

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un Lietišķās Ķīmijas fakultāte
Tehniskās fizikas institūts

Dmitrijs SAHAROVŠ
Doktora studiju programmas „Materiālzinātne” doktorants

**DINAMISKĀS HOLOGRAMMAS AMORFAJOS PUSVADĪTĀJOS UN
AZOBENZOLA OLIGOMĒROS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs:
Dr.habil.phys., profesors
Andris Ozols

Rīga 2012

Saharovs D. Dinamiskās hologrammas amorfajos pusvadītājos un azobenzola oligomēros. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga, 2012. – 44 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes RTU-P-18 2011. gada 25. maija lēmumu, protokols Nr. 2.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS FIZIKAS DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS
TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs fizikas doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012. gada 15. februārī Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē, Āzenes ielā 14/24, 272. auditorijā plkst. 15:00.

OFICIĀLIE OPONENTI

Asociētais profesors, Dr.phys. Juris Blūms
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr.phys. Valfrīds Paškevičs
Daugavpils Universitāte

Dr.phys. Jānis Teteris
Optiskā ieraksta laboratorijas vadītājs,
Cietvielas Fizikas institūts,
Latvijas Universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē fizikas doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Dmitrijs Saharovs

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tas sastāv no ievada, 12 nodaļām un nobeiguma ar secinājumiem, satur 154 lappuses ar 71 attēliem un 12 tabulām. Pirmās sešas ir apskata nodaļas. Literatūras sarakstā ir 173 nosaukumi.

Satura radītājs

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Ievads.....	5
Darba mērķis.....	5
Darba uzdevumi.....	6
Pētījumu metodika.....	6
Darba zinātniskās novitātes.....	6
Aizstāvamās tēzes.....	7
Darba praktiskā vērtība.....	7
Aprobācija.....	7
DARBA SATURS.....	11
1. Dinamiskie hologrāfiskie režģi.....	11
2. Četru viļņu mijiedarbe un viļņu frontes inversija.....	13
3. Lāzerstaru fokusēšana.....	13
4. Amorfie halkogenīdu pusvadītāji.....	14
5. Azobenzola savienojumi.....	15
6. Virsmas reljefa hologrammu ieraksts azobenzola savienojumos un amorfajos pusvadītājos.....	17
7. Paraugi un pētījumu metodika.....	19
8. Fokusētu un nefokusētu hologrāfisko režģu ieraksts a-as ₂ s ₃ kārtiņās pie 633 nm.....	24
9. Četru viļņu mijiedarbe a-As ₂ A ₃ un azobenzola oligomēru kārtiņās.....	25
10. Azobenzola oligomēru hologrāfisko īpašību atkarība no hromoforu grupu piesaistes matricai un no to koncentrācijas.....	27
11. Virsmas reljefa hologrammu ieraksts azobenzola savienojumos.....	31
12. Stilbēna azobenzola savienojumu relaksācijas īpatnības.....	35
Secinājumi.....	37
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	40

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Ievads

Šajā darbā uzmanība tika pievērsta divām perspektīvām optisko reģistrējošo materiālu klasēm – amorfajiem halkogenīdu pusvadītājiem un azobenzola savienojumiem.

Hologrammu ieraksts amorfajos halkogenīdu pusvadītājos ar gaismu, kuras fotonu enerģija ($h\nu$) ir mazāka par aizliegtas zonas platumu E_g (jeb, ērtāk teikt, ar zemspraugas starojumu) ir interesanta kā no teorētiskā, tā arī no praktiskā viedokļa. Tiek izmantota spektra daļa, kur absorbcija nav liela, un tāpēc ieraksts notiek arī parauga dziļumā nevis tikai virsmas slānī.

Organiskie materiāli tiek intensīvi pētīti kā ieraksta materiāli hologrāfijai tāpēc, ka to īpašības var mainīt plāšākās robežās, ja salīdzina ar neorganiskiem materiāliem. Azosavienojumi ir viena no efektīvākām vielu grupām hologrāfiskajām ierakstam.

Azobenzola savienojumiem piemīt interesanta un praktiski noderīga īpašība – fotoizomerizācija. *Trans*- un *cis*- izomēru molekulām atšķiras absorbcijas spektri un molekulu izmēri (tas ved pie molekulas elektriskā dipola momenta izmaiņām). Ieraksta mehānisms šajos materiālos ar sarkano gaismu, spektra daļā, kur ir zema absorbcija, nav pilnīgi skaidrs, tas radīja motivāciju pētīt šo jautājumu.

Teorētisko interesi rada neskaidrie mikroskopiskie virsmas reljefa režģu formēšanas procesi atkarībā no materiāla struktūras un ierakstoša starojuma parametriem. Tiek piedāvāti dažādi mehānismi, kuri ļauj izskaidrot iegūtus rezultātus, bet virsmas režģa formēšana vēl nav pilnīgi skaidra. Praktiskā interese ir iespēja tieši (bez kodināšanas vai attīstīšanas) ierakstīt efektīvus virsmas režģus azopolimēros, kas padara iespēju izgatavot virsmas reljefa hologrāfiskus optiskus elementus, tādus kā režģi ar periodu, mazāku par gaismas viļņa garumu, viļņu plāksnītes, pretatstarošanās pārklājumi, komutācijas ierīces gaismas viļņvadiem u.t.t. [18, 52].

Darba mērķis

Eksperimentāli izpētīt elementāro dinamisko hologrammu – hologrāfisko režģu ierakstu $a\text{-As}_2\text{S}_3$ amorfās halkogenīdu kārtiņās un azobenzola savienojumu kārtiņās, kas pieder divām atšķirīgām materiālu klasēm – neorganiskiem un organiskiem materiāliem, spektra sarkanajā daļā, noskaidrot ieraksta raksturlielumus un ieraksta procesus, veikt to salīdzināšanu, kā arī novērtēt praktiskās izmantošanas iespējas.

Darba uzdevumi

1. Izpētīt hologrāfisko ierakstu a-As₂S₃ kārtiņās ar fokusētu un nefokusētu He-Ne lāzera 633 nm gaismu.
2. Izpētīt hologrāfisko ierakstu dažādu azobenzola savienojumu kārtiņās ar He-Ne lāzera 633 nm gaismu.
3. Eksperimentāli noskaidrot sarežģītāka veida hologrāfiskā ieraksta – fokusētas četrvilņu mijiedarbes realizācijas iespējas a-As₂S₃ un azobenzola savienojumu kārtiņās, veikt to salīdzinājumu.
4. Eksperimentāli noskaidrot ieraksta efektivitātes atkarību no hromoforu koncentrācijas un to piesaistes veida matricai azobenzola savienojumos.
5. Noskaidrot virsmas reljefa hologrammu ieraksta iespējas abās materiālu klasēs ar sarkano gaismu.
6. Veikt pētīto materiālu salīdzināšanu kā pēc izdarīto eksperimentu datiem, tā arī literatūras kontekstā.

Pētījumu metodika

Promocijas darbā tika izmantotas sekojošās pētījumu metodes.

1. Elementāro hologrammu ieraksts ar paralelograma shēmu, izmantojot arī fokusētu gaismu un mainot periodu.
2. Ieraksts četru vilņu mijiedarbes ģeometrijā.
3. Virsmas reljefa pētīšana ar atomspēka mikroskopu pirms un pēc ieraksta.
4. Absorbcijas spektru mērījumi.
5. Kārtiņu optisko raksturlielumu – caurlaidības un atstarošanas koeficientu – mērījumi, izmaiņu pētīšana.
6. Tēmai atbilstošas literatūras analīze.
7. Teorētiskie aprēķini.

Darba zinātniskās novitātes

1. Ir realizēts efektīvs hologrammu ieraksts ar fokusētu zemspraugas ($h\nu=1,96$ eV) sarkano gaismu a-As₂S₃ kārtiņās un ka šī ieraksta īpašības atšķiras no spraugas gaismas ieraksta un no zemspraugas nefokusēta ieraksta īpašībām, likti priekšā zemspraugas ieraksta mehānismi.
2. Noskaidrota azobenzola savienojumu hologrāfiskās efektivitātes atkarība no hromoforu piesaistes veida matricai un to koncentrācijas.
3. Eksperimentāli pierādīta efektīva virsmas reljefa režģu ieraksta iespēja ar sarkano lāzeru ($\lambda=632,8$ nm) stilbēna azobenzola savienojumos, kas norāda uz *trans-cis* fotoizomerizācijas iespēju.
4. Noskaidrots, ka hologrāfiskā ieraksta efektivitāte stilbēna azosavienojumos ir nemonotona parauga vecuma funkcija.

Aizstāvamās tēzes

1. Eksperimentāli pierādīts, ka zemspraugas gaismas ($h\nu < E_g$) dinamisko hologrammu ieraksts a-As₂S₃ kārtiņās pēc fizikālajām īpašībām būtiski atšķiras no (virs)spraugas gaismas ($h\nu \geq E_g$) ieraksta.
2. Fokusēts zemspraugas gaismas hologrammu ieraksts a-As₂S₃ kārtiņās ir efektīvāks (t.i., ar ievērojami lielāku difrakcijas efektivitāti un daudz mazāku ieraksta enerģiju) nekā nefokusēts ieraksts. Atšķiras arī ieraksta mehānismi.
3. Kovalenta hromoforu grupu piesaiste matricai azobenzola oligomēros vispār ir efektīvāka par to disperģēšanu, tomēr azobenzola oligomēru kārtiņas ar pietiekoši lielu disperģētu hromoforu grupu koncentrāciju var būt gandrīz tikpat efektīvas hologrāfiskajām ierakstam.
4. Savienojumos, kur dialkilaminazobenzola hromoforu grupas ir disperģētas polistirola matricā, eksistē hromoforu koncentrācijas sliexnsis materiālā (starp 0,01 un 0,04 mol/l), zem kura ieraksts nav novērots.
5. Ir iespējama efektīva (ar amplitūdu 113 nm) virsmas režģa veidošana ar sarkano ($\lambda=632,8$ nm) gaismu stilbēna azobenzola savienojumos.

Darba praktiskā vērtība

Darba praktisko vērtību nosaka tā izpildes gaitā iegūtā informācija. Tā ļauj secināt, ka fokusētu ierakstu a-As₂S₃ kārtiņās var izmantot ilglaicīgu tilpuma hologrāfisko elementu – režģu, difraktīvo lēcu, viļņvadu un kombinēto optisko elementu izgatavošanai, kā arī ilglaicīgai optiskās informācijas glabāšanai. Virsmas reljefa difraktīvo optisko elementu izgatavošanai ar sarkano gaismu var tikt izmantoti stilbēna azosavienojumi, turklāt to priekšrocība salīdzinājumā ar parastajām litogrāfiskajām šādu elementu izgatavošanas metodēm ir tā, ka nav nepieciešama kodināšana. Darbā iegūtie rezultāti ļauj efektīvāk turpināt jaunu optisko gaismasjūtīgo materiālu meklējumus.

