

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
CIETVIELU FIZIKAS INSTITŪTS



JEĻENA MIĶELSONE

**HOLOGRĀFISKAIS IERAKSTS UN VIRSMAS
RELJEFA VEIDOŠANĀS AZOBENZOLA
SAVIENOJUMOS**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē

Apakšnozare: cietvielu fizika

Rīga, 2018

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātē, Fizikas nodaļā un Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas Institutā laika posma no 2010. gada līdz 2018. gadam



EIROPAS SAVIENĪBA



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē», Nr. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004

Darbs sastāv no ievada, 9 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta.

Darba forma: disertācija fizikas nozarē cietvielu fizikas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: *Dr. Phys. Jānis Teteris*, vadošais pētnieks, Cietvielu fizikas institūts, Latvijas Universitāte

Darba recenzenti:

- 1) **Vjačeslavs Gerbreders**, *Dr. phys.*, DU G.Liberta Inovatīvās mikroskopijas centra vadošais pētnieks
- 2) **Andris Ozols**, *Dr. hab. phys.*, Rīgas Tehniskā universitāte; Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātes Tehniskās fizikas institūta Starojuma inženierfizikas profesora grupas vadītājs, profesors
- 3) **Jānis Harja**, *Dr. phys.*, University of Applied Sciences and arts, Vācija

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2018. gada 7. septembrī
Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūtā plkst. 16:00

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Raiņa bulvārī 19.

LU Fizikas, astronomijas un mehānikas specializētās promocijas padomes priekšsēdētājs *Dr. Phys. Uldis Rogulis*
promocijas padomes sekretāre Laureta Buševica

© Latvijas Universitāte, 2018
© Jeļena Miķelsone, 2018

ISBN 978-9934-18-361-4

Saturs

Ievads.....	4
Darba mērķi un uzdevumi	4
Darba zinātniskā novitāte	5
Aizstāvamās tēzes	5
1. Teorijas apskats.....	6
1.1. Difrakcijas režģis	6
1.2. Hologrāfija.....	7
1.3. Materiālu klases.....	7
1.3.1. Azobenzolu sistēmu klases.....	7
1.3.2. Sistēma „viesis-saimnieks”	8
1.3.3. Azobenzolu saturošie funkcionālie polimēri	9
1.3.4. Azobenzolu saturošie mazmolekulārie savienojumi.....	9
1.3.5. Azoepoksīdu savienojumi	9
2. Eksperimentālā metodika	11
2.1. Hologrāfiskais ieraksts	11
2.2. Masas kustības virziena noteikšana, izmantojot nolasošā stara polarizāciju.....	11
2.3. Pētītie materiāli.....	14
3. Hologrāfisko režģu veidošanās funkcionālos polimēros un mazmolekulāros organiskos stiklos	16
3.1. Kinētika	16
3.2. Polarizācijas ietekme	18
3.3. Parauga biezuma ietekme	19
3.4. Ierakstošo staru intensitātes ietekme.....	20
3.5. Virsmas reljefa režģa pastiprināšana	21
3.6. Mazmolekulāro organisko stiklu praktiskā izmantošana	22
3.7. Kopsavilkums par funkcionāliem polimēriem.....	23
4. Virsmas reljefa veidošanās mehānisms.....	25
5. “Saimnieks-viesis” sistēma	27
Kopsavilkums	27
Nobeigums.....	28
Izmantotā literatūra	29
Autora publikāciju saraksts.....	31
Dalība konferencēs	32
Pateicības.....	36

Ievads

Azosavienojumi, kas satur gaismas jutīgas hromoforu grupas, tiek plaši pētīti sakarā ar to iespējamo pielietojumu optoelektronikā un fotonikas industrijā. To savienojumi ar polimēru ķēdēm veido rezistus, kurus var izmantot tiešajam hologrāfiskajam ierakstam, kas nozīmē, ka virsmas reljefa režģis veidojas ieraksta laikā un nav nepieciešama ķīmiska kodināšana.

Tiešā ieraksta rezistos uz organisko azosavienojumu bāzes gaismas ietekmē notiek molekulu pārorientēšanās perpendikulāri gaismas elektriskā lauka vektoram, norisinās *trans-cis* izomerizācija, kā rezultātā mainās gaismas absorbcija, parādās fotoinducētā dubultlaušana un dihroisms, kas arī ir nepieciešams nosacījums virsmas reljefa režģa veidošanai hologrāfiskā ieraksta laikā.

Zinātnieki vairākkārt mēģinājuši izskaidrot virsmas reljefa režģa veidošanās mehānismu, taču katrā no tiem ir savi trūkumi un pat pretrunas ar eksperimentiem. Līdz šim pašam brīdim viennozīmīga modeļa nav.

Šajā darbā tika pētīti funkcionālie polimēri, kuros funkcionālais azosavienojums ir kovalenti savienoti ar polimēra ķēdi, azobenzolu saturoši mazmolekulāri organiskie stikli, „saimnieks-viesis” sistēmas.

Virsmas reljefa režģi azo savienojumu plēvēs tika ierakstīti, izmantojot lāzeri ar viļņa garumu, kas atrodas materiāla absorbcijas joslā. Plēvēs ir iespējams ierakstīt simtiem nanometru dziļu režģi zem materiāla stiklošanas temperatūras, tomēr iegūstams dziļums ir atkarīgs no daudziem ierakstošo lāzeru starojuma un plēves materiālu īpašību parametriem.

Šī darba uzdevums ir izveidot un izpētīt materiālus, kurus var izmantot tiešajam hologrāfiskajam ierakstam. Noskaidrot fundamentālās parādības materiālos, lai varētu izskaidrot virsmas reljefa veidošanās principu un pabīdīties soli tuvāk tiešā ieraksta rezistu izmantošanai praksē.

Darba mērķi un uzdevumi

Darba mērķis izgatavot materiālu hologrāfiskajam ierakstam ar sekojošām īpašībām:

- 532 nm hologrāfiskā ieraksta fotojutība $1-5 \text{ J}/\text{nm}^2\text{cm}^2$
- Lētas izejvielas sintēzei
- Vienkārša sintēze

Lai izpildītu darba mērķus, tika izvirzītu sekojošie uzdevumi:

- 1) Sintezēt tiešā hologrāfiskā ieraksta rezistu ar lielu jutību pie 532 nm viļņa garuma

- 2) Izpētīt hologrāfiskā ieraksta procesu organiskajos azosavienojumos atkarībā no dažādiem ieraksta parametriem – ierakstošo staru intensitātes, polarizācijas, režģa perioda, rezista plēves biezuma.
- 3) Skaidrot eksperimentāli iegūtos rezultātus
- 4) Palielināt materiāla jutību, optimizējot ieraksta apstākļus un modificējot ieraksta sintēzi
- 5) Skaidrot virsmas reljefa veidošanās mehānismu

Darbs tika organizēts sekojošā veidā: tika sintezēts vai iegādāts materiāls, no šī materiāla tika veidotas plānās kārtiņas. Plānās kārtiņās tika pētītas optiskās īpašības – optiskie spektri, fotoinducētā dihroisma un dubultlaušanas parādības, tika veikts hologrāfiskais ieraksts. Iegūtie dati tika apkopoti un balstoties uz rezultātiem, tika modificēts materiāla sastāvs, ieraksta apstākļi vai pētīts cits savienojums.

Darba zinātniskā novitāte

- Izstrādāta azoepoksīdu plēvju sintēze un optimizēts tiešā hologrāfiskā ieraksta process plēvēs
- Piedāvāta virsmas reljefa režģa nehologrāfiska, kontrolējama pastiprināšana
- Funkcionālu polimēru, mazmolekulāru organisku stiklu un „saimnieks-viesis” sistēmas uz azosavienojumu bāzes izpēte un salīdzināšana
- Izstrādāta masas kustības virziena noteikšanas netieša metode
- Izstrādāts virsmas reljefa režģa veidošanās mehānisms

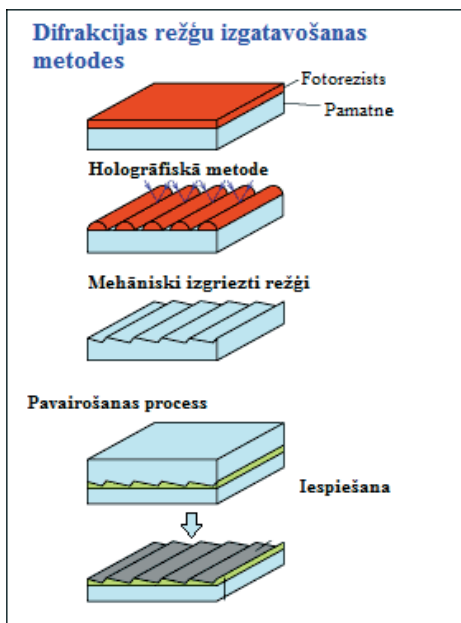
Aizstāvamās tēzes

1. Masas kustības virziens var būt noteikts netiešā veidā, pētot režģa difrakcijas efektivitātes monotonitāti laikā.
2. Masas transports virsmas reljefa režģa veidošanās laikā notiek materiālos, kuriem piemīt fotoinducētā dubultlaušanās īpašība.
3. Azoepoksīda AAB:BADGE savienojums ir perspektīvs materiāls priekš tiešā hologrāfiskā rezista vienkāršas sintēzes un labas fotojutības dēļ.

1. Teorijas apskats

1.1. Difrakcijas režģis

Difrakcijas režģis ir atstarojošu un/vai caurlaidības elementu apkopojums, kas ir atrodas viens no otra noteiktā attālumā, kas ir salīdzināms ar pētāmo gaismas viļņa garumu. Difrakcijas režģi var stādīties priekšā kā difrakcijas elementu kopa, piemēram, caurlaidošu spraugu kopa (apertūras) uz caurspīdīga ekrāna vai atstarojošu līnijveida iedobīšu kopa. Fizikāls skaidrojums difrakcijas režģim ir gaismas laušanas koeficienta periodiska telpiska variācija. Elektromagnētiskais vilnis, kas mijiedarbojas ar difrakcijas režģi iegūst elektriskā lauka amplitūdu, fāzi vai abus – amplitūdu un fāzi, kādu tam nosaka difrakcijas režģis gaismas laušanas koeficienta periodiskās variācijas dēļ blakus režģa virsmai.



Att.1.1: Difrakcijas režģu izgatavošanas metodes

Režģi var būt caurlaidības vai refleksijas (atkarībā no darbības principa). Atstarojošie režģi sastāv no režģa, kas ir iespiests atstarojošā virsmā, bet caurlaidības režģi – režģa, kas ir iespiests uz caurlaidīgas virsmas.

Režģus vēl iedala amplitūdas (periodiskas amplitūdas izmaiņas) vai fāzu (periodiskas fāzes izmaiņas) režģos.

No izgatavošanas principa režģus iedala 3 veidos (att. 1.1): režģos, kas iegūti mehāniskās iespiešanas ceļā. Tādiem režģiem ir raksturīga trīsstūrveida profils. Režģus var izgatavot hologrāfiskā ceļā. Tādiem režģiem ir raksturīgs sinusoidāls profils, kas atkārto interferences ainu profilu. Difrakcijas režģus var izveidot arī pavairojot esošos režģus, kas iegūti mehāniskā vai hologrāfiskā ceļā [1-3].

