and consideration of modulated structures are presented. Finally in *chapter 6* are the results of thermo-optical and thermo- electrooptical investigations, the study of the optical memory in PDLC films are described.

Despite different preparation methods of the PDLC films they show at the same time the properties of polymer and liquid crystal both. A stable memory effect was observed in the investigated PDLC films.