Aprobācija

Promocijas darba saturs ir atspoguļots sekojošās publikācijās:

1. Ozols A., Saharovs Dm., Reinfelds M. Holographic recording in amorphous As₂S₃ films at 633 nm// Journal of Non-Crystalline Solids. – 2006. - Volume 352. – pp. 2652-2656.
2. Saharov Dm., Ozols A., Kampars V., Kokars V., Kreicberga J., Ratyeva S. Influence of chromophore group concentration on the holographic properties of spin-coated azobenzene oligomers// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2006. – Volume 2. – pp. 59-65.
3. Saharov D., Ozols A., Kampars V., Kokars V., Kreicberga J., Ratyeva S. Effect of bonding type and concentration of chromophore groups on the holographic

- properties of azobenzene oligomers// Scientific Proceedings of Riga Technical University. Series: Material Science and Applied Chemistry. – Rīga: RTU, 2006. – Volume 12. – pp. 45-55.
4. Saharov D., Ozols A. Focused four-wave mixing in a-As₂S₃ and azobenzene oligomer films. Scientific Proceedings of Riga Technical University. Series: Material Science and Applied Chemistry. – Rīga: RTU, 2006. – Volume 13. – pp. 34-41.
 5. Ozols A., Saharov Dm., Kampars V., Kokars V., Kreicberga J. Ratyeva S. Holographic properties of azobenzene oligomers with differently bonded chromophore groups// Physica Status Solidi (c). – 2007. – Volume 4. – pp. 1360-1363.
 6. Ozols A., Saharov D. Sub-bandgap light hologram recording in amorphous chalcogenides// Proceedings of SPIE. – 2007. – Volume 6596. – pp. 65961C-65966C.
 7. Saharov D., Ozols A., Kokars V., Kampars V., Mezinskis G., Maleckis A., Pludons A. Jansone M. Relaxation effect of stilbene azobenzene derivatives on their holographic properties// Journal of Physics: Conference Series. – Rīga: RTU, 2007. – Volume 93. – p. 012029.
 8. Kokars V., Maleckis A., Saharov D., Ozols A., Kampars V. Synthesis and holographic efficiency of the derivatives of 3-[4-[bis-(2-hydroxyethyl) amino]phenyl]-2-{4-(4-nitrophenylazo)phenyl]acrylonitrile// Organic Chemistry. Proceedings of Scientific Conference, dedicated to the 85th anniversary of the Department of Organic Chemistry Kaunas University of Technology. – Kaunas: Technologija, 2007. – pp. 30-32.
 9. Saharov D., Ozols A., Kokars V., Kampars V., Mezinskis G., Maleckis A., Pludons A., Rutkis M. The *trans-cis* photoisomerization possibility of stilbene azocompounds by red light of He-Ne laser// Scientific Proceedings of Riga Technical University. Series: Material Science and Applied Chemistry. – Rīga: RTU, 2008. – Volume 18. – pp. 26-34.
 10. Ozols A., Reinfelds M., Saharov Dm., Kundzins K., Kampars V., Kokars V. Holographic recording of surface relief gratings in tolyle-based azobenzene oligomers// Thin Solid Films. – 2008. – Volume 516. – pp. 8887-8892.
 11. Saharov D., Ozols A. DFWM of focused laser beams in a-As₂S₃ and azobenzene oligomer films// Journal of Material Science: Materials in Electronics. – 2009. – Volume 20. – pp. S395-S399.
 12. Ozols A., Saharov D., Kokars V., Kampars V., Maleckis A., Mezinskis G., Pludons A. Holographic recording of surface relief gratings in stilbene azobenzene derivatives at 633 nm// Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – Volume 249. – p. 012055.

Promocijas darba rezultāti ir ziņoti sekojošās konferencēs:

1. 21. zinātniskā konference, veltīta Starptautiskajam Fizikas gadam, 2005. gada 7.-9. februārī, Rīga, Latvija. (Saharovs D., Ozols A., Reinfelds M.

- Hologrāfiskais ieraksts amorfās As_2S_3 kārtiņās ar He-Ne lāzeru// Referātu tēzes, 51. lpp.)
2. International Student Conference „Developments in Optics and Photonics“, April 30 – May 1, 2005, Riga, Latvia. (Saharovs D., Ozols A., Kampars V., Kokars V., Kreicberga J., Ratyeva S., Ozols A., Reinfelds M. Holographic recording in azobenzene oligomers// Abstracts, p. 30.)
 3. 1st Conference on Advances in Optical Materials, October 12 – 15, 2005, Tucson, Arizona, USA. (Ozols A., Saharovs D., Reinfelds M. Holographic recording in amorphous As_2S_3 films at 633 nm// Abstracts, p.47.)
 4. 2nd Latvian Conference „Functional Materials and Nanotechnologies“, March 27 – 28, 2006, Riga, Latvia. (Saharov D., Ozols A., Kampars V., Kokars V., Kreicberga J., Ratyeva S. Effect of chromophore group concentration on the holographic properties of spin-coated azobenzene oligomers// Abstracts, PO – 30, p. 64.)
 5. 10th Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials, July 10 – 14, 2006, Milano, Italy. (Ozols A., Saharov D., Kampars V., Kokars V., Kreicberga J., Ratyeva S. Holographic properties of azobenzene oligomers with differently bonded chromophore groups// Abstracts, p. 317.)
 6. 10th European Conference on Organised Films, August 20 – 24, 2006, Riga, Latvia. (Ozols A., Reinfelds M., Saharov D., Kundzins K., Kampars V., Kokars V. Holographic recording of surface relief gratings in tolyle-based azobenzene oligomers// Abstracts, p. 72.)
 7. 5th International Conference „Advanced Optical Materials and Devices“, August 27 – 30, 2006, Vilnius, Lithuania (Ozols A., Saharov D. Sub-bandgap light holographic recording in amorphous chalcogenides. Abstracts, p.101.)
 8. Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūta 23. zinātniskā konference, veltīta LU profesora Ilmāra Vītola 75 gadu atcerei, 2007. gada 13. – 15. februāris, Rīga, Latvija. (Saharovs D., Ozols A., Kokars V., Kampars V., Maļeckis A., Jansone M. Stilbēna azobenzola atvasinājumu hologrāfiskā efektivitāte// Referātu tēzes, 43. lpp.)
 9. International Baltic Sea Region Conference „Functional Materials and Nanotechnologies 2007“, April 1 – 4, 2007, Riga, Latvia. (Saharov D., Ozols A., Kokars V., Kampars V., Mezinskis G., Maleckis A., Pludons A., Jansone M. Relaxation effect of stilbene azobenzene derivatives on their holographic properties// Abstracts, p. 48.)
 10. International Conference on Optical and Photonic Materials and Applications, July 30 – August 3, 2007, London, UK. (Saharov D., Ozols A. DFWM of focused laser beams in a- As_2S_3 and azobenzene oligomer films// Abstracts, p. PO49.)
 11. International Baltic Sea Region Conference „Functional Materials and Nanotechnologies 2008“, April 1 - 4, 2008, Riga, Latvia (Ozols A., Saharov D., Kokars V., Kampars V., Mezinskis G., Maleckis A., Pludons A., Rutkis M. Spectroscopic studies of the red light surface relief grating recording in stilbene azobenzene derivatives// Abstracts, p.71.)

12.16th International Conference on Defects in Insulating Materials ICDIM-2008, August 24 – 29, 2008, Aracaju, SE, Brazil. (Ozols A., Saharov D., Kokars V., Kampars V., Maleckis A., Mezinskis G., Pludons A. Holographic recording of surface relief gratings in stilbene azobenzene derivatives at 633 nm// Abstracts, p. A021.)

DARBA SATURS

Pirmajā nodaļā tiek aprakstīti hologrāfijas pamati, hologrammu veidošanas principi, dota elementāro hologrammu klasifikācija. Aprakstīti hologrāfisku materiālu un režģu galvenie raksturlielumi. Izklāstīti teorētiskie pamati plāno, biezo un virsmas reljefa režģu veidošanas procesiem.

Lai ierakstītu hologrāfisku režģi, izmanto divus koherentus starus. Tos izvieto savstarpēji tā, lai tie interferētu. Pārsvarā izmanto vienmodas (TEM_{00}) lāzerstarus, kuri ir tuvāki ideālam plakanam vilnim un šo staru interference vispārīgā gadījumā izraisa telpiski periodisku gaismas intensitātes un polarizācijas sadalījumu, kas atbilstoši maina gaismasjutīga materiāla optiskās īpašības, kad šis materiāls tiek ievietots interferences apgabalā. Materiāla optisko parametru telpiskā modulācija nozīme difrakcijas režģa fotoinducētu izveidi.

Klasifikācijas mērķis ir dot priekšstatu par dažāda tipa hologrammu galvenajām īpašībām. Hologrammām, kuras atšķiras ar vienu parametru, var būt pilnīgi atšķirīgas īpašības. Tā kā tagad nav kopējas vispārpieņemtās hologrammas klasifikācijas, dotajā darbā ir veikts mēģinājums sadalīt elementāro hologrammu kopu pa tiem un dot tiem definīcijas. Par elementāru tiek uzskatīta hologramma, kura veidojas divu plakānu vai sfērisku viļņu interferences rezultātā. Ir jāatzīmē, ka šī klasifikācija ir nosacīta un hologrammu tipi var būt jaukti. Elementāro hologrammu klasifikācija ir dota 1. tabulā.

Hologrāfisku materiālu un režģu raksturlielumu svarīgums ir nosacīts un atkarīgs no pielietojuma. Galvenais hologrāfiskā režģa parametrs ir difrakcijas efektivitāte:

$$\eta_m = \frac{P_m}{P}, \quad (1)$$

kur η ir difrakcijas efektivitāte, m ir difrakcijas kārtā un $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, P_m – gaismas jauda, kura difrāģēja m -tajā kārtā, P – nolasoša stara jauda. Parasti difrakcijas efektivitāti izteic procentos un nosaka pirmajā kārtā. Svarīgi parametri ir režģa periods, telpiskā frekvence un materiāla telpiskā izšķirtspēja, ko nosaka minimālais režģa periods ar akceptējamu difrakcijas efektivitāti. Par gaismasjutīguma kritērijiem fotogrāfijā izmanto nomelnojuma līknes parametrus. Nomelnojuma līkne ir optiska blīvuma funkcija no ekspozīcijas. Šādi kritēriji der tikai amplitūdas vidēm. Savukārt hologrāfiskie gaismasjutības kritēriji ir universāli. Difrakcijas efektivitātes atkarība no ekspozīcijas laika var būt sarežģīta, tāpēc tiek izmantoti vairāki materiāla gaismasjutības kritēriji, no kuriem galvenais ir īpatnēja ieraksta enerģija [56]. Visbiežāk lieto īpatnējo ieraksta enerģiju, kura atbilst maksimālajai difrakcijas efektivitātei (sk. formulu (7)).

Hologrammā notiek nolasošā stara difrakcija. Tās veidu nosaka reģistrējošas vides parametri (biezums, laušanas koeficients u. c.) un hologrammas raksturlielumi (periods, viļņa skaitlis, u. t. t.). Ja gaismas izplatīšanas hologrammā

var aprakstīt ar ģeometriskās optikas likumiem, runā par Ramana-Nata difrakciju (t. s. transparenta tuvinājums). Ja notiek dažādas kārtas difragēto viļņu mijiedarbe hologrammā, tad runā par Brega difrakciju.