1.2. Hologrāfija

Hologrāfijā tiek izmantotas gaismas difrakcijas un interferences īpašības, kas padara iespējamu ierakstīt gaismas jutīgajā vidē attēlu un rekonstruēt to pilnībā. Taču, lai šis process būtu iespējams nepieciešams izmantot koherentu gaismu. Vienkāršotā gadījumā, kad tiek ierakstīta elementārā hologramma, uz fotorezista virsmas tiek krustoti divi koherenti lāzera stari un gaismas jutīgajā materiālā tiek dublicēta interferences aina (intensitātes vai polarizācijas sadalījums).

1.3. Materiālu klases

1.3.1. Azobenzolu sistēmu klases

Azobenzoli ir stabili savienojumi, tos aktīvi pētīja un pēta kā mazas molekulas, kā pievienoto savienojumu kādai molekulārai struktūrai vai kā iebūvētu (sajauktu vai kovalenti savienotu) savienojumu kādā amorfā, kristāliskā vai šķīdno kristālu sistēmā. No azosavienojumiem var izgatavot pašorganizējošus monoslāņus, suprarežģus, biomateriālus. Tika sintezētas vairākas mazas molekulas, kas satur azobenzīnu, tai skaitā kraunēteri, ciklodekstrīns, proteīni, tādi kā bakteriorhodopsīns, trīsdimensionāli policikliski savienojumi, tādi kā kubāns, adamantāns. Visbiežāk, lai varētu pētīt un pielietot azo hromoforus, tos iebūvē matricās, taču kā trūkums šajā gadījumā jāatzīmē, matricas neizbēgama iedarbība uz azo hromoforu – gan matrica pavājina azo hromofora īpašības, gan azo hromofors pasliktina matricas optiskās īpašības. Taču, kaut arī abu vielu īpašības tiek pavājinātas, var novērot jaunas īpašības: hromofors var darboties kā matricas zonde: (brīvais tilpums, polarizējamība, kustīgums u.c.), bet kad matrica piedalās hromofora kustībā, molekulārā kustība var notikt daudz efektīvāk [4].

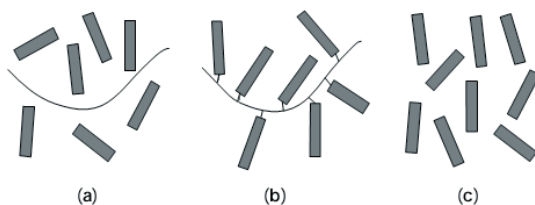
1.3.2. Sistēma „viesis-saimnieks”

Receptori jeb saimnieka molekula ķīmijā ir molekulas vai supramolekulas, kas var selektīvi atšķirt un saistīt viesu molekulas (att. 1.3.2.1.a.). Saite starp saimnieka un viesu molekulām nav kovalentā, molekulas sistēmā nav savstarpēji saistītas. Saite, kas var saistīt viesu un saimnieka molekulas var būt ūdeņraža saite, jonu saite, Van der Vālsa spēks un hidrofobiskā mijiedarbība.

Ir būtiski optimizēt saimnieka-viesu mijiedarbību, lai varētu sistēmu veiksmīgi izmantot. Dažādiem saimniekiem un viesiem sajaukšanās spēja ļoti atšķiras. Ir vairāki faktori, kas ietekmē saimnieka-viesu mijiedarbību: izmēri, forma, polaritāte, lādiņš, hidrofobitāte un hidrofilītāte. [5-6]

Lai varētu izmantot azobenzola gaismas-jūtīgas īpašības, molekula ir jāievieto matricā. Visvienkāršākais veids ir ievietot azosavienojumu polimēru matricā, kas prasa tikai abu vielu izšķīdināšanu un sajaukšanu [7].

Daudzās fotohromās molekulās, tādās kā azobenzols, ārējā fotoķīmiskā ierosināšana ir spējīga veikt atgriezeniskas strukturālās izmaiņas. Šo molekulu ievietošana saimnieka sistēmā var atgriezeniski saistīt saimnieka molekulu ar viesu molekulu un padarīt saimnieka molekulu fotopārslēdzamu [5]. Taču šis process vairākumā viesis- saimnieks sistēmās ir neefektīvs.



Att. 1.3.2.1. Azobenzolu saturošie materiālu tipi, kas tiek izmantoti anizotropijas radīšanai; a) saimnieks-viesis sistēma; b) azobenzolu saturošie funkcionālie polimēri; c) azobenzolu saturošie mazmolekulārie organiskie stikli [4]

Saimnieks-viesis sistēmai ir vairāki trūkumi: piemērota šķīdinātāja piemeklēšana abām vielām, makroskopiskā fāzu atdalīšanās, hromoforu atdalīšanās, neefektīvas un vāji izteiktas fotohromā pārslēgšanās, u.c. [6].

1.3.3. Azobenzolu saturošie funkcionālie polimēri

Azo benzolu funkcionālos polimēros azosavienojums ir kovalenti saistīts ar monomēru un atkārtojas katrā monomērā. Azo savienojumu var piesaistīt polimēra ķēdei ar divām metodēm: pievienot azosavienojumu polimēram pēc monomēru polimerizācijas reakcijas [8] vai var izmantot otro veidu un piesaistīt azosavienojumu monomēram pirms polimerizācijas ar brīvo radikāļu polimerizācijas metodi [9-10]. Funkcionālā polimēra shematiskais attēlojums ir redzams attēlā 1.3.2.1.b. Šāda struktūra padara gaismas jutīgu arī polimēra ķēdi, jo kopā ar azosavienojumu pārvietojas arī visa polimēra ķēde. Funkcionālos polimēros fotoinducētie procesi ir izteiktāki gan cietās vielās, gan šķīdumos [11].

Galvenie funkcionālu polimēru trūkumi ir sarežģīta un dārga sintēze, jo monomēri var ietekmēt polimerizācijas procesu un palēnināt vai pārtraukt to, līdz ar to reakcijas iznākums ir ļoti mazs. Tāpat azosavienojumi var izmainīt monomēra struktūru un padarīt polimerizāciju neiespējamu. Ir jāmeklē piemērota tehnika, lai piekabinātu azosavienojumu polimēram vai monomēram, neizjaucot arī pašu azosavienojumu [12].

1.3.4. Azobenzolu saturošie mazmolekulārie savienojumi

Azobenzolu saturošie mazmolekulārie organiskie stikli (ASMOS) (att. 1.3.2.1 c) ir parādījušies salīdzinoši nesen kā materiāli dažādiem optiskiem pielietojumiem. Tie tiek izmantoti gan kā molekulārie kristāli, gan kā polimēru matricas.

ASMOS funkcionālās molekulas ir masīvas ar labi noteiktu izmēru, kurām nav tieksmes kristalizēties. Stikli ir viegli izgatavojami – ar uzputināšanas metodi vai no koncentrētiem šķīdumiem. Tas ļauj iegūt reproducējamu homogēnu materiālu. Tas, ka materiāls ir bez polimēru matricas, ļauj labāk izprast materiāla optiskās īpašības [13].

Tā kā ASMOS molekulas neatrodas polimēru matricā, kā arī nav piesaistītas tai, molekulu kustība nav ierobežota. Molekulas ir vāji saistītas viena ar otru, kas ļauj tās viegli pārvietot elektriskā lauka ietekmē [14].

1.3.5. Azoepoksīdu savienojumi

Epoksīdi ir savienojumi, kurus iegūst, ja epoksīda sveķus apstrādā atbilstošos apstākļos (paaugstināta temperatūra vai elektromagnētiskais starojums) ar cietinātāju. Epoksīdu mehāniskās īpašības ir stipri atkarīgas no epoksīdu segmentu elastības un blīvuma. Epoksīdiem ir raksturīga saraušanās,

kuras intensitāte ir atkarīga no epoksīda sastāva. Sašaurināšanās rada iekšējo spriegumu materiālā, bet to ir iespējam novērst ar cietināšanas aģentiem.

Epoksīdu īpašības ir atkarīgas arī no termiskās apstrādes nosacījumiem. Ja temperatūra nepārsniedza stiklošanas temperatūru T_g , tad atsevišķi saistītie monomēri nevar tālāk pārvietoties un cietināšanas reakcija apstājas. Ja temperatūru paaugstina, reakcija atkal atsākas un epoksīds tiek cietināts.

Epoksīdiem piemīt labas elektriskā īpašības un tos ir iespējams pataisīt par vadītājiem ar metālu daļiņām. Tie ir korozijizturīgi, inerti pret vairākām ķīmiskām vielām un pārklāj daudzas virsmas bez adhēzijas. Šīs īpašības nodrošina epoksīdiem ļoti plašu pielietojumu klāstu. Visnozīmīgākais ir pārklājumu veidošana krāsu, vadu, auto un jūras tehnoloģijās. No epoksīdiem veido putas, līmes, izolāciju, caurules, dažādu formu veidnes, kuras izmanto celtniecībā.

Par epoksīdu sveķu cietinātājiem var izmantot amīnus, skābes, skābju anhidrīdus, fenolus, spirtus un triolus [15-16].

Savukārt, ja mēs izvēlamies azosavienojumu, kura sastāvā ir amino grupa, piemēram, aminoazobenzons (AAB), ir iespējams kovalenti sasaistīt azosavienojumu ar epoksīda sveķu monomēriem. Temperatūras ietekmē notiek epoksīdu gredzena atvēršanas reakcija un amino grupa kovalenti saistās ar epoksīda sveķiem.

Polimēra ķēdes garums ir atkarīgs no vairākiem aspektiem:

- šķīdinātāja
- epoksīda un aminoazosavienojuma molārās koncentrācijas:
 $C_{azo} \cdot C_{amino}$
- temperatūras
- epoksīdu gredzenu skaita epoksīda sveķu monomērā
- amino grupu skaita aminoazosavienojumā

Azoepoksīda savienojumus ir iespējams uzklāt uz pamatnes un izveidot rezistu priekš tiešā hologrāfiskā ieraksta. Šāda rezista sintēze ir ļoti vienkārša, lēta un tās īstenošanai netiek izmantoti toksiski materiāli.

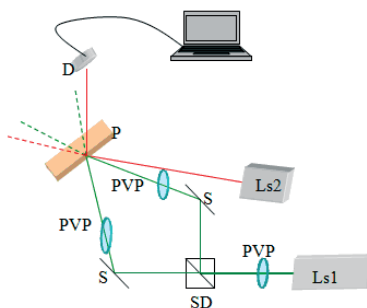
2. Eksperimentālā metodika

2.1. Hologrāfiskais ieraksts

Hologrāfiskais ieraksts tika veikts, izmantojot klasisku divstaru shēmu, kam pamatā ir viena lāzera stara sadalīšana divos un to krustošana uz parauga virsmas, kur ierakstās izveidotā interferences aina (att. 2.1.1.).

Ierakstošais lāzera stars ar staru dalītāju, par kuru kalpoja Glana-Teilora polarizācijas kubs, tika sadalīts uz diviem. Polarizācijas plāksnīte jeb pusviļņa plāksnīte starp lāzeru un staru dalītāju ļāva kontrolēt un iegūt vienādas intensitātes divus starus, kas ir nepieciešams kvalitatīvam ierakstam. Pēc sadalīšanas, lāzeru staru krita uz spoguļiem, kas tālāk starus novirzīja uz parauga virsmas, kur tie krustojās.