1. tabula

Elementāro hologrammu klasifikācija

	Kritērijs	Pazīme	Tipa nosaukums
1	Ierakstāmās interferences ainas veids reģistrējošā materiālā	Dažādu rādiusu sfērisku viļņu interference, interferences aina atbilst Frenela zonu plāksnītei.	Frenela
		Vienādu rādiusu sfērisku viļņu vai plakānu viļņu frontu interference. Interferences aina ir sinusoidāls režģis no taisnām līnijām.	Furjē
2	Hologrammas modulētie nolasošā gaismas viļņa parametri	Amplitūda	Amplitūdas
		Fāze	Fāzes
3	Ierakstošo staru izvietojums attiecībā pret reģistrējošo vidi.	Atbalsta un priekšmeta stari ir vērsti no vienas puses	Caurleidības
		Atbalsta un priekšmeta stari ir vērsti no pretējām pusēm	Atstarošanas
4	Difrakcijas veids hologrammā	Ramana-Nata difrakcija	Plāna
		Brega difrakcija	Tilpuma
5	Reģistrējamo parametru izmaiņas nolases laikā	Nemainās	Stacionāra
		Mainās	Dinamiska
6	Ierakstošo viļņu polarizācijas modulācijas izmantošana ierakstam	Neizmanto, paralēlas ierakstošo viļņu polarizācijas	Skalāra
		Izmanto, ortogonālas ierakstošo viļņu polarizācijas	Vektoriāla (Polarizācijas)

Svarīgi ir parametri, kuri ļauj atšķirt plānus režģus no bieziem. Šim nolūkam bieži izmanto Kleina kritēriju [14]

$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{n_0 \Lambda^2}, \quad (2)$$

kur d ir hologrammas absolūtais biezums garuma vienībās, λ ir nolasoša stara viļņa garums, n_0 ir vidējais reģistrējoša materiāla laušanas koeficients, Λ ir režģa periods. $Q < 1$ atbilst plānam režģim un Ramana-Nata difrakcijas režīmam, $Q > 10$ atbilst biežam režģim un Brega difrakcijas režīmam.

Otrajā nodaļā tiek aplūkota deģeneratīvā četru viļņu mijiedarbe un viļņu frontes inversija, doti teorētiskie skaidrojumi ar režģiem un nelineāro polarizāciju, aplūkoti galvenie lietojumi.

Četru viļņu mijiedarbe ir četru viļņu ar frekvencēm $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ un izplatīšanas virzieniem $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4$ mijiedarbe nelineārā vidē [5]. Ja krītošo staru frekvences ir vienādas $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4$ un viļņu vektori ir savstarpēji antiparalēli $\vec{k}_1 = -\vec{k}_2, \vec{k}_3 = -\vec{k}_4$, tad tā ir deģeneratīvā četru viļņu mijiedarbe. Deģeneratīva četru viļņu mijiedarbe var radīt fāzes konjugāciju, kas ir derīga optiska signāla kropļojumu kompensācijai, jo ar tās palīdzību var izveidot fāzes konjugācijas spoguļi, kas invertē viļņa fronti.

Četru viļņu mijiedarbe ne tikai ļauj invertēt viļņu fronti, bet arī veikt signālu (piemēram, attēlu) pastiprināšanu.

Trešajā nodaļā tiek aprakstīts lāzera stara fokusēšanas process un to aprakstošās kvantitatīvās sakarības. Aplūkota aberāciju ietekme, optiskas sistēmas fokusēšanas robeža.

Jebkurai optiskai sistēmai eksistē galīga fokusēšanas robeža, ko nosaka difrakcija. To sauc par difrakcijas robežu. Difrakcijas robeža nosaka fokusēta gaismas staru kūļa šķērsriezuma minimālo laukumu un maksimālo intensitāti. Staru kūli ar minimāliem izmēriem var izveidot fokusējot kūli, kurā jaudas sadalījums šķērsriezuma plaknē pakļaujas Gausa likumam. Tādā kūlī relatīvais intensitātes sadalījums šķērsriezumā nemainās atkarībā no attāluma no iežmaugas lāzera rezonatorā, ka arī Gausa kūļos viļņa fāze ir vienāda visos šķērsriezuma punktos.

Fokusējošo sistēmu īpašības stipri pasliktina lēcas aberācijas. Monohromatiskam kolimētam lāzerstaram, kas izplatās lēcas ass virzienā, vislielāko kropļojumu ienes sfēriskā aberācija. Sfēriskā aberācija ved pie tā, ka stari no punktveida avota krīt uz lēcu dažādos attālumos no lēcas ass un nesaiet fokusā kopā vienā punktā. Rezultātā punkta attēls izskatās, kā aplis ar neskaidrām robežām.

Ceturtajā nodaļā tiek aprakstītas amorfo halkogenīdu pusvadītāju struktūra un optiskās īpašības, fotoinducētie procesi tajos un hologrāfiskā ieraksta mehānismi amorfo pusvadītāju kārtiņās.

Amorfais stāvoklis ir ciets vielas stāvoklis, kam piemīt mehānisku, elektrisku, optisku u. c. īpašību izotropija un kam nav noteiktas kušanas temperatūras. Tas ir nosacīts ar tālās kārtības neesību. Amorfām vielām ir tuvā kārtība, kura eksistē molekulu mēroga attālumos (pirmā koordinācijas sfēra) [60].

Hologrammu ierakstam galvenokārt izmanto amorfos halkogenīdu pusvadītājus As_2S_3 vai As_2Se_3 ar halogenīdu, telūra, selēna vai sudraba piejaukumiem.

Halkogenīdu pusvadītājiem ir elektronu vadītspēja, tās lielums $10^{-13} - 10^{-16} \Omega^{-1} m^{-1}$. Šie stikli var sastāvēt no divām, trim vai vairākām komponentēm. Amorfiem pusvadītājiem atšķirībā no kristāliskajiem ir lielāks optiskās caurlaidības diapazons (aptuveni no 1 līdz 25 μm). To caurspīdības maksimums atrodas infrasarkanajā diapazonā [57].

Hologrāfiskā ieraksta veikšanai amorfos pusvadītājos izmanto fāžu pārejas. Divu fāžu (piemēram, amorfas un kristāliskas) īpašības stipri atšķiras un tādēļ tās var izmantot informācijas ierakstam, pie tam ar ļoti augstu signāls/troksnis attiecību.

Optiskajam ierakstam izmanto sešas metodes [63].

- 1) Amorfas vielas kristalizācija.
- 2) Kristāla termoamorfizācija.
- 3) Fotoķīmiskās pārvērtības sistēmā halkogenīds – metāls.
- 4) Ieraksts “amorfā fāze 1 – amorfā fāze 2”.
- 5) Amorfas vielas iztvaicēšana.
- 6) Kārtiņu fotoelektroķīmiskā kodināšana.

Pirmie četri veidi ir reversīvi (atgriezeniski). Ar tiem iespējams vairākkārtīgs ieraksts un dzēšana. Hologrāfiskā ieraksta veikšanai galvenokārt izmanto dažādus fotofizikālus procesus pusvadītāju amorfā fāzē (bez pārejas uz kristālisko fāzi).

Ir zināmi daži fotojutības mehānismi, kuri var tikt izmantoti hologrāfiskajam ierakstam. Tie ir fotoinducētas struktūras izmaiņas, relaksācijas struktūras izmaiņas, lokalizēto stāvokļu pārlādēšanas, fotoinducēta anizotropija [25, 27].

Galvenais ieraksta mehānisms stabilam hologrāfiskajam ierakstam halkogenīgu amorfo pusvadītāju kārtiņās ir fotoinducētas struktūras izmaiņas. Ir zināms, ka tas ir metastabilas atomu nobīdes fotoinducētas ķīmisko saišu saraušanas dēļ [40, 27]. Tās nobīdes ir iespējamās tāpēc, ka atomu režģis nav tik „ciets” kā kristālam. Tam ir relatīvi mazs koordinācijas skaitlis Z . Atomu struktūras elastīguma nosacījums ir $Z < 2,40 \pm 0,06$ [17]. a- As_2S_3 kārtiņai $Z = 2,4$ [50].

Par zemspraugas gaismu sauc starojumu, kura fotonu enerģijas atbilst izteiksmei:

$$h\nu < E_g, \quad (3)$$

kur h ir Planka konstante, ν ir starojuma frekvence un E_g ir aizliegtas zonas platums dotajai vielai.

Ierakstu ar zemspraugu gaismu var izskaidrot, izmantojot trīs mehānismus: fotostimulētas relaksācijas struktūras izmaiņas, D-centru fotoinducēta pārlādēšana un D-centru fotoinducēta reorientācija [31]. D-centru koncepciju tika ievada Mots un Deviss [19]. As_2S_3 plēvēs D^0 -centri atbilst s_1^0 vai s_3^0 atomiem, D^+ -centri atbilst s_3^+ atomiem un D^- -centri atbilst s_1^- atomiem, kur apakšējie indeksi ir koordinācijas skaitļi un augšējie ir lādiņa stāvokļi. Sēra atomu defekti galvenokārt tiek izraisīti ar zemspraugas gaismu, kura ved pie van der Vaalsa saišu saraušanas.

Piektā nodaļa veltīta azobenzola savienojumiem. Īsumā tiek izklāstītas organisko savienojumu īpašības, organisko polimēru un oligomēru struktūra. Aprakstīti fotoinducētie procesi organiskajos materiālos, elektronu donoru un akceptoru grupu nozīme azosavienojumos. Aplūkota *trans-cis* fotoizomerizācija azobenzola savienojumos.

Organisko savienojumu daudzveidība ir saistīta ar oglekļa specifiskām īpašībām, salīdzinot ar citiem ķīmiskiem elementiem. Ogleklis ir spējīgs savienoties ar lielāko daļu citu elementu. Šī īpašība ir saistīta ar tā gandrīz elektroneitrālo raksturu un spēju veidot kovalentas saites. Oglekļa atomi arī ir spējīgi savienoties sava starpā, veidojot dažādas oglekļa ķēdes. Šī īpašība piemīt arī dažiem citiem elementiem, bet tie var veidot ķēdes tikai ar nelielu locekļu skaitu [20, 51].

Polimēri ir dabiskie un sintētiskie savienojumi, kuru molekulas sastāv no liela ($10^2 - 10^3$) atkārtotošo atomu grupu skaita, kas tiek savienotas sava starpā un veido garas lineāras vai sazarotas ķēdes [59].

Pozīciju starp mazmolekulāriem savienojumiem un polimēriem aizņem vielas, kurus sauc par oligomēriem [59]. Tām piemīt īpašības, kas ir raksturīgas gan monomēriem, gan polimēriem. Ķēžu locekļu skaits oligomēriem nav liels: no dažiem līdz dažiem simtiem.

Fotoinducētie procesi organiskajos materiālos ir daudzveidīgāki nekā neorganiskajos un tiek saistīti ar sekojošiem procesiem:

- a) elektronu fotopārnesē,
- b) protonu fotopārnesē,
- c) *trans-cis* fotoizomerizācija,
- d) π – un σ – saišu pārdale,
- e) molekulāro fragmentu fotopārgrupēšana
- f) saišu saraušana,
- h) dimerizācijas un polimerizācijas reakcijas [40, 62].

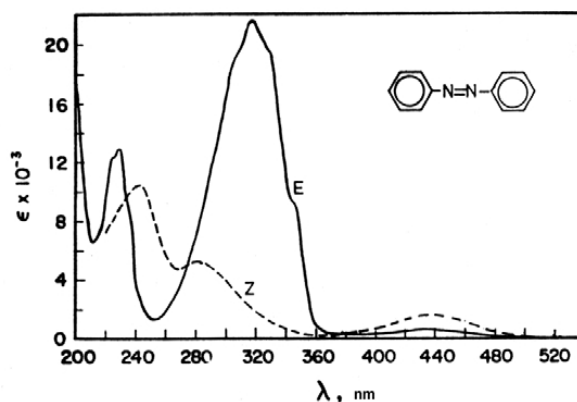
Par azosavienojumu sauc organisko savienojumu, kura sastāvā ir divu slāpekļa atomu grupa, kuri ir savienoti ar dubultsaiti un no kuriem katrs ir saistīts ar citām molekulas daļām ar C-N saiti [61]. Piemēram, azometāns $\text{CH}_3 - \text{N} = \text{N} - \text{CH}_3$ vai aromātiskais azosavienojums azobenzols $\text{C}_6\text{H}_5 - \text{N} = \text{N} - \text{C}_6\text{H}_5$.