Izveidotā interferences aina veidoja režģi uz parauga virsmas vai parauga tilpumā, atkarībā no gaismas-materiāla mijiedarbības. Katra stara ceļā tika novietota pusviļņa vai ceturtdaļviļņa plāksnīte, kas ļāva iegūt nepieciešamu polarizāciju – lineāru vertikālu (s), lineāru horizontālu (p), lineāri $+45$ vai -45 polarizētu vai cirkulāru pa labi (R) vai pa kreisi (L). Polarizācijas virzienam atskaites punkts ir režģa līnijas.



Att. 2.1.1. hologrāfiskās iekārtas shēma

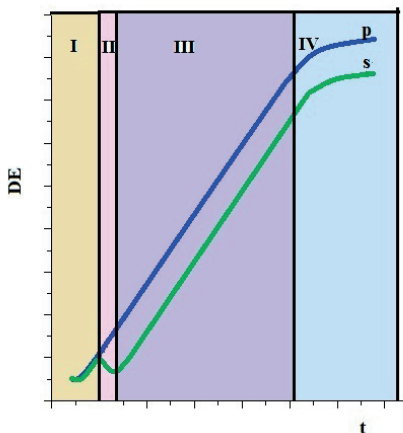
Ierakstītā režģa difrakcijas efektivitāti varēja nolasīt transmisijas vai refleksijas režīmā, kas būtībā nozīmēja, ka difragētā stara intensitāte tiek mērīta aiz parauga – transmisijas režīms (att. 2.1.1) vai pirms parauga – refleksijas režīms. Difrakcijas efektivitātes nolasīšanai izmantoja diodes lāzeru ar mazu intensitāti un zemu absorbciju pētāmā paraugā, tā lai šī lāzera starojums būtiski neietekmē hologrāfiskā režģa veidošanos [17-20].

2.2. Masas kustības virziena noteikšana, izmantojot nolasošā stara polarizāciju

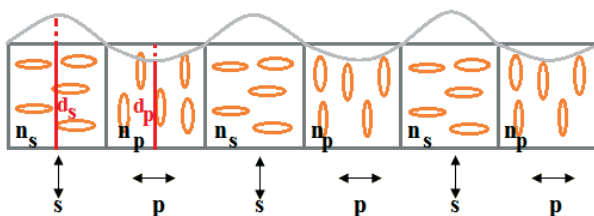
Masas kustības virziens hologrāfiskā ieraksta laikā var tikt noteikts netieši, izmantojot nolasošā stara difrakcijas efektivitātes atkarību no laika, kas mērīta refleksijas režīmā ieraksta pirmajās sekundēs. Lai veiktu eksperimentu,

ierakstošo staru polarizācijai jābūt $+45/-45$, lai uz parauga virsmas veidotos polarizācijas sadalījums.

Att. 2.2.1 redzama shematiska DE atkarība no ieraksta laika. I apgabalā izmaiņas notiek pirmajās ieraksta sekundēs (tipiski 1-60s, atkarībā no parauga jutības), kad masas transports vēl nav paspējis notikt. Ja uz fotojūtīgu materiālu krīt polarizēta gaisma, notiek ātra *trans-cis* izomerizācija un azomolekulas pagriežas perpendikulāri gaismas elektriskajam laukam (att. 2.2.2.).



Att. 2.2.1 Difrakcijas efektivitātes līknes, nolasot ar p un s polarizētu nolasošu staru refleksijas režīmā.



Att. 2.2.2. Režģa ieraksts ar $+45/-45$ ierakstošo staru polarizāciju; azomolekulu orientēšanās gaismas elektriskā lauka ietekmē

Fotojūtīgam materiālam piemīt fotoinducētā dubultlaušana, kas nozīmē, ka gaismas laušanas koeficienta n_s un n_p vērtība kļūst atšķirīga. Organiskiem materiāliem, arī visiem šajā darbā pētītiem materiāliem, piemīt pozitīva dubultlaušana, kas nozīmē, ka

$$n_p > n_s, \text{ kur} \quad (2.2.1)$$

n_s – gaismas laušanas koeficients „s” polarizācijas apgabalā (att.2.2.2) jeb ordinārais stars

n_p – gaismas laušanas koeficients „ p ” polarizācijas apgabalā (att.2.2.2) jeb ekstrordinārais stars.

DE veido gaismas viļņi ar dažādu fāzi, kas rodas, gaismas viļņiem veicot dažādu optisku ceļu nd vidē. Tā kā I apgabalā ātri rodas gaismas laušanas koeficientu n_s un n_p starpība, optiskais ceļš $n_s d_s$ un $n_p d_s$ atšķiras un rodas fāzu nobīde, kā rezultātā parādās difrakcijas efektivitāte DE. Tā kā gan priekš s , gan priekš p nolasošā stara atšķirības fāzu nobīdes vērtībās nav, DE vērtības I apgabalā ir vienādas.

Parametri I apgabalā:

n_s un n_p – mainīgi;

d_s un d_p – nemainīgi.

Atšķirības novērojamas II apgabalā, kad papildus fotoinducētās dubultlaušanas parādībai, sāk veidoties virsmas reljefa režģis. Vienā gadījumā DE turpina pieaugt, bet otrajā gadījumā novērojams neliels DE kritums. DE vērtību nosaka optiskā ceļa garums vidē un to atšķirība starp „ s ” un „ p ” apgaismotu apgabalu. Materiāliem ar pozitīvu fotoinducētās dubultlaušanas vērtību $n_p > n_s$ un līdz ar to sākuma monetā:

$$n_p d_p > n_s d_s. \quad (2.2.2)$$

Ja nolasošais stars ir „ p ” polarizēts, tad n_p attiecībā pret nolasošo staru ir gaismas laušanas koeficienta vērtība, kas atbilst n_s , tā kā ierakstošā un nolasošā stara polarizācijas „ p ” apgabalā ir perpendikulāras. Savukārt apgabalā „ s ” nolasošā un ierakstošā stara polarizācijas ir paralēlas un atbilstošā gaismas laušanas koeficienta vērtība ir n_p . Šajā gadījumā arī nevienādība 2.2.2 mainās uz pretēju:

$$n_p d_p < n_s d_s. \quad (2.2.3)$$

Maiņa notiek tikai tādēļ, ka mainās atskaites punkts.

Zinot, ka fotoinducētās dubultlaušanas vērtība pieaug ļoti strauji [promocijas darba nodaļa 7.10.], tās maksimālā vērtība tiek sasniegta jau I apgabalā, bet II apgabalā tās izmaiņas jau nav būtiskas, tāpēc tālākās DE izmaiņas nosaka virsmas reljefa veidošanās.

Parametri II apgabalā:

n_s un n_p – nemainīgi;

d_s un d_p – mainīgi.

Ja II apgabalā DE turpina pieaugt un līkne nemaina savu virziena koeficientu, kā tas ir attēlots Att. 2.2.1, tad virsmas reljefa režģis un tūluma polarizācijas režģis darbojas vienā virzienā jeb d_s kļūst lielāks par d_p . Šis gadījums atbilst p polarizācijai un nevienādībai 2.2.3.

Ja II apgabalā DE līknē novērojams neliels samazinājums, tad tas liecina, ka fotoinducētās dubultlaušanas izmaiņas un virsmas reljefs griež fāzi pretējos virzienos, kas atbilst nevienādībai 2.2.2. Šajā gadījumā nolasošais stars ir s polarizēts.

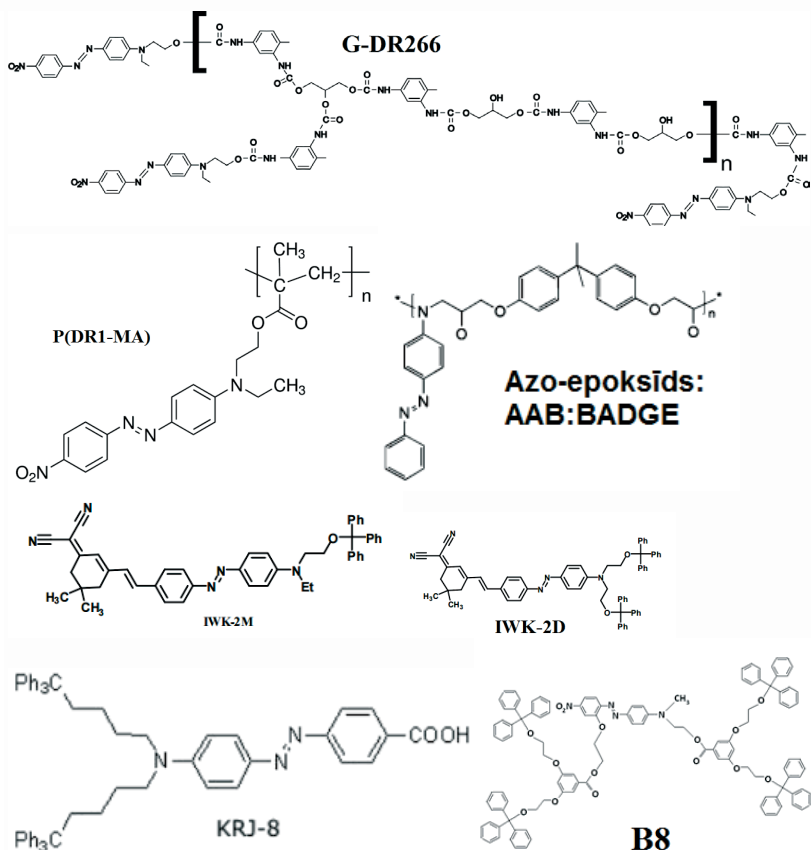
Materiāliem ar negatīvu fotoinducētās dubultlaušanas koeficientu, piemēram, halkoģenīdiem, novērojamas pretējs DE līkņu raksturs II apgabalā –

noļasot ar *p* polarizāciju DE līkne sāk samazināties, bet ar *s* – novērojams pieaugums [21-22].

III apgalbā DE pieaug, jo veidojas virsmas reljefa režģis, kad strauji pieaug d_s un samazinās d_p . Dažiem materiāliem režģa veidošanās process ir tik efektīvs, ka d_p kļūst vienāds ar nulli.

IV apgalbā iestājas piesātinājums vai tiek sasniegts DE maksimālā vērtība. Tālāki procesi ir atkarīgi no materiāla spējas veidot virsmas reljefa režģi. Maksimālā vērtība „*s*” polarizētam nolasošam staram ir nedaudz lielāka kā „*p*” polarizētam staram. Šo starpību nosaka polarizācijas režģis tilpumā, kas „*p*” polarizētam nolasošam staram darbojas pretēji virsmas reljefa režģim.

2.3. Pētītie materiāli



Att. 2.3.1. Pētīto materiālu ķīmiskā struktūra

Darbā tika pētīti funkcionālie polimēri, kur azosavienojums ir kovalenti saistīts ar polimēra matricu: DR-266 (att. 2.3.1.); līdzīgs pēc sastāva un struktūras DR-342, tai ar lielāku azosavienojumu daudzumu; komerciāli pieejams P(DR1-MA) (att.2.3.1.). Mazmolekulārie organiskie stikli: AAB:BADGE, IWK-2M; IWK-2D, KRJ-8, B8 (att.2.3.1.).

Tika apskatīta arī „saimnieks-viesis” sistēma: azokrāsvielu un želatīna maisījums; DR1-PMMA.

3. Hologrāfisko režģu veidošanās funkcionālos polimēros un mazmolekulāros organiskos stiklos

3.1. Kinētika

Difrakcijas efektivitātes līknes sniedz visu informāciju par virsmas reljefa režģa veidošanos. Pēc līknēm var noteikt, kad režģis veidojas, kad sasniedz maksimumu un kad sākas režģa dzišana.