Saišu konjugācija ir viens no svarīgākajiem atomu un saišu iekšmolekulāriem mijiedarbes veidiem. Tās pamatā ir atomu elektronu orbitālu pārklāšanās. Konjugācijas galvenā pazīme ir kopīgs π -elektronu blīvuma sadalījums konjugētā molekulārā sistēmā. Molekulās ar konjugētām dubultām saitēm π -elektroni veido vienu elektronu mākonī, kas pieder visai elektronu ķēdei. Rezultātā π -elektronu kustīgums (delokalizācijas pakāpe) palielinās un samazinās molekulas ierosināšanas enerģija [58].

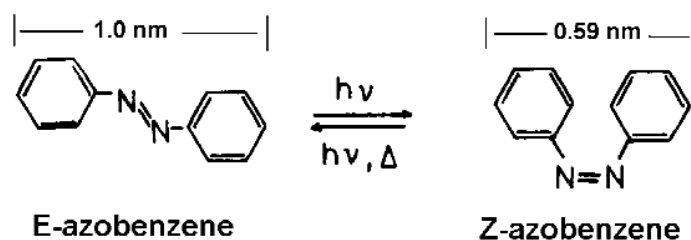
Aizvietotāju pievienošana konjugācijas ķēdei (piemēram, azobenzola gredzeniem) ved pie spektroskopiska rakstura izmaiņām. Donora-akceptora sistēma (pull-push, *angliski*) raksturojas ar elektronu akceptora aizvietotāju no vienas puses un elektronu donoru aizvietotāju no otras. Tāda konfigurācija padara π -saiti par polāru, t.i. veidojas pastāvīgs elektrisks dipola moments, kas ienes savu daļu visas molekulas dipola momentā. Lielākie dipola momenti atbilst vairāk izteiktām nelineārām īpašībām [54].

Azosavienojumu absorbcijas spektrus izskaidro organisko savienojumu krāsainības teorija. Šīs teorijas galvenā ideja ir sekojoša: organisko vielu spēja absorbēt gaismu nosaka īpaši elektronu stāvokļi, kuri veidojas pie pietiekoši garas saistīto dubultu saišu ķēdes ar tām pievienotām elektronu donoru un elektronu akceptoru grupām [58].

Azosavienojumu svarīga īpašība ir to izomerizācijas iespēja. Izomerizācija ir galvenā fotoreakcija aromātisko azosavienojumu lielākajai daļai [41]. Azosavienojumiem ir divi ģeometriskie izomēri: *trans*- un *cis*- formas. Pārejot no vienas telpiskās formas uz otru mainās absorbcijas spektrs (sk. 1. att.) un molekulas izmēri (sk. 2. att.). Izomerizācijas reakcija var tikt ierosināta ar gaismu vai siltumu no vienas formas uz otru un atpakaļ.



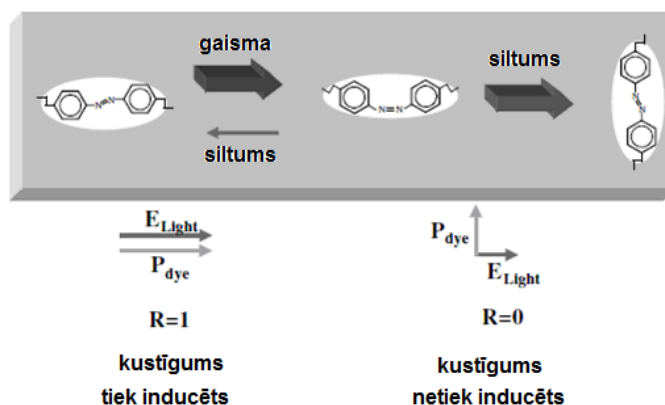
1. att. E- (*trans*-) un Z- (*cis*-) izomēru absorbcijas spektri $\text{C}_2\text{H}_5 - \text{OH}$ šķīdumā [41]



2. att. E- (*trans*-) un Z- (*cis*-) izomēri ar izmēriem
 Dipola momenta pieaugums no 0 līdz aptuveni 3 Debajiem
 [41, 54].

Sestajā nodaļā tiek aplūkots virsmas reljefa hologrammu ieraksts azobenzola savienojumos un amorfajos pusvadītājos, kā arī virsmas reljefa hologrammu ieraksta mehānismi.

Pirmie virsmas reljefa režģi tika ierakstīti polimēros ar augstu stiklošanās temperatūru, bet ar relatīvi zemām gaismas intensitātēm [12, 13, 36]. Sekojošie pētījumi [4, 49] parādīja, ka šādos apstākļos virsmas reljefs veidojas, galvenokārt, fotoinducētas masas pārnese dēļ, ar nenozīmīgu termisku efektu. Tas ir pilnīgi fotonu process.



3. att. Orientācijas mehānisms ar *trans-cis* izomerizācijas palīdzību [41]

Šis process ir balstīts uz azobenzola hromoforu izomerizācijas spēju gaismas ietekmē. 3. att. parādīts, kā fotoizomerizācijai un termiskai relaksācijai no augstenerģētiskā *cis*- stāvokļa uz zemenerģētisko *trans*- stāvokli seko molekulu reorientācija.

Teorētiskie modeļi paskaidro virsmas reljefa režģu veidošanās:

1. Brīvās telpas jeb izomerizācijas spiediena modelis [2, 3]. Virzošais spēks masas pārnesei ir spiediena gradients, ko izraisa hromoforu fotoizomerizācija interferences ainā. Apgabalos, kur aktīvi notiek izomerizācija parādās spiediens un notiek materiāla viskozielastīga plūsma no augsta spiediena apgabaliem uz zema spiediena apgabaliem.
2. Elektriskā lauka gradienta spēka modeļa [15] pamatā ir optiski inducēta elektriskā lauka gradienta ietekme uz hromofora molekulām [1]. Vidējais

pēc laika gradienta spēka blīvums tiek aprakstīts ar vienādojumu [15, 41, 54]

$$\vec{f}(r) = \langle [\vec{P} \cdot \nabla] \vec{E} \rangle, \quad (4)$$

kur \vec{P} ir polarizācija, \vec{E} ir gaismas elektriskais lauks, $\langle \rangle$ apzīmē vidējo laikā. Polimēru ķēdes tiek pakļautas virzošam spēkam tikai virzienā, kur eksistē elektriska lauka gradienta komponente un šis spēks ir vienāds ar nulli, kad molekulas polarizācija ir perpendikulāra gradientam.

3. Vidējā lauka modelī [34] gaisma orientē hromoforus elektriskā lauka virzienā. Rodas dipolu pievilkšanas spēki, kas pievelk paralēli orientētus hromoforus vienu pie otra. Masas pārnese ir iespējama tikai tad, kad hromoforu molekulas tiek orientētas savstarpēji paralēli.
4. Viskoza masas plūsmas modelis [9, 43] ir diezgan veiksmīgs, bet neapraksta virzošā spēka mikroskopisko dabu. Masas pārnesei dinamiskā skaidrošanai tiek pielietoti hidromehānikas elementi. Virsmas reljefa režģa dinamika tiek analītiski aprakstīta kā funkcija no kārtiņas biezuma un interferences ainas viļņa skaitļa. Modeļa autori uzskata, ka režģu ģeometrijas analīze var kļūt par derīgu instrumentu masas pārnesei cēloņa noskaidrošanai.
5. Asimetriskās difūzijas modelis [16] tiek balstīts uz pieņēmumu, ka ierosinātas molekulas, kas satur hromoforus, *trans-cis* fotoizomerizācijas rezultātā pārvietojas no apgaismotiem apgabaliem uz neapgaismotiem. Molekulu pārvietošanos apraksta difūzijas vienādojums. Difūzijas plūsma ietver sevī varbūtību, reizinātu ar hromoforu skaitu, kas šķērso doto laukumu vienā laika vienībā. Plūsma tiek ievadīta difūzijas vienādojumā un tā atrisināšana dod hromoforu blīvuma sadalījumu un virsmas modulāciju.
6. Dielektriskās caurlaidības gradienta modelis, saskaņā ar kuru fotoinducētas dielektriskās caurlaidības izmaiņas rada spēku, kas ir proporcionāls gaismas intensitātei un dielektriskās caurlaidības gradientam un kas rada masas pārnesei pretēji šī gradienta virzienam:

$$\vec{f} = -\frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2 \nabla \epsilon, \quad (5)$$

kur \vec{E} ir gaismas elektriskais lauks, ϵ ir dielektriskā caurlaidība [54].

Sākot no 1971. gada, kad J. Feinleibs un citi [6] atklāja amorfos pusvadītājos ar gaismu inducētu kristalizāciju, ir atklātas arī blīvuma, cietības, ķīmiskās reaktivitātes, izšķīdināšanas ātruma, elektrisko un optisko īpašību fotoinducētas izmaiņas [33, 44, 45, 46]. Ir parādīts, ka liela ķīmisku un strukturālu izmaiņu kopa var tikt inducēta ar starojumu ar fotonu enerģiju, kura ir tuva aizliegtas zonas platumam. Lādiņnesēju fotoierosināšana un bezstarojuma relaksācija noved pie ķīmisku saišu sabrukšanas, polimerizācijas, mehāniskas spriedzes relaksācijas un atbilstošām struktūras izmaiņām [45, 46]. Fotostrukturālās izmaiņas halogēnīdu stiklos tiek skaidrotas ar ātru fotoierosinātu lādiņnesēju lokalizāciju, ar zemas

enerģijas defektu pāriem ar valences mijām un ar atomiem ar zemiem koordinācijas skaitļiem, kuri maina savas pozīcijas un saišu konfigurācijas [7].

Ir zināms arī cits fotoķīmiskais mehānisms – virsmas fotooksidācija, kurš var tikt pielietots virsmas reljefa modulācijai amorfos pusvadītāju halkogenīdos [10]. Tas darbojas pie starojuma fotonu enerģijas, kas ir tuvas vai lielākas par aizliegtās zonas platumu. Virsmas fotooksidācija noved pie kārtiņas biezuma samazināšanas spilgtāk apstarotajos apgabalos. Mazāk apstarotajos apgabalos pēc ekspozīcijas paliek As₂O₃ mikrokristāli, kuri maina arī materiāla absorbciju [21].

Gaismas starojums var mainīt ne tikai materiāla fizikālas īpašības, bet arī ķīmiskās, konkrēti izšķīdināšanas ātrumu ar neorganiskiem sārmu un organiskiem šķīdinātājiem [8]. Izšķīdināšanas ātrums tiek atkarīgs no amorfa pusvadītāja kārtiņas stāvokļa, kārtiņas un kodinātāja ķīmiska sastāva [47].

Fotoinducētas tilpuma izmaiņas var tikt izmantotas virsmas reljefa režģu veidošanai [39, 48] ar hologrāfisko metodi un arī mikrolēcu izgatavošanai [11].

Septītajā nodaļā ir aprakstīti paraugu sagatavošanas procesi un pētījumu metodika.

Amorfo pusvadītāju paraugi tika izgatavoti Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūta Optiskā ieraksta laboratorijā ar izejvielu termiskās iztvaicēšanas un nogulsnešanas uz stikla pamatni ar istabas temperatūru. Tādā veidā tika iegūtas plānas kārtiņas ar biezumu no 3 līdz 10 μm, kuru biezums tika mērīts interferometriski nogulsnešanas procesā.

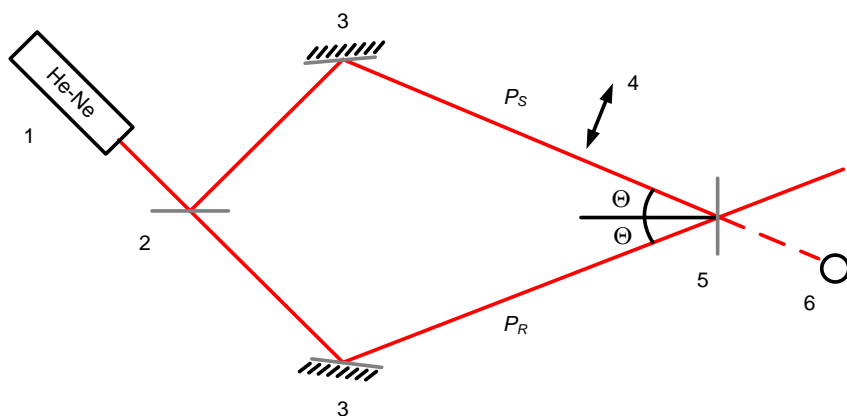
Azosavienojumu paraugi tika izgatavoti RTU Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātes Ķīmijas katedrā. Vispirms tika sagatavoti šo vielu šķīdumi. Oligomēra vai polimēra šķīdums sastāv no pētāmās vielas, kārtiņu veidojoša polimēra un šķīdinātāja. No šīm vielām tika pagatavoti dažādas koncentrācijas polimēra šķīdumi. Pēc šķīduma sagatavošanas notiek kārtiņas iegūšana ar iekārtu, kuras pamatā ir inerces centrālās spēku ietekme uz šķīdumu (*spin-coating*, *angliski*). Polimēra šķīdums vienmērīgi izplūst pa stikliņu, veidojot slānīti, no kura pēc izžūšanas veidojas kārtiņa.

Eksperimentu gaitā tika veikti optiskie (caurlaidības koeficienta, spektru), hologrāfiskie (divu un četru viļņu mijiedarbes ģeometrijā), kā arī atomspēku mikroskopijas mērījumi.

Hologrāfiskā ieraksta shēmas var redzēt 4. un 5. att. Difrakcijas režģa periods tika reķināts pēc formulas:

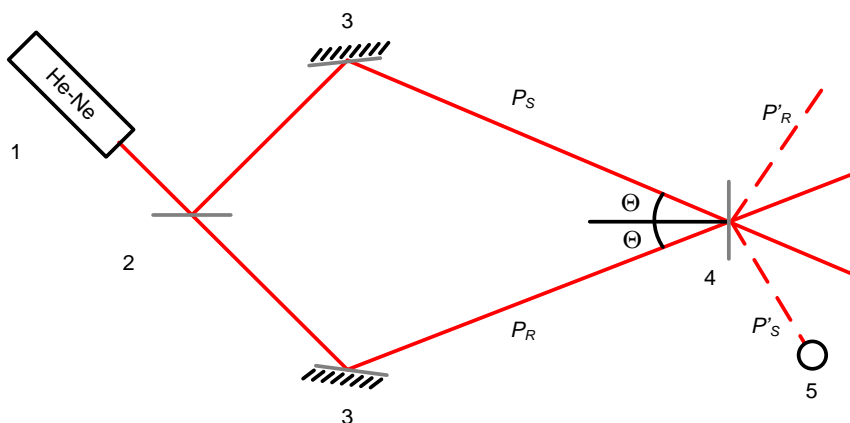
$$A = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}, \quad (6)$$

kur A – hologrāfiskā režģa periods, λ – ierakstoša lāzera starojuma viļņa garums, θ – stara krišanas leņķis.



4. att. Ieraksta shēma ar nefokusētiem stariem tiešiem difrakcijas efektivitātes mērījumiem

1 – lāzers; 2 – stara dalītājs; 3 – spogulis; 4 – aizvars; 5 – paraugs; 6 – jaudas mērītāja fotodetektors; P_S un P_R – lāzera stari; Θ – leņķis, kurš nosaka hologrāfiskā režģa periodu.



5. att. Ieraksta shēma ar nefokusētiem stariem netiešiem difrakcijas efektivitātes mērījumiem izmantojot pašdifrakciju

1 – lāzers; 2 – stara dalītājs; 3 – spogulis; 4 – paraugs; 5 – jaudas mērītāja fotodetektors; P_S un P_R – lāzera stari; P'_R un P'_S – difrakcijas maksimumi. Θ – staru krišanas leņķis, kurš nosaka hologrāfiskā režģa periodu.

Pēc mērījumu rezultātiem tika sastādītas līknes, kuras atspoguļo difrakcijas efektivitātes dinamiku ekspozīcijas laikā. Arī katram mēģinājumam, kur difrakcijas efektivitāti izdevās reģistrēt, tika aprēķināta īpatnēja ieraksta enerģija pēc formulas

$$W_{\max} = \frac{It}{\eta_{\max}}, \quad (7)$$

kur W_{\max} - īpatnēja ieraksta enerģija, I – starojuma intensitāte, t – laiks, par kuru bija sasniegts pirmais difrakcijas efektivitātes maksimums, η_{\max} – difrakcijas efektivitātes pirmais maksimums.

Intensitāte tika aprēķināta pēc sekojošas formulas:

$$I = \frac{4(P_1 + P_2)}{\pi(2r_0)^2}, \quad (8)$$

kur I – lāzera starojuma vidēja intensitāte, P_1 un P_2 – lāzera ierakstošo staru jaudas, $2r_0$ – lāzera stara diametrs.

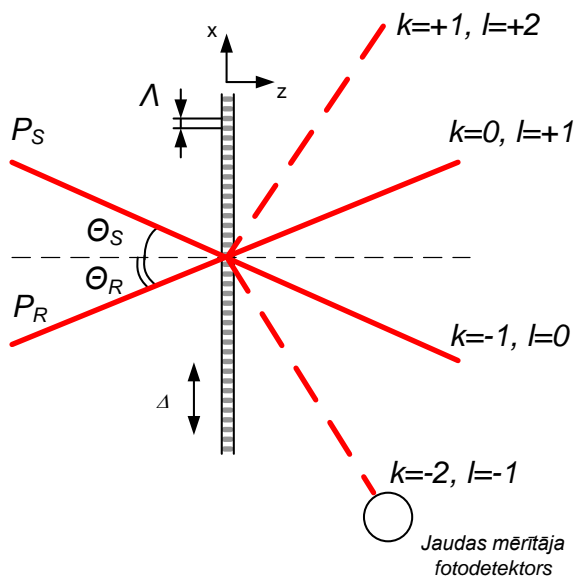
Gadījumā, kad ieraksta laikā difrakcijas efektivitātes izmaiņas notika ātri (tajā ziņā, ka pārtraucot vienu no stariem un nolaset rādījumus bija radīta manāma ietekme ieraksta procesam) tika izmantota cita mērījumu shēma (5. att.), kur tieši bija mērīta pašdifrakcijas efektivitāte.

Pašdifrakcijas efektivitāte (self-diffraction efficiency, SDE, *angliski*) tika definēta, kā (sk. 6. att.)

$$SDE = \frac{P_d(k = -2, l = -1)}{P_s}, \quad (9)$$

kur $P_d(k = -2, l = -1)$ ir pašdifragētā stara jauda.

To nosaka P_s stara mīnus pirmās difrakcijas kārtas stara kompleksās amplitūdas un P_R stara mīnus otrās difrakcijas kārtas stara kompleksās amplitūdas summa. P_s ir nolasošais stars. Ja $P_R=0$, tad pašdifrakcijas efektivitāte ir vienāda ar difrakcijas efektivitāti. Pašdifrakcijas efektivitāte tiek izmantota, lai novērtētu difrakcijas efektivitāti.



P_S un P_R ir krītošo staru jaudas, $\Theta_S = \Theta_R$ ir staru krišanas leņķi, k ir difrakcijas kārtas P_R staram, l ir difrakcijas kārtas P_S staram, Δ ir režģa periods, Δ ir režģa nobīde nestabilitātes vai molekulu kustības dēļ.

$\Delta \frac{2\pi}{\Lambda} = \Phi_S - \Phi_R$, kur Φ_S un Φ_R ir P_S un P_R nulles kārtas difragēto staru fāzes.

6. att. Detalizēta ieraksta un nolases shēma

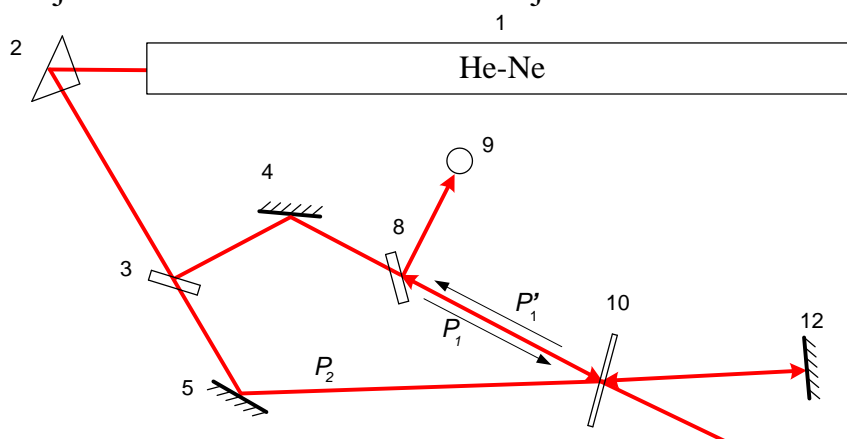
Saskaņā ar aprēķiniem, kas tika veikti izmantojot plāno hologrammu teoriju [22] pašdifrakcijas efektivitāte un difrakcijas efektivitāte ir saistītas ar izteiksmi

$$SDE = DE_{(-1)} + \frac{P_R}{P_S} DE_{(-2)} + 2 \left(\frac{P_R}{P_S} DE_{(-1)} DE_{(-2)} \right)^{1/2} \cos(\Phi_S - \Phi_R + \Phi_{S(-1)} - \Phi_{R(-2)}), \quad (10)$$

kur P_R un P_S ir ierakstošo staru jaudas, $DE_{(-1)}$ ir mīnus pirmās kārtas difrakcijas efektivitāte, $DE_{(-2)}$ ir P_R stara mīnus otrās kārtas difrakcijas efektivitāte, Φ_S un Φ_R

ir nulltās kārtas difragēto P_S un P_R staru fāzes, $\Phi_{S(-1)}$ ir mīnus pirmās kārtas difragēta P_S stara fāze un $\Phi_{R(-2)}$ ir mīnus otrās kārtas difragētā P_R stara fāze.

Deģenerētās četru viļņu mijiedarbības eksperimenti tika veikti ar LGN-222 He-Ne lāzeru ar viļņu garumu 632,8 nm. Pietiekoši vājai ieraksta intensitātei ir iespējams lietot hologrāfisku tuvinājumu [28]. Eksperimentālā shēma tiek parādīta 7. att. Eksperiments notiek sekojošā veidā. Stari P_1 un P_2 ieraksta elementāro caurlaidības hologrammu – hologrāfisko režģi paraugā. Atstarotais no spoguļa 12 kūlis tiek difragēts ar ierakstīto dinamisko režģi. Difragētais kūlis P_1' tiek virzīts uz jaudas mērītāja fotodetektoru 9 ar staru dalītāju 8.