Attēlā 3.1.1. un 3.1.2. redzamas hologrāfiskā ieraksta līknes savienojumā Poly(Disperse Red 1 – metakrilātā). Apskatot attēlu 3.1.1. redzams, ka difrakcijas efektivitāte refleksijas režīmā un transmisijas režīmā atšķiras. Refleksijas režīmā difrakcijas efektivitāte ir atkarīga no gaismas atstarošanas koeficienta no parauga virsmas, tāpēc tās vērtības ir daudz zemākas kā transmisijas režīmā. Atstarošanas koeficients ir apmēram 10%. Tāpat refleksijas režīmā difrakcijas efektivitāte tiek mērīta ar īsāku – ierakstošā stara viļņa garumu $\lambda_1 = 532$ nm, transmisijas režīmā – ar $\lambda_2 = 660$ nm, bet difrakcijas efektivitātei ir apgriezta atkarība no viļņa garuma saskaņā ar Kogelnika formulu sinusoidāliem režģiem [23]:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \varphi} \right), \quad (3.1.1.)$$

kur:

η – difrakcijas efektivitāte;

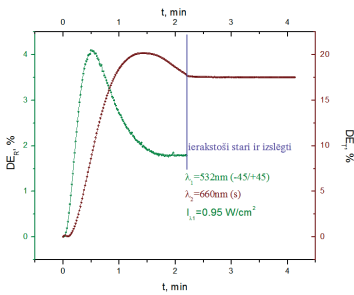
Δn – gaismas laušanas koeficienta modulācija;

d – parauga biezums (transmisijas režīmā)/režģa dziļums (refleksijas režīmā);

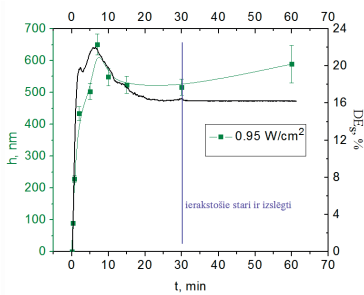
λ – gaismas viļņa garums, ar kādu tiek nolasīta difrakcijas efektivitāte

φ – leņķis staru vektoru un staru.

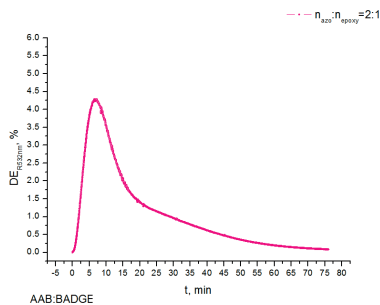
[17; 24].



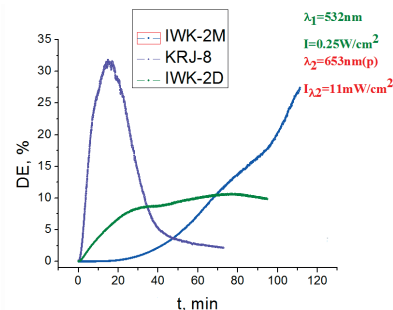
Att. 3.1.1. Difrakcijas efektivitātes līknes refleksijas (zaļā līkne) un transmisijas režīmā (sarkanā līkne), parauga biezums $d = 250$ nm, paraugs: Poly(DR1-MA)



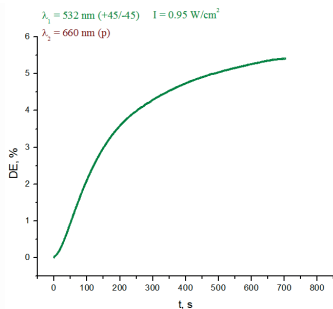
Att. 3.1.2. Difrakcijas efektivitātes līkne transmisijas režīmā un atbilstošs virsmas reljefa režģa augstums h ; parauga biezums $d = 500$ nm, paraugs: Poly(DR1-MA)



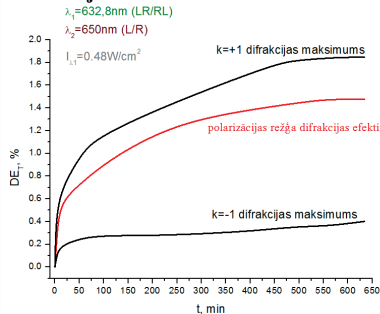
Att. 3.1.3. Hologrāfiskais ieraksts AAB:BADGE plēvē ar $I = 0.90$ W/cm². Nolasīšana ar ierakstošo viļņa garumu refleksijas režīmā



Att. 3.1.4. Hologrāfiskais ieraksts organiskajos mazmolekulārajos stiklos IWK-2M, KRJ-8 un IWK-2D pie vienādiem ieraksta apstākļiem; nolasīts ar ierakstošo viļņa garumu transmisijas režīmā



Att. 3.1.5. Hologrāfiskais ieraksts B8 plēvē: $I = 0.95$ W/cm², nolasīšana ar nolasošo staru refleksijas režīmā



Att. 3.1.6. Hologrāfiskais ieraksts D-GL266 plēvē: $I = 0.96$ W/cm², $\lambda_1 = 532$ nm (R-L), $\lambda_2 = 650$ nm, $I_2 = 0.1$ mW nolasīšana ar nolasošo staru transmisijas režīmā un ar ierakstošo staru refleksijas režīmā

Hologrāfiskais ieraksts AAB:BADGE plēvēs tika pētīts refleksijas režīmā (att.3.1.3.), jo tilpuma režģa veidošanās šajā materiālā palika otrajā plānā un nebija pētījuma objekts. Difrakcijas efektivitāte, līdzīgi kā P(DR1-MA) plēvēs, sasniedzot maksimumu norāda uz virsmas reljefa režģa izveidošanos ar dziļumu tuvu $\lambda/2 = 250$ nm, ko apliecina AFM dati. Tālākā DE krišana apzīmē režģa turpmāko veidošanos līdz tika sasniegts maksimāls režģa dziļums h_{max} , kas šajā materiālā sasniedz ≈ 500 nm pie plēves biezuma $d = 500$ nm.

Mazmolekulāros organiskos stiklos hologrāfiskā ieraksta līknes ir līdzīgas, bet režģa veidošanās noris ar dažādiem ātrumiem (att.3.1.4.). Vislabākos rezultātus uzrāda KRJ-8 plēves, kuras jutības ziņā ir visefektīvākais šajā darbā pētītais materiāls. Maksimālais režģa dziļums, kuru var iegūt KRJ-8 plēvēs ir $h_{max} = 750$ nm (pēc AFM datiem). Ieraksta kinētika atbilst Kogelnika formulai (3.1.1.). IWK-2M un IWK-2D režģa veidošanās režģa dziļuma ziņā arī ir efektīva un dziļuma ziņā sasniedz $h_{max} \approx 600$ nm (pēc AFM datiem), tomēr ieraksta veikšanai ir nepieciešamas lielas ekspozīcijas un ilgs laiks, jo šīs plēves ir cietākas par KRJ-8 plēvi un to stiklošanas temperatūra ir augstāka. Materiālā pastāv lielāki sprauguma spēki un virsmas reljefa režģa veidošanai nepieciešama lielāka enerģija [25].

Nedaudz atšķirīga uzbūve ir mazmolekulāram organiskam stiklam B8. Tā azosaites ir noekranētas ar benzola gredzeniem, tomēr tas tik un tā efektivitātes ziņā nepārspēj KRJ-8 (att. 3.1.5.). maksimāli iegūstams virsmas reljefa režģa dziļums ir $h_{max} \approx 400$ nm [14].

D-GL266 un D-GL342 funkcionālos polimēros bez virsmas reljefa veidošanās ir maz efektīva, tomēr šajos materiālos veidojas efektīvs tilpuma polarizācijas režģis, tāpēc šajos materiālos uzmanība tika pievērsta tilpuma režģu pētīšanai (att. 3.1.6.).

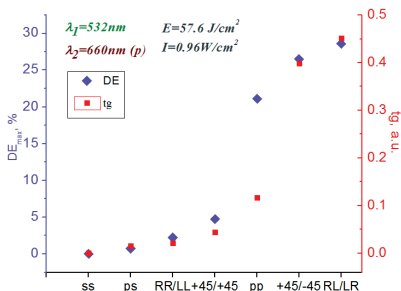
3.2. Polarizācijas ietekme

Visefektīvāk virsmas reljefa režģis veidojas, izmantojot polarizācijas modulāciju, kas veidojas no RL/LR un +45/-45 polarizētiem ierakstošiem stariem. PP polarizācijas gadījumā pastāv intensitātes sadalījums, bet elektriskais lauks svārstās perpendikulāri režģa līnijām, kas ļauj masu pārbīdīt uz neapgaismotu apgabalu, taču virsmas reljefa veidošanās ir mazāk efektīva kā iepriekšējā reizē.

RR/LL un +45/+45 neveido vērā ņemamus virsmas reljefa režģus, jo elektriskā lauka svārstības ir vērstas leņķī attiecībā pret režģa līnijām un masas transports nav efektīvs.

Ss polarizācija virsmas reljefu praktiski neveido, tā augstums nepārsniedz dažus nanometrus (<5 nm). Elektriskais lauks svārstās paralēli režģa līnijām un masas kustība nenotiek starp apgaismotiem un neapgaismotiem apgabaliem.

Kaut arī virsmas reljefa režģa veidošanās ātrums ar pretēji cirkulāru polarizāciju *RL/LR* ir vislielākais, tomēr turpmākiem pētījumiem tika izmantots *-45/+45*, jo *RL/LR* polarizāciju ir tehniski grūtāk iegūt, un mērījumos būtu jāietver polarizācijas novirzes kļūda, kas katru reizi varētu būt atšķirīga. *+45/-45* polarizāciju iestādīt var ļoti precīzi, tāpēc, ņemot vērā, ka efektivitātes ziņā šāds polarizācijas sadalījums neatpaliek, pētījumiem tika izmantoti *+45/-45* polarizēti ierakstoši starri.



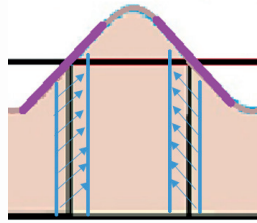
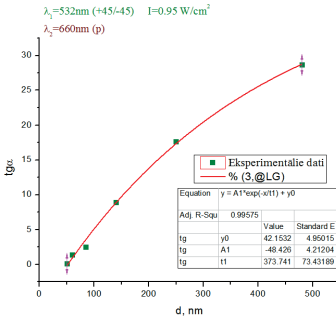
Att. 3.2.1. Virsmas reljefa veidošanās ātrums tga un maksimālā difrakcijas efektivitāte poli(Disperse Red 1 – metakrilātā) pie dažādām ieraksta polarizācijām

Visos pētītos funkcionālos polimēros un mazmolekulāros organiskos stiklos polarizācijas ietekmes raksturs ir vienāds – vislabākais ieraksts tiek iegūts ar *+45/-45* un *RL/LR* polarizācijām, nedaudz sliktākus rezultātus dod *pp* polarizācija. *RR/LL* un *+45/+45* virsmas reljefa režģa veidošanās tika novērota, bet tā nav efektīva. Intensitātes modulācija izmantojot ierakstošos starus ar polarizāciju *ss* un *ps* virsmas reljefa režģi praktiski neveido; tā augstums nepārsniedz $h = 5$ nm (att. 3.2.1).

3.3. Parauga biezuma ietekme

Virsmas reljefa veidošanās ātrumam tga ir eksponenciāla atkarība no parauga biezuma (att.3.3.1.).