7. att. Eksperimentālā shēma nefokusētam ierakstam četru viļņu ģeometrijā

1 – lāzers, 2 – prizma, 3 un 8 – staru dalītāji, 4, 5 un 12 – spoguļi, 9 – jaudas mērītāja fotodetektors, 10 – paraugs.

Ja stari tiek fokusēti ar lēcām, mums jāievada papildus parametri: fokusa attālums f un attālums starp paralēliem stariem l (8. att.). Lietojot trigonometriskus pārveidojumus no (6) un 8. att. ir iespējams izvest šādu formulu režģa periodam fokusēta ieraksta gadījumā:

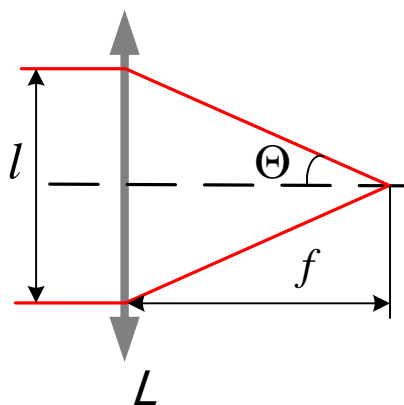
$$A = \frac{\lambda}{2} \sqrt{1 + \frac{4f^2}{l^2}}, \quad (11)$$

kur A ir režģa periods (sk. formulu (6)), λ ir viļņa garums, f ir fokusa attālums, l ir attālums starp paralēliem stariem.

Hologrāfiskā ieraksta efektivitāte četru viļņu mijiedarbības ģeometrijā tiek raksturota ar invertētā viļņa efektivitāti. Invertētā viļņa efektivitāte IWE (Inverted Wave Efficiency, *angliski*) tiek definēta kā

$$\text{IWE} = \frac{P_1'}{P_1}, \quad (12)$$

kur P_1' ir invertētā stara jauda, P_1 ir kritoša stara jauda (7. un 9. att.).



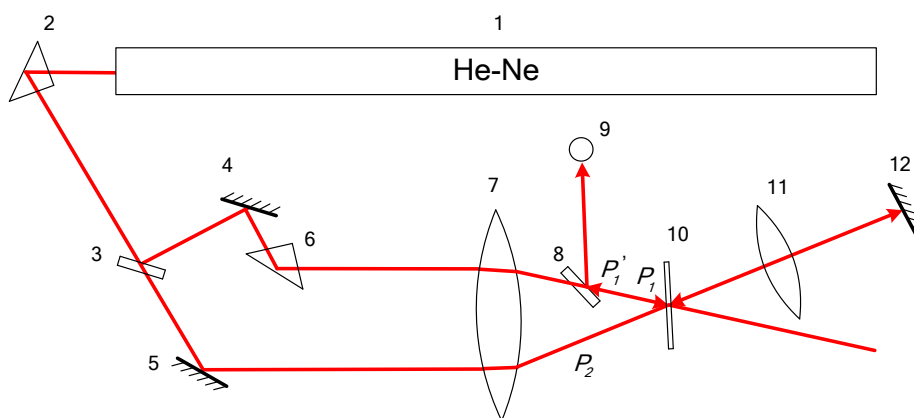
8. att. Fokusēšanas ģeometrija

L – lēca, $\text{tg } \Theta = \frac{l}{2f}$, kur l ir attālums starp stariem,
 f ir lēcas fokusa attālums, Θ ir krišanas leņķis.

Īpatnējā ieraksta enerģija tiek ņemta pie maksimālas deģenerētās četru viļņu mijiedarbības efektivitātes. Tā tika noteikta sekojoši:

$$W_{\max} = \frac{It}{\text{IWE}_{\max}}, \quad (13)$$

kur W_{\max} ir īpatnēja ieraksta enerģija, I ir lāzera starojuma intensitāte (sk. formulu (8)), IWE_{\max} ir maksimālā invertēta viļņa efektivitāte, t ir laiks, par kuru tiek sasniegta IWE_{\max} .



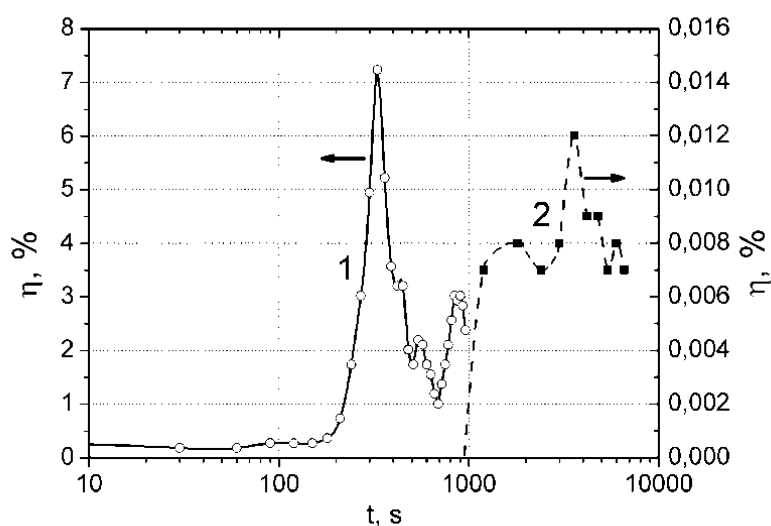
9. att. Eksperimentālā shēma fokusētam ierakstam četru viļņu mijiedarbības gadījumā

1 – lāzers, 2 un 6 – prizmas, 3 un 8 – staru dalītāji, 4, 5 un 12 – spoguļi, 7 un 11 – lēcas, 9 – fotodetektors, 10 – paraugs.

Hologrāfisko režģu virsmas reljefa mērījumi tika veikti ar skenējošo atomspēka mikroskopu NT-MDT Model Smena-A (Krievija) toluila azobenzolu oligomēru gadījumā un ar SPM II VEECO (ASV) pārējos gadījumos. Pirmajā gadījumā mērījumi tika veikti Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūtā, otrajā – RTU Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātes Silikātu materiālu institūtā.

Astotajā nodaļā tiek aprakstīti fokusētu un nefokusētu hologrāfisko režģu ieraksta eksperimenti a-As₂S₃ kārtiņās ar He-Ne lāzeru pie viļņa garuma 633 nm.

No 10. att. redzams, ka ieraksts ar fokusētiem stariem ir krietni efektīvāks. Augstākas difrakcijas efektivitātes un zemākas īpatnējās ieraksta enerģijas tiek sasniegtas pie režģa perioda 1,4 μm. Augstākas ieraksta intensitātes deva augstākas difrakcijas efektivitātes un zemākas īpatnējās ieraksta enerģijas, t.i. labāku ieraksta efektivitāti (vismaz režģiem ar periodiem, mazākiem par 5 μm), nekā mazākas intensitātes.



10. att. Difrakcijas efektivitātes atkarība no ekspozīcijas laika hologrāfiskam režģim ar periodu 1 μm ar fokusētiem (līkne 1, $I=14 \text{ W/cm}^2$) un nefokusētiem (līkne 2, $I=0,58 \text{ W/cm}^2$) He-Ne lāzera stariem

Eksperimentālie punkti tika atzīmēti ar gaišiem aplīšiem fokusēta ieraksta gadījumā un ar melniem kvadrātiņiem nefokusēta ieraksta gadījumā. Kā redzams, difrakcijas efektivitātes skalas abos gadījumos ievērojami atšķiras [32].

Vislabākie hologrāfiskie parametri sasniegtie fokusētam ierakstam ir $\eta_{\max} = 14,9\%$ un $W_{\max} = 216 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2 \%}$, bet nefokusētam $\eta_{\max} = 0,11\%$ un

$W_{\max} = 72400 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2 \%}$. Maksimālās difrakcijas efektivitātes atkarība no režģa

perioda arī atšķiras. Fokusēta ieraksta gadījumā eksistē maksimums pie $\lambda = 1,4 \mu\text{m}$. Nefokusēta ieraksta gadījumā tiek novēroti divi maksimumi: pie $0,5 \mu\text{m}$ un pie $10 \mu\text{m}$ [26]. Parauga atkvēlināšana samazina ieraksta efektivitāti: $\eta_{\max} = 0,92 \%$,

$W_{\max} = 10300 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2 \%}$.

Eksperimentālie rezultāti liecina par to, ka, visticamāk, par fokusētu un nefokusētu ierakstu amorfajās As_2S_3 kārtiņās ar $632,8 \text{ nm}$ starojumu ir atbildīgi dažādi mehānismi [31, 32]. Šo rezultātu skaidrošanai mēs esam likuši priekšā trīs mehānismus: strukturālās izmaiņas fotostimulētas relaksācijas rezultātā, D-centru ģenerācija un pārlādēšanās gaismas iespaidā, D-centru fotoorientācija. Nefokusēto ierakstu mēs skaidrojam ar D-centru fotoorientāciju kopā ar relaksācijas fotostimulēto strukturālo izmaiņu ieguldījumu. Fokusētais ieraksts tiek skaidrots ar fotostimulētām relaksācijas strukturālām izmaiņām kopā ar fotoinducētu D-centru ģenerāciju un pārlādēšanu [31, 32].

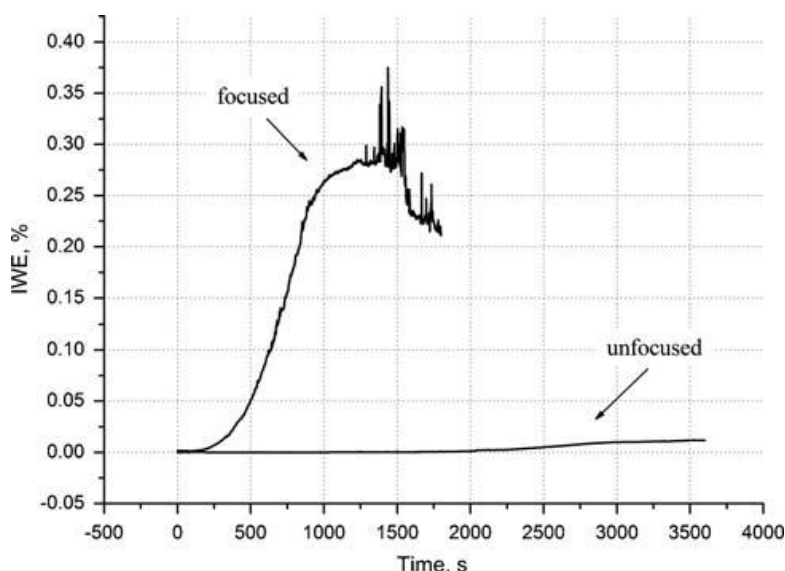
Fokusētais ieraksts ir efektīvāks par nefokusēto dažādas D-centru koncentrācijas dēļ. D-centru koncentrācija a- As_2S_3 ir $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [19] un tikai šie aktīvie centri piedalās nefokusētajā ierakstā. D-centru koncentrācija pieaug ar gaismas intensitātes palielināšanu šo centru ģenerācijas dēļ (D-centru pārlādēšanās mehānisms).