Virsmas reljefa veidošanās process ir tilpuma efekts (att. 3.3.2.). Gaismai iespiežoties materiālā, sākas masas pārbīdes process. Jo dziļāk gaisma iespiežas materiālā, jo vairāk materiāls mijiedarbojas ar gaimu, un materiāls tiek spiests uz augšu, veidojot virsmas reljefu. Līdzīgi, kā saspiežot ar kādu šķidrumu piepildītu caurulīti materiāls virzās uz augšu jeb caurules atvērumu, tāpat arī plēves materiāls virzās uz augšu, veidojot virsmas reljefa režģi. Ja plēves biezums ir lielāks par ierakstošās gaismas iespiešanas dziļumu, virsmas reljefa režģa veidošanās ātrumu biezuma palielināšana nemaina.



Att. 3.3.1. Virsmas reljefa veidošanās ātruma atkarība no parauga biezuma d

Veidojoties virsmas reljefa režģim, palielinās virsmas laukums, jo veidojas sinusoidāls režģis. Plēves virsmas enerģija izsakās ar šādu formulu:

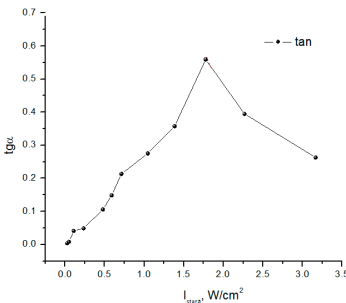
$$\varepsilon_v = \sigma S, \text{ kur} \quad (3.3.1)$$

σ – vides spraiguma koeficients; S – virsmas laukums [26]. Saskaņā ar (3.3.1.) pieaug arī plēves virsmas enerģija un ierakstam nepieciešams lielāks ierakstošu staru elektriskā lauka spēka veiktais darbs, lai virsmas reljefa režģis turpinātu veidoties. Pieaugošā virsmas enerģija darbojas pretī dzinējspēkam, kas veido virsmas reljefa režģi.

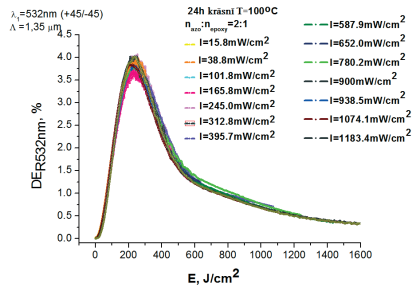
Att. 3.3.2. Virsmas reljefa režģa veidošanās shematisks attēlojums plēves tilpumā

3.4. Ierakstošu staru intensitātes ietekme

Ierakstošu staru intensitātes izvēle nosaka virsmas reljefa režģa veidošanās ātrumu. Jo lielāka ir intensitāte, jo lielāks elektriskā lauka gradients



Att. 3.4.1. Režģa veidošanās ātruma atkarība no intensitātes paraugā P(DR1-MA) ar biezumu $d = 64\text{nm}$



Att. 3.4.2. Difrakcijas efektivitāte režģiem, kas ir ierakstīti ar dažādām ierakstošu staru intensitātēm AAB:BADGE plēvē

veidojas pusperioda robežās un masas pārnese dielektroforēzes rezultātā var noritēt straujāk (att. 3.4.1.).

Ierakstošo staru intensitātes pieaugums pie mazākām intensitātēm, kas priekš poli(disperse red 1 – metakrilāts) materiāla ir līdz $I = 2\text{ W/cm}^2$, veido režģi ātrāk, nelielas novirzes no lineāras atkarības radija nevienmērīgs paraugu biezums, kas varēja svārstīties $\Delta h = \pm 5\text{ nm}$.

Pēc intensitātes vērtības $I = 2.0\text{ W/cm}^2$ pārsniegšanas ātrums samazinās. Šajā gadījumā tiek uzskatīts, ka parādās siltuma efekts, kas stipri mīkstina materiālu un kavē režģa veidošanos [14].

Citos pētītos funkcionālos polimēros un mazmolekulāros organismos stiklos intensitātes ietekme uz virsmas reljefa veidošanās ātrumu ir līdzīga, izņemot azoepoksīda plēves. Attēlā 3.4.2. ir redzams, ka ierakstošo staru intensitāte diapazona $I = 15.8 - 1183.4\text{ mW/cm}^2$ neietekmē režģa veidošanās procesu, bet pie noteiktās ekspozīcijas ar jebkuru intensitāti no pētītā diapazona, var iegūt režģi ar noteiktiem parametriem, pievadot tam zināmu ekspozīcijas daudzumu.

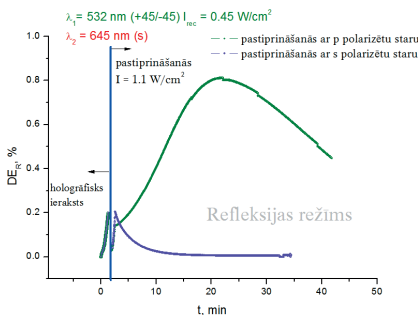
3.5. Virsmas reljefa režģa pastiprināšana

Azoepoksīdu plēvēs tika novērota virsmas reljefa režģa pastiprināšana (att. 3.5.1.) [27].

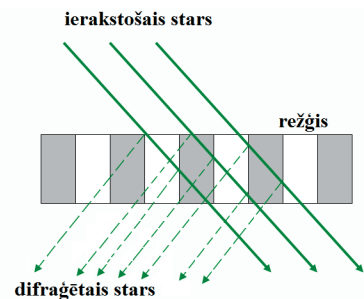
Pastiprināšanas procesā ļoti svarīga nozīme ir pastiprinoša stara polarizācijas izvēlei.

Ja pēc viena stara aizsegšanas, otrā stara polarizācija tiek pagriezta uz p attiecībā pret režģa vektoru, novērojams režģa tālākais ieraksts.

Kad režģi apstaro viens ierakstošais stars, tā difragētais stars režģa tilpumā iet otrā ierakstošā stara ceļu (att. 3.5.2). Rezultātā rodas interference starp ierakstošo staru un difragēto un ir iespējams turpmāks režģa ieraksts.



Att. 3.5.1. Virsmas reljefa režģa pastiprināšana ar s un p polarizētu staru vienādos apstākļos.



Att. 3.5.2. Ierakstošā un difragētā stara gaita režģī pašpastiprināšanās procesā

Ja ierakstošā stara polarizācija ir „ p ” intensitātes sadalījums uz virsmas atbilst „ p ” polarizācijas apgaismotiem apgabaliem $-45/+45$ polarizācijas sadalījumā, rakstot ar diviem ierakstošiem stariem, interferences aina, kas rodas no viena ierakstošā stara un no tā difragētā stara, turpina režģa ierakstu, līdzīgi kā divi „ $p-p$ ” polarizētu stari.

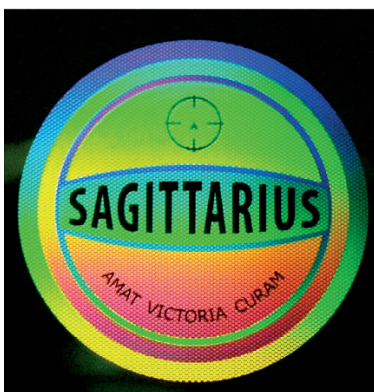
Ja ierakstošais stars, ar kuru apgaismo režģi, tiek polarizēts ar „ s ”, sākotnējais režģis tiek dzēsts. Līdzīgi kā ar p polarizāciju, izveidojas interferences aina no ierakstošā stara un tā difragētā stara, bet s polarizācijas apgabali atbilst p apgaismotiem apgabaliem $-45/+45$ polarizācijas sadalījuma sākotnējā ierakstā.

Zināms, ka masas kustība notiek no p polarizācijas apgaismotiem apgabaliem uz s polarizācijas apgaismotiem apgabaliem [2.2. nodaļa]. Rezultātā, pašpastiprināšanās procesā masa bīdās pretēji sākotnējam virzienam un režģis tiek dzēsts. Tā kā $s-s$ polarizācijas modulācija uz virsmas režģi neveido apskatāmā materiālā, pēc dzēšanas režģa veidošanās nav novērojama.

3.6. Mazmolekulāro organisko stiklu praktiskā izmantošana

Darba ietvaros mazmolekulārā organiskā stiklā KRJ-8 sadarbībā ar Daugavpils Universitātes G. Liberta Inovatīvās mikroskopijas centru tika ierakstīta pikseļu hologramma – hologrāfiskā uzlīme (att. 3.6.1).

KRJ-8 plēve tika izmantota kā bezkodināšanas rezists, un uzlīme ir izveidota bez kodināšanas pēc ieraksta. Hologrammas diametrs ir 13.5mm. Reljefa dziļums sastādīja 150-200 nm, kas nodrošināja labu hologrammas spožumu. Hologrammu varēja pavairot, izmantojot standarta iekārtas hologrāfisko uzlīmju ražošanai.



Att. 3.6.1. Reljefa-fāzu hologrammas fotogrāfija. Hologramma ierakstīta iekš KRJ-8 bez kodināšanas procesa. Ieraksta laiks 15h, diametrs – 13.5 mm

Pikseļu hologrammas ieraksts aizņēma 15h, līdz ar to ir būtiski samazināt ieraksta jutību, lai praktiski veiksmīgi varētu izmantot bezkodināšanas rezistus. Rezistos, kuri pēc ieraksta ir jākodina, tradicionālās anolģiskas hologrammas tiek ierakstītas 1h laikā.

Ierakstītā hologramma parāda, ka mazmolekulāriem organiskiem stikliem ir potenciālās izmantošanas iespējas hologrāfijā, bet ir jāsamazina ieraksta jutība, modificējot rezista sastāvu [25].

3.7. Kopsavilkums par funkcionāliem polimēriem

Darba ietvaros tika pētīti vairāki funkcionālie polimēri un mazmolekulārie organiskie stikli. Katram no pētāmiem materiāliem ir savas priekšrocības un trūkumi, kas tiek aprakstīti tālāk.

Funkcionālais polimērs P(DR1-MA) ir komerciāli pieejams polimērs. Šajā polimērā ir novērojama virsmas reljefa režģa veidošanās ar lielu efektivitāti, režģa dziļums var pārsniegt parauga biezumu, bet ieraksta jutība sasniedz 0.187 J/nm^2 , kas ir labs rādītājs.

Pie materiāla trūkumiem varētu pieskaitīt materiāla dārdzību, kaut arī izejvielas ir lētas – PMMA un DR1, funkcionālā polimēra sintēze ir sarežģīta. Trūkums ir arī tāds, ka parauga biezums tiek ierobežots, maksimālais biezums, kuru izdevās iegūt bija $d \sim 500 \text{ nm}$. Pēc pulverveida funkcionālā polimēra ilgstošas glabāšanas, tas zaudēja savas īpašības – plēves nebija optiski hamogēnas un virsmas reljefa veidošanās efektivitāte būtiski mazinājās. To varēja izsaukt funkcionālā polimēra sadalīšanās.

Starp pētītiem materiāliem virsmas reljefa veidošanai mazmolekulārā organiskā stiklā KRJ-8 ir iegūts visefektīvākais režģis. Ieraksta jutība sasniedz 0.145 J/nm^2 . Plēves ir optiski hamogēnas un adhēzija no stikla pamatnes nav novērota. Pie materiāla trūkumiem jāatzīmē salīdzinoši sarežģīta sintēze, kuras laikā tiek iegūts mazmolekulārais stikls ar piemaisījumiem [28]. Tāpat pastāv iespēja, ka katrā atsevišķā sintēzē iegūtā mazmolekulārā organiskā stikla sastāvs var atšķirties, kaut arī būtiskas atšķirības hologrāfiskajā ierakstā dažādām sintēzēm netika novērotas.

Mazmolekulārājā organiskajā stiklā IWK-2M un IWK-2D veidojas virsmas reljefa režģis pie lielām ekspozīcijām – ieraksta jutība sasniedz $5\text{--}6 \text{ J/nm}^2$, kas ir zemākā novērotā jutība pētāmiem mazmolekulāriem organiskiem stikliem. Līdzīgi kā KRJ-8 organiskajam stiklam, to sintēze ir sarežģīta, iespējams, neatkārtojas. Kā priekšrocība šiem diviem stikliem ir optiski kvalitatīvu plēvju iegūšana, tomēr efektivitātes un izmaksu ziņā šie materiāli nav perspektīvi hologrāfiskajam ierakstam.

Mazmolekulārājā organiskajā stiklā B8 – ieraksta jutība sasniedz $\sim 0.5 \text{ J/nm}^2$, kas ir salīdzinoši labs rādītājs, bet tas atpaliek no KRJ-8 plēvēs iegūtiem rezultātiem. Materiāla trūkumi, līdzīgi kā citiem mazmolekulāriem stikliem, parādās sintēzes procesā un vienādi ir iepriekš apskatītiem.

Pētītie funkcionālie polimēri uz poliuretāna bāzes ir G-DR266 un G-DR266. Šajos materiālos veidojas vājš virsmas reljefa režģis, bet ieraksta jutība sasniedz $\sim 200 \text{ J/nm}^2 \text{cm}^2$, kas ir ļoti liels rādītājs. Neskatoties uz to, materiālā veidojas labs tilpuma režģis un tam raksturīgas lielas fotoinducētās dubultlaušanas izmaiņas. Materiālu trūkumi ir maza gaismas jutība, līdz ar to nepieciešamas lielas ekspozīcijas. Materiāla sintēzes process var nebūt atkārtojams uz materiāla struktūra ir balstīta uz literatūras aprakstu, nevis uz eksperimentāliem pētījumiem.

Azoepoksīdu AAB:BADGE plēvēs ieraksta jutība ir $0,91 \text{ J/cm}^2 \text{nm}$, taču šo jutību iespējams uzlabot vismaz 2 reizes pievienojot klāt citas krāsvielas, kas palielina ierakstošā viļņa garuma absorbciju, vai izmantojot papildus starojumu hologrāfiskā ieraksta laikā. Azoepoksīdu plēves tiek iegūtas no lētam izejvielām, to izgatavošanai nav vajadzīga ķīmijas laboratorija, ir iespējams iegūt liela laukuma plēves un ir viegli kontrolēt plēves biezumu. Adhēzija no stikla pamatnes netika novērota arī pēc ilgstošas uzglabāšanas. Pie trūkumiem jāatzīmē mazāka jutība kā mazmolekulāriem organiskiem stikliem.

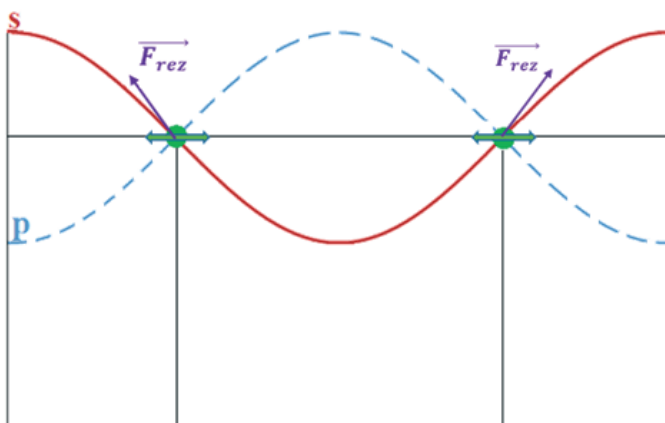
4. Virsmas reljefa veidošanās mehānisms

Izmantotie materiāli virsmas reljefa veidošanai ir dielektriķi, kuru molekulām piemīt dipola moments. Kad šādu materiālu apgaismo ar interferences ainu, kurā ir polarizētas gaismas intensitātes gradients, notiek dielektroforēze, kas ir virsmas reljefa režģa veidošanās vilcēj spēks. Tas ir nosakāms pēc sekojošās formulas[29]:

$$F(t) = (m(t) \cdot \nabla) E(t), \text{ kur} \quad (8.1)$$

$m(t)$ – no laika atkarīgs dipola moments

$E(t)$ – no laika atkarīgs elektriskais lauks [29-31].



Att. 8.3. polarizācijas modulācija uz virsmas ar +45/-45 polarizētiem ierakstošiem stariem

Apskatīsim gadījumu, kad uz fotojutīgās plēves virsmas pastāv polarizācijas modulācija, kas atbilst +45/-45 vai RL/LR ierakstošo staru interferences ainai. Uz jebkuru punktu, kas atrodas uz virsmas, darbojas fotoinducēts dzinēj spēks. Šis punkts ir dielektriska daļiņa, kurai piemīt dipola moments [32; 33]. Spēks, kas darbojas uz dipola momentu ir izteikts ar formulu (8.1).

Uz daļiņu darbojas p polarizācijas sadalījuma elektriskais lauks, un s polarizācijas sadalījuma elektriskais lauks. Elektriskais lauks pēc Kulona likuma ir apgriezti proporcionāls vides dielektriskais caurlaidībai:

$$E \sim \frac{1}{\varepsilon}, \text{ kur} \quad (8.2)$$

ε -dielektriska caurlaidība.

Dielektriskā caurlaidība ir tieši proporcionāla gaismas laušanas koeficientam:

$$\varepsilon \sim n^2, \text{ kur} \quad (8.3)$$

n – gaismas laušanas koeficients [34].

Pēc iepriekš veiktajiem eksperimentiem ir zināms, ka azopolimēriem ir pozitīva dubultlaušana, kas nozīmē, ka

$$n_p > n_s. \quad (8.4)$$

Apvienojot 8.2, 8.3, un 8.4, iegūst:

$$E_p < E_s, \text{ kur} \quad (8.5)$$

E_p – p -polarizācijas radītais elektriskais lauks;

E_s – s -polarizācijas radītais elektriskais lauks.

Tā kā spēks, kas darbojas uz dielektrisko daļiņu ir tieši proporcionāls elektriskajam laukam, daļiņa pārvietosies s -polarizācijas intensitātes maksimuma virzienā. Maksimāls spēks tiek sasniegts s polarizācijas maksimumā, kas arī atbilst eksperimentiem, kur novērojams, ka masas transports notiek no p polarizācijas apgaismota apgabala uz s -polarizācijas apgaismoto apgabalu.

Spēks, kas darbojas pretī masas transporta dzinēj spēkam, ir virsmas spraiguma spēks, kas ir atkarīgs no brīvās virsmas enerģijas, izteiksme (3.3.1.).

Šis moedelis ir balstīts uz pieņēmumu, ka $n_p > n_s$ organiskiem materiāliem. Lai šis modelis būtu spēkā arī citām polarizācijas kombinācijām, n_p jābūt lielākam kā n (negaismota parauga gaismas laušanas koeficients): $n_p > n$ un $n > n_s$. Šis pieņēmums ir eksperimentāli jāpārbauda.

5. “Saimnieks-viesis” sistēma

“Saimnieks viesis” sistēma būtiski atšķiras no funkcionāliem polimēriem gan pēc sastāva, gan pēc efektivitātes. Azosavienojums un polimērs sistēmā atrodas maisījuma veidā, nevis ir kovalenti saistīti kā tas bija funkcionālos polimēros. Sastāva atšķirības dēļ funkcionālos polimēros un „saimnieks-viesis” sistēmā ir novērojamas būtiskas hologrāfiskā ieraksta efektivitātes atšķirības. Tas ir izskaidrojams galvenokārt ar to, ka gaismas elektriskais lauks iedarbojas tikai uz azosavienojumiem, kuri veido mazāko masas daļu paraugā. Pati polimēra ķēde nepiedalās masas pārbīdes procesā, tāpēc iegūtie rezultāti ir sliktāki.

Tomēr ir tādi polimēri, kuros gaismas starojuma ietekmē notiek elektroķīmiskās reakcijas, vai notiek polimēra saraušanās vai izplešanās, kā tas piemēram ir pētītajās azoželatīna plēvēs [20;35].

Kopsavilkums

Azoželatīna plēvēs ir novērojama maza virsmas reljefa veidošanās ar maksimālo dziļumu $h_{max} = 25$ nm. Virsmas reljefa režģa veidošanās mehānisms ir vienkāršs – tā ir želatīna tilpuma palielināšanās starošanas laikā. Par to liecina tas, ka virsmas reljefas veidojas tikai rakstot ar ierakstošiem stariem, kuriem ir intensitātes modulācija uz virsmas – *ss*.

Tilpumā hologrāfiskā ieraksta laikā veidojas tilpuma režģis, kas ir azomolekulu izomerizācijas un želatīna balināšanas efekts.

Azoželatīna plēvēs ir novērots labs fotoinducētais dihroisms, bet mazas fotoinducētās dubultlaušanas vērtības.

Azoželatīna plēves ir viegli izgatavojamas, izejmateriāli nav toksiski, ir lēti un plaši izplatīti. Plēvju izgatavošanai nav nepieciešamas speciālas ķīmijas laboratorijas; tās ir iespējams izgatavot pat mājas apstākļos.

Tomēr režģus ar lielām difrakcijas efektivitātēm iegūt azoželatīna plēvēs neizdevās, kaut arī izdevās būtiski palielināt plēvju jutību, radot skābu vidi materiālā.

Nobeigums

Darbā ir apkopoti eksperimentāli rezultāti par vairākiem materiāliem, kurus var izmantot tiešajam un tilpuma hologrāfiskajam ierakstam, dažādu difrakīvi optisku elementu izstrādei. Darbā tiek apskatīta materiālu sintēze un plāno kārtiņu izgatavošanas tehnoloģijas; runāts par ieraksta kinētiku funkcionālos polimēros, mazmolekulāros organiskos stiklos un „saimnieks-viesis” sistēmā uz azobenzola bāzes, un kā tas saskan ar virsmas reljefa dziļumu, noskaidrota polarizācijas ietekme uz režģa veidošanās procesu. Parādīts, ka virsmas reljefa dziļumu ietekmē izmantotās plēves biezums, un ka ir optimāls plēves biezums maksimāli augstam režģim. Parādīts, ka masas kustības virzienu ir iespējams noskaidrot pēc difrakcijas efektivitātes izmaiņām laikā transmisijas režīmā, izmantojot dažādi polarizētus nolasošos starus. Šai metodei nav nepieciešama papildus shēmu taisīšana un materiālu izlietojums. Apskatīta virsmas reljefa veidošanās pie dažādiem režģa periodiem un dažādām ierakstošo staru intensitātēm. Lai izprastu virsmas reljefa veidošanās mehānismu, tika pētīti fotoinducētie procesi materiāla tilpumā – fotoinducētā dubultlaušana un fotoinducēts dihroisms. Noskaidrots, ka režģa veidošanās process ir atkarīgs no daudzām materiāla īpašībām – virsmas brīvās enerģijas, sprauguma, fotoinducētās dubultlaušanas virziena, materiāla uzbūves no ķīmijas viedokļa; tāpat svarīgi ir izvēlēties pareizos ieraksta apstākļus – polarizāciju, intensitāti.