Fotoinducētas relaksācijas strukturālās izmaiņas notiek tā saucamās mīkstajās atomu konfigurācijās, kuru koncentrācija ir aptuveni 10^{21} cm^{-3} [55] un kuri tiek aktivēti ar intensīvu fokusētu gaismu.

Devītajā nodaļā tiek aplūkota četru viļņu mijiedarbes eksperimentāla izpēte a- As_2S_3 un azobenzola oligomēru kārtiņās.

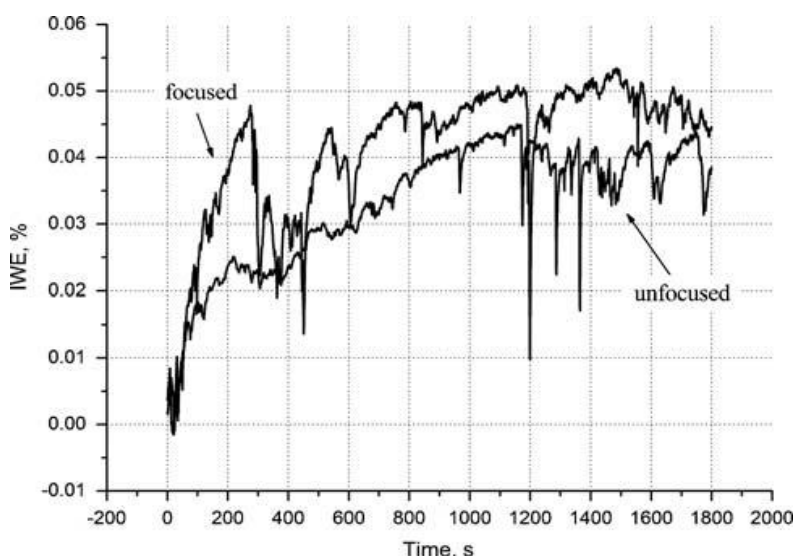
Četru viļņu mijiedarbe tika realizēta amorfās As_2S_3 kārtiņās un azobenzola oligomēros. Eksperimentālie rezultāti a- As_2S_3 un savienojumam [4-((4-nitrofenil) diazenil)-*N,N*-bis(2-(tetrahidro-2H-pirān-2-iloksi)etil)benzolaamīns ir parādīti 11. un 12. attēlā, ka arī 2. tabulā. Acīmredzami, ka invertētā viļņa efektivitāte ir augstāk pie fokusēta ieraksta un notiek ātrāk, nekā pie nefokusēta. Invertētā viļņa efektivitāte krīt pēc pietiekoši lielas ekspozīcijas tāpēc, ka laušanas koeficienta izmaiņas sasniedz piesātinājumu [42].

Ieraksts azobenzola oligomēros notiek ātrāk nekā amorfā As_2S_3 . Īpatnējā ieraksta enerģija ir mazāka nefokusētai četru viļņu mijiedarbei azobenzola oligomēros un fokusētai a- As_2S_3 (sk. 2. tabulu). Tāds efekts var tikt izskaidrots ar to, ka ieraksta mehānismi ir dažādi dažādos materiālos. Amorfā As_2S_3 galvenokārt notiek D-centru orientācija nefokusētam ierakstam un fotostimulētas kārtiņas relaksācijas struktūras izmaiņas kopā ar D-centru ģenerāciju un pārlādēšanu fokusētam ierakstam [32]. Azobenzola oligomēros ieraksta mehānisms ir hromoforu grupas orientēšana perpendikulāri polarizētas gaismas elektriskā lauka vektoram [23, 37].



11. att. Invertētā viļņa efektivitātes (IWE – inverted wave efficiency, *angliski*) atkarības no ekspozīcijas laika amorfam As_2S_3 paraugam

Ierakstoša starojuma intensitāte fokusētai deģenerētai četru viļņu mijiedarbei $I=44 \text{ W/cm}^2$ un nefokusētai $I=0,80 \text{ W/cm}^2$ [37].



12. att. Invertēta viļņa efektivitātes (IWE – inverted wave efficiency, *angl.*) atkarības no ekspozīcijas laika azobenzola oligomēra paraugam ar hromofora koncentrāciju 0,12 mol/l

Ierakstoša starojuma intensitāte fokusētai deģenerētai četru viļņu mijiedarbei $I=47 \text{ W/cm}^2$ un nefokusētai $I=0,57 \text{ W/cm}^2$ [37].

Liels enerģijas patēriņš fokusētai četru viļņu mijiedarbei var tikt izskaidrots sekojošā veidā. Ticams, ka fokusēta ieraksta gadījumā materiāla temperatūra ieraksta apgabalā ievērojami palielinās līdzīgi kā a- As_2S_3 [42] tāpēc, ka siltumvadāmības abiem šiem materiāliem ir salīdzināmas ($379 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ amorfam As_2S_3 un $80 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$, pat mazāk, polistirolam [37, 53]. Azobenzola oligomēru

gadījumā hromoforu grupas tika disperģētas polistirola matricā un hromofora vielas daudzums paraugā ir mazāks nekā polistirola daudzums).

2. tabula

Invertētā viļņa efektivitāte (IWE – inverted wave efficiency, *angliski*) un īpatnējā ieraksta enerģija W_{max} dažādiem paraugiem (ABO – azobenzola oligomērs) un ieraksta nosacījumiem

Materiāls	Ieraksts	IWE _{max} , %	W_{max} , kJ/(cm ² %)
a-As ₂ S ₃	fokusēts	0,285	190
	nefokusēts	0,012	234
ABO; C=0,1 mol/l	fokusēts	0,045	1197
	nefokusēts	0,030	25,3
ABO; C=0,12 mol/l	fokusēts	0,053	1316
	nefokusēts	0,047	8,6

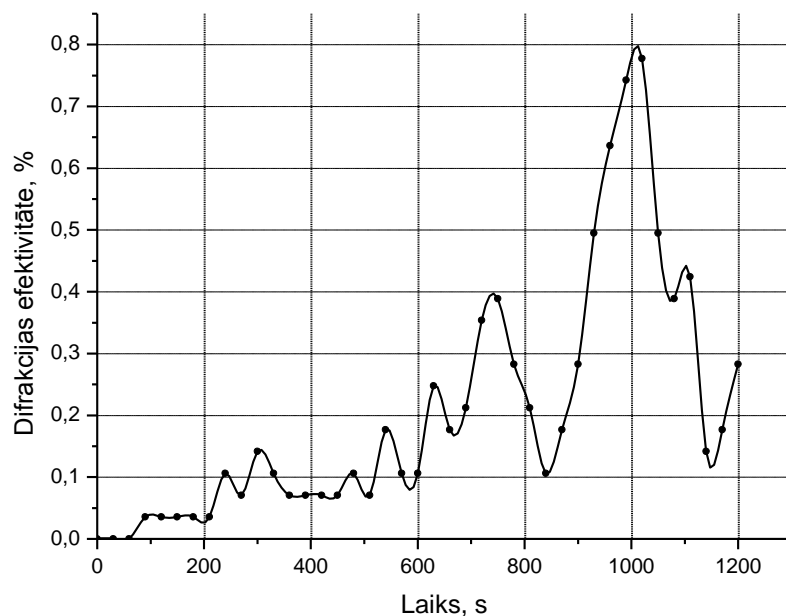
Hromofora molekulas uzkarstētā ieraksta apgabalā tiek pakļautas fotoinducētai orientācijai ar lineāri polarizētu gaismu un uzkarstēšanas ietekmei, kas izraisa pretējus rezultātus. Rezultātā invertētā viļņa efektivitāte azobenzola oligomērā ir zemāka, nekā amorfā As₂S₃, kur temperatūras paaugstināšanās stimulē struktūras relaksāciju (fokusētam ierakstam).

Četrus viļņu mijiedarbei pielietošanas joma ir plaša: materiālu izpēte, viļņu frontes inversija un optiskā informācijas apstrāde, attēlu apstrāde reālā laikā, koherentu infrasarkanu un vakuuma ultravioletu avotu veidošana, šķiedru un brīvas telpas optiskie sakari.

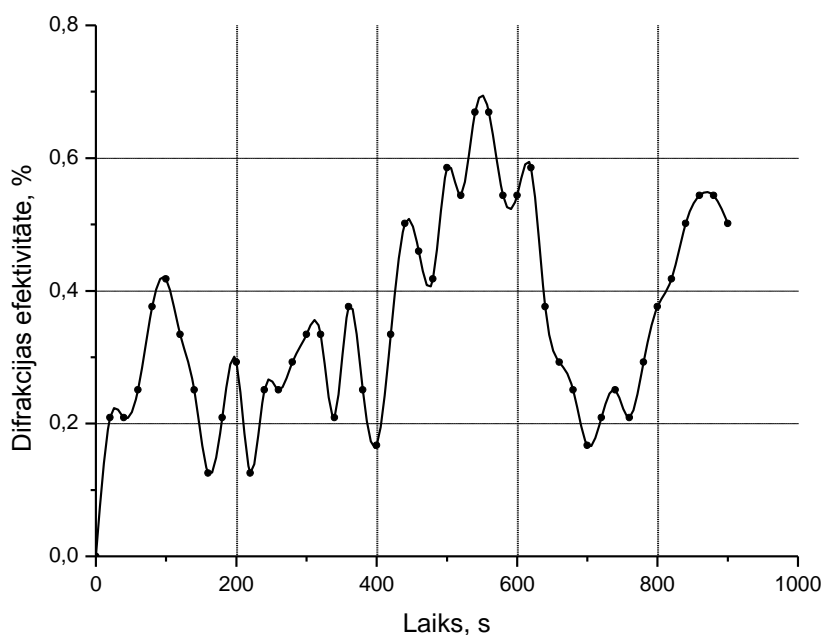
Desmitā nodaļa ir veltīta azobenzola oligomēru hologrāfisko īpašību atkarības izpētei no hromoforu grupu piesaistes matricai un no to koncentrācijas.

Organiskie materiāli ļauj plašāk mainīt to īpašības salīdzinot ar neorganiskiem. Azobenzola savienojumi ir organisko materiālu klase, kura ir perspektīva šajā ziņā, par ko liecina azobenzola īpašības un šim jautājumam veltītu publikāciju lielais skaits. Hologrāfiskā ieraksta pētījumiem sarkanajā spektra daļā ir gan teorētiskā, gan praktiskā nozīme. No teorētiskās puses ir nepietiekoši izpētīts fizikālais mehānisms, kurš ir atbildīgs par ierakstu pie ļoti zemas absorbcijas. No praktiskā viedokļa ieraksts šajā spektra daļā ļauj sasniegt augstākas difrakcijas efektivitātes un izmantot lētākus lāzerus. Promocijas darba ietvaros šajā aspektā tika pētītas divas materiālu grupas. Pirmā grupa bija azobenzola hromofori, kas kovalenti saistīti ar oligomēra matricu. Šeit ar oligomēra matricu tiek saprasta oligomēra pamatķēde. Šajā gadījumā tika

izmantotas divas matricas: ar toluilu un ar heksametilēnu modificēts poliuretāns. Otrā grupa bija azobenzola hromofori polistirola matricā bez kovalentas saites. Galvenie rezultāti ir apkopoti 13. un 14. att. un 3. un 4. tabulā. Difrakcijas efektivitātes dinamika ieraksta laikā bija diezgan nestabila, ar dažādiem maksimumiem (13. un 14. att.).