Pētītos materiālos iegūtā gaismas jutība vēl neapmierina prasības priekš plaši izmantojamiem hologrāfiskiem rezistiem, neskatoties uz to, darbā ir parādīts, ka arī pētītos materiālus ir iespējams izmantot māksliniecisku hologrammu ierakstam. Pētīto materiālu fotojutību ir iespējams palielināt ar fizikālām pastiprināšanas metodēm, tāpēc ir nepieciešami turpmāki pētījumi šajā jomā.

Izmantotā literatūra

- [1] Christopher Palmer, DIFFRACTION GRATING HANDBOOK, sixth edition, NEWPORT CORPORATION, 705 St. Paul Street, Rochester, New York 14605 USA, 2004, Chapter 1
- [2] Gratings: Theory and Numeric Applications, Evgeny Popov, editor (Institut Fresnel, CNRS, AMU, 2012)
- [3] Tomasz S. Tkaczyk, Field Guide to Microscopy, SPIE Field Guides Volume FG13, SPIE PRESS, Bellingham, Washington USA, 2010
- [4] SMART LIGHT-RESPONSIVE MATERIALS, Yue Zhao, Tomiki Ikeda, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009, p. 514
- [5] Host-guest chemistry, pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Host-guest_chemistry
- [6] Da-Hui Qu, Qiao-Chun Wang, Qi-Wei Zhang, Xiang Ma, and He Tian*, Photoresponsive Host-Guest Functional Systems, Chem. Rev. , 2015, 115 (15), pp. 7543–7588
- [7] Mítica Cezar Spiridon, Florica Adriana Jerca, Valentin Victor Jerca, Dumitru Mircea Vuluga, Dan Sorin Vasilescu, New side-chain azo-polymers for optical applications: Synthesis and characterization, Proc. of SPIE Vol. 8545 85450M-1
- [8] Valentin Victor Jerca, Florica Adriana Nicolescu, Adriana Baran, Dan Florin Anghel, Dan Sorin Vasilescu, Dumitru Mircea Vuluga, Synthesis and characterization of side-chain oxazoline-methyl methacrylate copolymers bearing azo-dye, Reactive & Functional Polymers 70 (2010) 827–835
- [9] Mitică Cezar SPIRIDON, Florica Adriana JERCA, Valentin Victor JERCA, Dumitru Mircea VULUGA, Dan Sorin VASILESCU, NOVEL REACTIVE MONOMERS BEARING A PUSH-PULL AZO-MOIETY, U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 76, Iss. 1, (2014) p. 1454–2331
- [10] Najun Li, Jianmei Lu, Qingfeng Xu, Lihua Wang, Synthesis and the third-order non-linear optical properties of new azobenzene-containing side-chain polymers, Optical Materials Volume 28, Issue 12, 2006, p. 1412–1416.
- [11] Yue Zhao and Jie He, Azobenzene-containing block copolymers: the interplay of light and morphology enables new functions, Soft Matter, 2009, 5, p. 2686–2693 (2009)
- [12] Oskar Nuyken, Richard Weidner, Graft and block copolymers via polymeric azo initiators, Volume 73/74 of the series Advances in Polymer Science pp. 145–199 (2005)
- [13] E. Ishow, K. Nakatani, J. Delaire, L. Qiu, Novel Monomeric Amorphous Material for Second-Order NLO: The Low-Molecular-Weight Organic Glasses, Volume 100 of the series NATO Science Series, (2003), pp. 475–482
- [14] J. Aleksejeva, J. Teteris, A. Tokmakovs, Azobenzene containing low-molecular weight organic glasses for optical recording, Physics Procedia 44 (2013) 19–24
- [15] Johannes Karl Fink, REACTIVE POLYMERS FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, William Andrew Publishing, Norwich, NY 13815, 2005, p. 139–241
- [16] Epoxy Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy#Curing_epoxy_resins uz 18.08.2016
- [17] J. Aleksejeva, J. Teteris, Surface relief grating recording in azo polymer films, IOP conference series: Material Sciences and Engineering, Vol 49 (2013) 012024 doi:10.1088/1757-899X/49/1/012024
- [18] Aleksejeva, J., Gerbreder, A., Reinfelde, M., Photoinduced Birefringence in Azo-Dye Doped Polyurethane, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 48(4), (2011), pp. 5–14.
- [19] J. Aleksejeva, A. Gerbreder, U. Gertners, M. Reinfelde, J. Teteris, Polarization holographic recording in Disperse Red1 doped polyurethane polymer film, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 23 (2011) 012006
- [20] J. Aleksejeva, J. Teteris, Azodyed gelatin films for holographic recording, Journal of Non-Crystalline Solids, s 377 (2013) Pages 209–211
- [21] J. Teteris, M. Reinfelde, J. Aleksejeva, U. Gertners, Optical field-induced mass transport in soft materials, Physics Procedia, Volume 44, (2013), Pages 151–158.

- [22] J. Teteris, J. Aleksejeva U. Gertners, Photoinduced mass transport in soft materials, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 23 (2011) 012002
- [23] H. Kogelnik, Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings, Bell Syst. Tech. J. 48, 2909 (1969).
- [24] A. Raicu Luca, L. Rocha, A.-M. Resmerita, A. Macovei, M. Hamel, A.-M. Macsim, N. Nichita, N. Hurduc, Rigid and flexible azopolymers modified with donor/acceptor groups. Synthesis and photochromic behavior, eXPRESS Polymer Letters 2011, 5(11), 959–969
- [25] A. Gerbreder, A. Bulanovs, J. Mikelsons, K. Tarasovskis, E. Potanina, A. Vembris, J. Teteris, Photoinduced mass transport in low molecular organic glasses and its practical application in holography, Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 421, 1 August 2015, Article number 17409, Pages 48-53
- [26] “Поверхностная энергия”, Pieejams: https://ru.wikipedia.org/wiki/Поверхностная_энергия, uz 12.02.2018
- [27] A. Ozols, A. Belyaev, V. Kokars, P. Augustovs, K. Traskovskis, D. Saharov, Recording and self-enhancement of dynamic polarization gratings in degenerate four-wave-mixing geometry, Proc. of SPIE Vol. 9421, 942108 (2014)
- [28] K. Munakata, K. Harada, M. Itoh, S. Umegaki, T. Yatagai, A new holographic recording material and its diffraction efficiency increase effect: the use of photoinduced surface deformation in azo-polymer film, Opt. Commun., 2001, 191, 15–19.
- [29] C. Zhang, K. Khoshmanesh, A. Mitchell, K. Kalantar-zadeh, “Dielectrophoresis for manipulation of micro/nano particles in microfluidic systems”, Anal Bioanal Chem (2010) 396:401–420
- [30] T.B. Jones, “Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation”, IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, Volume: 22, Issue: 6, Nov.–Dec. (2003), p. 33–42
- [31] Kai F Hoettges, Jeremy W Dale and Michael P Hughes, “Rapid determination of antibiotic resistance in E. Coli using dielectrophoresis”, Phys. Med. Biol. 52(2007) 6001–6009
- [32] Jae-Dong Lee, Mi-Jeong Kim, and Tomonobu Nakayama, Langmuir 2008, 24, 4260–4264
- [33] Ivanov, M. & Eiju, T., “Azodye Gelatin Films for Polarization Holographic Recording” OPT REV (2001) 8: 315. <https://doi.org/10.1007/s10043-001-0315-y>
- [34] O. Baldus, S.J.Zilker, Surface relief gratings in photoaddressable polymers generated by cw holography, Appl. Phys. B 72, 425–427 (2001) / Digital Object Identifier (DOI) 10.1007/s003400100531
- [35] J. Aleksejeva, J. Teteris, Photoinduced Phenomena in Azo-Dyed Gelatin Films IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 38 012028 (2012)

Autora publikāciju saraksts

Promocijas darbā izmantotās publikācijas:

1. A. Gerbreders, A. Bulanovs, J. Mikelsons, K. Tarasovskis, E. Potanina, A. Vembris, J. Teteris, Photoinduced mass transport in low molecular organic glasses and its practical application in holography, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Volume 421, 1 August 2015, Article number 17409, Pages 48–53
2. A. Gerbreders, J. Aleksejeva, A. Bulanovs, A. Ogurcovs, E. Zarins, A. Tokmakovs, A. Vembris, Optical properties of the low-molecular amorphous azochromophores and their application in holography, *Journal of Physics: Conference Series*, June 2015, Volume 619, Issue 1, 17, Article number 012055
3. J. Aleksejeva, J. Teteris, „Direct Surface Relief Patterning of Azo-polymers Films via Holographic Recording”, „Canadian journal of Physics” 2014, 92(7/8): 842–844, 10.1139/cjp-2013-0598
4. J. Aleksejeva, J. Teteris, Surface relief grating recording in azo polymer films. IOP conference series: Material Sciences and Engineering, Vol 49 (2013) 012024 doi:10.1088/1757-899X/49/1/012024
5. K. Klismeta, J. Teteris, J. Aleksejeva, Photoinduced mass transport in azo compounds, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol 49 (2013) 012036 doi:10.1088/1757-899X/49/1/012036
6. J. Aleksejeva, J. Teteris, A. Tokmakovs, Azobenzene Containing Low-Molecular Weight Organic Glasses for Optical Recording, *Physics Procedia*, Volume 44, (2013), Pages 19–24
7. J. Teteris, M. Reinfelde, J. Aleksejeva, U. Gertners, Optical field-induced mass transport in soft materials, *Physics Procedia*, Volume 44, (2013), Pages 151–158n
8. J. Aleksejeva, J. Teteris, Azodyed gelatin films for holographic recording, *Journal of Non-Crystalline Solids*, s 377 (2013) Pages 209–211
9. J. Aleksejeva, J. Teteris, Photoinduced Phenomena in Azo-Dyed Gelatin Films; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 38 012028 (2012)
10. A. Gerbreders, J. Aleksejeva, U. Gertners, J. Teteris, The synthesis of different variants of azo-polyurethane polymers for optical recording, *JOAM*, Vol. 13, 11–12, Nov. (2011), p. 1559–1562
11. J. Aleksejeva, A. Gerbreders, M. Reinfelde, J. Teteris, Polarization holographic recording in azo-benzene doped polyurethane polymer films, *JOAM*, Vol. 13, 11–12, Nov. (2011), p. 1577–1580
12. Aleksejeva, J., Gerbreders, A., Reinfelde, M., Teteris, J., Photoinduced Birefringence in Azo-Dye Doped Polyurethane, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Volume 48, Issue 4, pp.5-14

13. J. Teteris, J. Aleksejeva U. Gertners, Photoinduced mass transport in soft materials IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 23 (2011) 012002
14. J. Aleksejeva, A. Gerbrederis, U. Gertners, M. Reinfelds, J. Teteris, Polarization holographic recording in Disperse Red1 doped polyurethane polymer film IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 23 (2011) 012006

Pārējās publikācijas:

15. J. Aleksejeva, J. Teteris, Ultraviolet holographic recording in photopolymers; PHYSICA STATUS SOLIDI (c) 8: 2850–2853. (2011).
16. J. Aleksejeva, J. Teteris, Volume grating recording in acrylate based photopolymers; LJPTS, Volume 47, Number 3 / (2010), 13–22
17. A. Gerbrederis, J. Teteris, J. Aleksejeva, A. Danilovs. Holographic recording in photochrome chalcogenide composites. Lithuanian Journal of Physics. 2010, Vol. 50. No. 1, pp. 47–53.
18. A. Gerbrederis, E. Aleksejeva, A. Danilovs, J. Teteris, Optical recording in spiropyran and polymer composite films; JOAM, December (2009), Vol. 11, No. 12, 2155–2158
19. A. Gerbrederis, J. Teteris, E. Aleksejeva, A. Danilovs, Holographic recording in spiropyran-polymer and spiropyran-chalcogenide-polymer composite films; LJPTS (2009), N 3, 23–30.

Dalība konferencēs

1. Developments in Optics and Communications, 21 – 23 March, 2016, Riga, Latvia, Oral presentation: „Direct holographic recording in azo-epoxy polymer films”, Abstract book: 12th International Young Scientist Conference „Developments in Optics and Communications”, Riga, Latvia, p. 9.
2. 10-я Международная конференция "ГолоЭкспо-2013". 17-18 september 2013, Maskava, Krievija. Poster: Surface relief grating formation in azo-dye containing functional polymers. Abstract book: "ГОЛОЭКСПО – 2013", "ГОЛОГРАФИЯ, НАУКА, ПРАКТИКА" 17-18 сентября 2013 г. стр.
3. The 25th International Conference on Amorphous and Non-crystalline Semiconductors *ICANS-25*, 18-23 August, 2013, Toronto, Canada, Poster: Direct Surface Relief Patterning of Azo-polymers Films via Holographic Recording. Abstract book: The 25th International Conference on Amorphous and Non-crystalline Semiconductors, Toronto, ON Canada, p.116.
4. 6th international conference amorphous and nanostructured Chalcogenides *ANC-6*, 24-28 June, 2013, Brasov, Rumania. Poster: Surface relief patterning in azo-dye containing organic polymers. Abstract book:

- „6th international conference amorphous and nanostructured Chalcogenides”, Brasov, Romania, June 24-28, 2013, p. 23.
5. Functional materials and nanotechnologies „*FM&NT 2013*” 21-24 April 2013, Tartu, Estonia. Poster: „Surface relief grating recording in azo-polymer films”. Abstract book: Functional materials and nanotechnologies, Tartu, 2013, p. 265.
 6. „Open readings” 20-23 March, 2013, Vilnius, Lithuania, Oral presentation: „Holographic recording in azo polymer films”. Abstract book: Open readings-2013 20-23 March, Vilnius, Lithuania, p. 30.
 7. Developments in Optics and Communications, 10 – 12 April, 2013, Riga, Latvia, Oral presentation: „Surface relief formation in azo-dyed polymers”, Abstract book: 9th International Young Scientist Conference „Developments in Optics and Communications”, Riga, Latvia., p. 70.
 8. The international symposium on non oxide and new optical glasses 2012, 1-5 July, Saint-Malo, France. Poster: „Azo-dyed gelatin films for holographic recording”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris; Abstract book: The international symposium on non oxide and new optical glasses 2012, Saint-Malo, France, p. 275
 9. Solid state chemistry 2012, 10-14 June, Pardubice, Czech Republic. Poster: „Azo-benzene containing low-molecular weight organic glasses for optical recording”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris, A. Tokmakovs; Abstract book: Abstract of Solid state chemistry 2012, Pardubice, Czech Republic, p. P-2
 10. Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science 2012, 14-19 May, Florence, Italy. Poster: „Volume and Surface Holographic Grating Recording in Azo-dyed Gelatine Films”, authors: J. Aleksejeva, J. Teteris; Abstract book: SURFINT-SREN III, 2012, Bratislava, Slovakia, p. 84.
 11. Functional materials and nanotechnologies 2012, 17-20 April, Riga, Latvia. Poster: „Photoinduced Phenomena in Azo-Dyed Gelatin Films”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris; Abstract book: Functional materials and nanotechnologies, 2012, Riga, Latvia, p. 178.
 12. Development in Optic and Communication 2012, 12-14 April, Riga, Latvia. Mutiskais referāts: „Photoinduced processes and holographic recording in azo-dyed gelatin films”, Autori: J. Aleksejeva, J. Teteris; Abstract book: Development in Optic and Communication 2012, Riga, Latvia, p. 50.
 13. Advanced Optical Materials and Devices, 28-31 August, 2011, Vilnius, Lithuania. Mutiskais referāts „Surface relief and polarisation grating formation in azo-dye containing polymer films”, autori: J. Aleksejeva, A. Gerbreders, J. Teteris. Abstract book: Advanced Optical Materials and Devices AOMD-7, 2011, Vilnius, Lithuania, p. 10.
 14. 24th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors, 21-26 August, 2011, Nara, Japan. Postera referāts „Polarization and Surface Relief Gratings in Disperse Red 1 Doped

- Polyurethane Thin Films” autori: J. Aleksejeva, A. Gerbreders, U. Gertners, M. Reinfelds, J. Teteris. Abstract book: 24th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors ICANS-24, 2011, Nara, Japan p.169
15. 5-th International Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides, 26 Juny-1July, 2011, Bucharest-Magurele, Romania. Postera referāts „Polarization holographic recording in azo-benzene doped polyurethane polymer films” autori: J. Aleksejeva, A. Gerbreders, U. Gertners, M. Reinfelds, J. Teteris. Abstract book: International Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides ANC-5, 2011, Bucharest-Magurele, Romania, p. 40.
 16. Developments in Optics and Communications, 28-30 April, 2011, Riga, Latvia. Mutiskais referāts „Photoinduced birefringence in azo-dye doped polyurethane”, autori: J. Aleksejeva, A. Gerbreders, M. Reinfelds, J. Teteris, Abstract book Developments in Optics and Communications 2011, Riga, Latvia p.60.
 17. Functional materials and nanotechnologies, 5-8 April, 2011, Riga, Latvia. Postera referāts „Polarization holographic recording in Disperse Red 1 doped polyurethane polymer film”, autori: J. Aleksejeva, A. Gerbreders, U. Gertners, M. Reinfelds, J. Teteris. Abstract book: International Conference Functional materials and nanotechnologies 2011, Riga, Latvia, p. 108.
 18. International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, August 15-20, 2010, Budapest, Hungary. Stenda referāts “Ultraviolet holographic recording in photopolymers”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris. Abstract book International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA-2010), 2010, Budapest, Hungary, p. 124.
 19. Developments in Optics and Communications, 23-25 April, 2010, Riga, Latvia. Mutiskais referāts „Holographic recording in organic polymers by UV laser light”, Abstract book Developments in Optics and Communications, 2010, Riga, Latvia, p.47.
 20. Developments in Optics and Communications, 24-26 April, 2009, Riga, Latvia. Mutiskais referāts „Volume grating recording in acrylate based photopolymers”, Abstract book Developments in Optics and Communications 2009, Riga, Latvia p.51.
 21. 16th International Symposium on Non oxide and New Optical Glasses, Montpellier, France, 2008; Stenda referāts “Surface-relief grating formation on organic and inorganic polymer films by UV holography”, autori: J. Aleksejeva, E. Laizane, I.Muzikante, J. Teteris. Abstract Book 16-th International Symposium on Non-Oxide and New Optical Glasses (ISNOG-2008), Montpellier, France, 2008, P56.

Vietējas konferences:

1. LU CFI 33. zinātniskā konference, 2017. g. 22 – 24 Februāris, Rīga, Latvija. Mutiskais referāts: „Fotoinducētu procesu izpēte azo-epoksīdu savienojumos”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris; Tēžu grāmata: Abstracts of the 33th Scientific Conference, 2016, Riga, Latvia, lpp. 8.
2. LU CFI 32. zinātniskā konference, 2016. g. 17 – 19 Februāris, Rīga, Latvija. Mutiskais referāts: „Tiešā ieraksta fotorezista izstrāde uz epoksīda polimēra bāzes”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris; Tēžu grāmata: Abstracts of the 32th Scientific Conference, 2016, Riga, Latvia, lpp. 24.
3. LU CFI 30. zinātniskā konference, 2014. g. 19 – 21 Februāris, Rīga, Latvija. Mutiskais referāts: „Virsmas reljefa veidošanās azo-savienojumos”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris; Tēžu grāmata: Abstracts of the 30th Scientific Conference, 2014, Riga, Latvia, lpp. 101.
4. LU CFI 29. zinātniskā konference, 2013. g. 20 – 22 Februāris, Rīga, Latvija. Mutiskais referāts: „Fotoinducēti procesi azo-krāsvielas saturošajos organiskajos polimēros”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris; Tēžu grāmata: Abstracts of the 29th Scientific Conference, 2013, Riga, Latvia, lpp. 14.
5. LU CFI 28. zinātniskā konference, 2012. g. 8-10 Februāris, Rīga, Latvija. Mutiskais referāts: „Fotoinducēti procesi azo-krāsvielu un bezūdens želaīna kārtiņās”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris; Tēžu grāmata: Abstracts of the 28th Scientific Conference, 2012, Riga, Latvia, lpp. 36.
6. LU CFI 26. zinātniskā konference. 2011. g. februāris 14.-16. februāris, Rīga; Mutiskais referāts „Vektorhologrammu ieraksts organiskajos azo-polimēros”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris. 27. zinātniskās konferences tēzes, LU CFI, Rīga, lpp.87.
7. LU CFI 26. zinātniskā konference. 2010. g. februāris 17.-19. februāris, Rīga; ar mutisko referātu „Hologrāfiskais ieraksts UV fotopolimēros”, autori: J. Aleksejeva, J. Teteris. 26.zinātniskās konferences tēzes, LU CFI, Rīga, lpp.21.
8. LU CFI 25. zinātniskā konference. 2009. g. februāris 11.-13. februāris, Rīga; mutiskais referāts „Hologrāfiskais ieraksts organisko polimēru plānās kārtiņās UV diapazonā”, autori: J.Aleksejeva, A. Gerbreders, J. Teteris. 25. zinātniskās konferences tēzes, LU CFI, Rīga, 2009.
9. LU CFI 24. zinātniskā konference. 2008. g. februāris 20.-22. februāris, Rīga; mutiskais referāts „Virsmas reljefa veidošanās organiskos un neorganiskos polimēros ar UV hologrāfiju”, autori: J.Aleksejeva, J. Teteris, E. Laizāne. 24. zinātniskās konferences tēzes, LU CFI, Rīga, 2008, lpp. 50.
10. LU CFI 23. zinātniskā konference. 2007. g. februāris 13.-15. februāris, Rīga; postera referāts „Hologrammu pašpastiprināšanās As-S-Se kārtiņās”, autori: J. Aleksejeva, M. Reinfelde, J. Teteris. 23. zinātniskās konferences tēzes, LU CFI, Rīga, 2007.

Pateicības

Vēlos pateikt paldies savam darba vadītājam Jānim Teterim par man veltīto laiku, sniegtām zināšanām un uzmundrinājumu promocijas darba rakstīšanas laikā. Tāpat sirsnīgs paldies esošiem un bijušiem kolēģiem – Mārai Reinfeldei, Andrejam Gerbrederam, Kristai un Elīnai, par diskusijām, kopīgiem mērījumiem, atbalstu.

Paldies arī vīram un ģimenei, par atbalstu un ticību manī.

Paldies par finansiālo atbalstu L'OREAL Latvijas stipendijai “Sievietēm zinātnē” ar UNESCO Latvijas Nacionālās komisijas un Latvijas zinātņu akadēmijas atbalstu, ESF, ERAF, LU CFI.