13. att. Difrakcijas efektivitātes atkarība no ekspozīcijas laika paraugam Nr. 1 no 3.tabulas



14. att. Difrakcijas efektivitātes atkarība no ekspozīcijas laika paraugam „A2[125]” 4. tabulā

Otrajam paraugu tipam tas bija izteikts vairāk. Lai pēc iespējas objektīvāk aprakstītu ieraksta efektivitāti dažādos paraugos, tika izmantoti četri parametri:

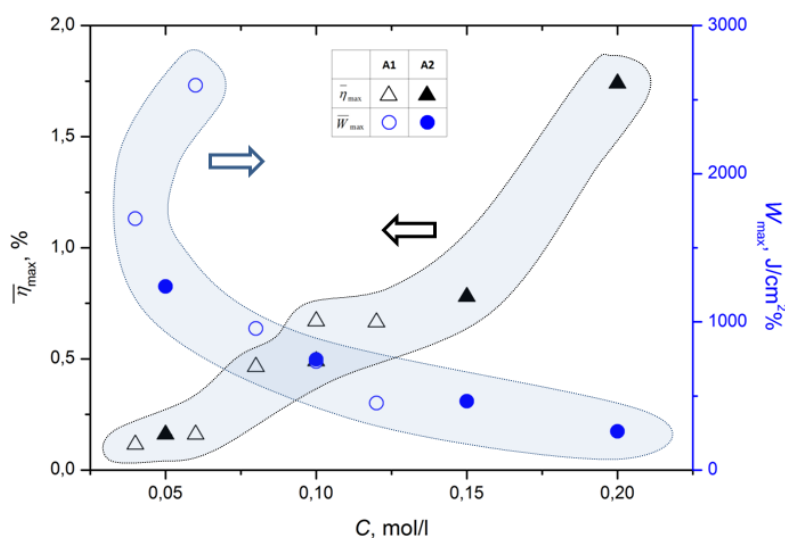
- 1) Maksimālā difrakcijas efektivitātes vērtība no maksimālām, sasniegtām dažādos mērījumos ($_{max} \eta_{max}$).
- 2) Minimālā īpatnējās ieraksta enerģijas vērtība ($_{min} W_{min}$).
- 3) Vidēja vērtība, aprēķināta no maksimālām difrakcijas efektivitātes vērtībām dažādos mērījumos ($\bar{\eta}_{max}$).
- 4) Īpatnējās ieraksta enerģijas (kura atbilst maksimālāi difrakcijas efektivitātei atsevišķā mērījumā η_{max}) vidēja vērtība (\bar{W}_{max}) (4. tabulā).

3. tabula

Hologrāfiskie parametri pirmā tipa paraugiem

HM- heksametilēns, Tl - toluils, λ_{max} – absorbcijas maksimuma viļņa garums, D_{max} – optiskais blīvums pie absorbcijas maksimuma, η_{max} maksimāla difrakcijas efektivitāte, W_{max} – īpatnēja ieraksta enerģija pie η_{max} .

Paraugs	Matrica	Hromofors	λ_{max} , nm	D_{max}	η_{max} , %	W_{max} , J/(cm ² %)
1	HM	Paranitrofenilazobenzols	470	3,7	0,8	1071
2	HM	4-nitronaftilazobenzols	500	4,2	2,1	62
3	Tl	4-nitronaftilazobenzols	500	4,7	0,26	2626
4	HM	9,10-antrahinons- α - azobenzols	417	2,4	0	--
5	Tl	9,10-antrahinons- α - azobenzols	415	2,5	0	--
6	Tl	β -hlors-9,10-antrahinons- α -azobenzols	550	3,6	0	--
7	HM	β -hlors-9,10-antrahinons- α -azobenzols	420	2,1	2,9	260



15. att. Vidējās difrakcijas efektivitātes un īpatnējās ieraksta enerģijas atkarība no azohromofora koncentrācijas polistirola matricā

Otrā tipa paraugu hologrāfiskie parametri un azohromoforu koncentrācija *Hromoforu grupa A2 tika izmantota, lai sasniegtu lielāku (par A1) koncentrāciju polistirola matricā. C – azohromofora koncentrācija, λ_{max} – absorbcijas maksimuma viļņa garums, D_{max} – optiskais blīvums pie absorbcijas maksimuma, $max\eta_{max}$ - maksimālā sasniegta difrakcijas efektivitāte, $minW_{max}$ – minimālā īpatnējās ieraksta enerģijas vērtība, $\bar{\eta}_{max}$ - vidēja no maksimālām difrakcijas efektivitātēm, \bar{w}_{max} - īpatnējās ieraksta enerģijas (kura atbilst η_{max}) vidēja vērtība.*

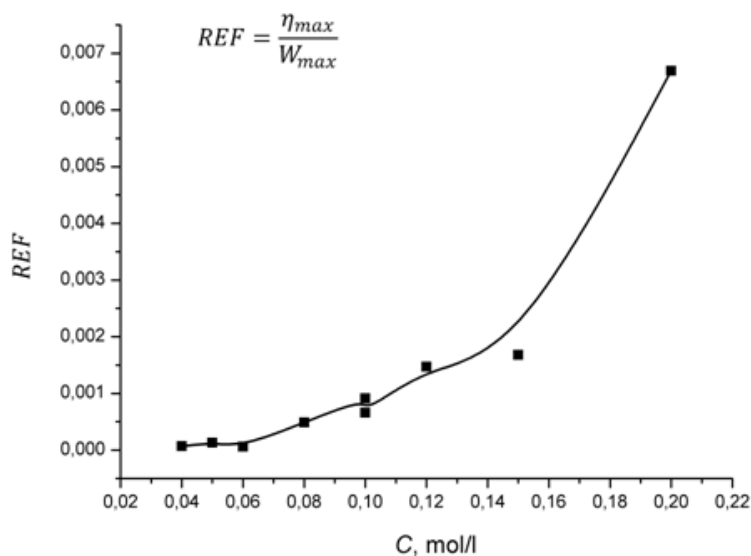
Paraugu apzīmējums	C, mol/l	λ_{max} , nm	D_{max}	$max\eta_{max}$, %	$minW_{max}$, J/(cm ² %)	$\bar{\eta}_{max}$, %	\bar{w}_{max} , J/(cm ² %)
A1[112]	0,005	482	0,55	0	--	0	--
A1[113]	0,006	482	0,63	0	--	0	--
A1[115]	0,007	480	0,74	0	--	0	--
A1[116]	0,010	480	1,02	0	--	0	--
A1[117]	0,040	487	3,6	0,12	616	0,115	1696
A2[129]	0,050	502	3,7	0,19	1081	0,16	1239
A1[121]	0,060	500	3,8	0,22	3127	0,16	2596
A1[119]	0,080	508	3,9	0,52	733	0,465	956
A1[91]	0,100	490	3,9	0,42	1540	--	--
A1[123]	0,100	500	3,9	0,78	610	0,67	732
A2[128]	0,100	510	3,8	0,9	425	0,49	746
A1[125]	0,120	436	4,3	0,68	329	0,665	452
A2[127]	0,150	500	3,9	1,39	183	0,78	464
A2[130]	0,200	500	3,9	2,30	31	1,74	260

No 4. tabulas var redzēt, ka ieraksta efektivitātei ir sliekšnis starp hromoforu koncentrācijām 0,01 mol/l un 0,04 mol/l. Lielākām koncentrācijām ieraksta efektivitāte aug līdz maksimālai 0,2 mol/l, pēc kuras sākās kristalizācija. Sliekšņa esamība var būt izskaidrota ar kooperatīvu hromoforu mijiedarbi. No 15. attēla ir redzams, ka kopā ar koncentrāciju aug arī difrakcijas efektivitāte un samazinās īpatnējā ieraksta enerģija.

Lai novērtētu ieraksta efektivitāti ar vienu skaitli šajā darbā tika ieviests parametrs, kas apvieno īpatnējo ieraksta enerģiju un difrakcijas efektivitāti. Tas tika nosaukts par ieraksta efektivitātes faktoru (REF - Recording Efficiency Factor, *angliski*) un to aprēķina sekojoši:

$$REF = \frac{\eta_{max}}{w_{max}}, \quad (12)$$

kur η_{max} ir maksimālā difrakcijas efektivitāte un w_{max} ir īpatnēja ieraksta enerģija, kas atbilst maksimālai difrakcijas efektivitātei. 16. att. tika parādīta ieraksta efektivitātes faktora atkarība no azohromofora koncentrācijas paraugā.



16. att. Ieraksta efektivitātes faktora atkarība no hromofora (A1 un A2) koncentrācijas polistirola matricā

Vienpadsmitā nodaļa ir veltīta virsmas reljefa hologrammu ieraksta pētījumiem azobenzola savienojumos un iegūto rezultātu analīzei.

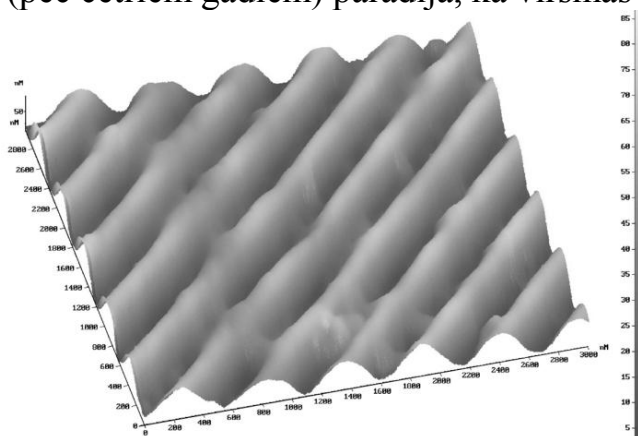
Parasti zila un zaļa gaisma tiek izmantota ierakstam azobenzola savienojumos, jo to absorbcijas spektriem ir maksimumi spektra zilajā un zaļajā daļā [41]. Šajā gadījumā notiek vielas *trans-cis* izomerizācija lāzera starojuma ietekmē [40, 41]. Sarkanajā spektra daļā absorbcija ir krietni mazāka, bet ieraksts vēl ir iespējams [23, 29]. Tāda ieraksta mehānisms nav pilnīgi skaidrs un tas radīja motivāciju turpināt pētījumus. Promocijas darba ietvaros tika pētīts virsmas reljefa hologrammas ieraksts azobenzola oligomēros ar toluila matricu, ierakstam izmantojot Ar⁺ lāzera zaļo 514,5 gaismu, kā arī stilbēna azobenzola savienojumos ar He-Ne lāzera 632,8 nm sarkano gaismu. Iespēja ierakstīt virsmas reljefa hologrammas azobenzola savienojumos ar sarkano gaismu ir atklāta šī promocijas darba izstrādes gaitā un to ir atzīmējusi arī Latvijas Zinātņu akadēmija 2008. gadā.

Divi azobenzola paraugi (apzīmēti kā T2 un T3) tika uzlieti no šķīduma uz K-8 stikla pamatni. Abos gadījumos poliuretāna matrica tika modificēta ar toluila oligomēru (toluodiizocianātu) ($n < 500$) ar hromoforu grupām sānu ķēdēs. T2 un T3 paraugi atšķiras ar akceptoru grupām. Caurlaidības hologrāfiskie režģi ar periodu $\Lambda \approx 360$ nm tika ierakstīti ar diviem simetriski krītošiem Ar⁺ lāzera stariem (Spectra Physics Model 171-09) ar vienādu jaudu ar lineāro TE (s-) polarizāciju pie viļņa garuma $\lambda_1 = 514,5$ nm. Ieraksta intensitāte $I = 0,6$ W/cm².

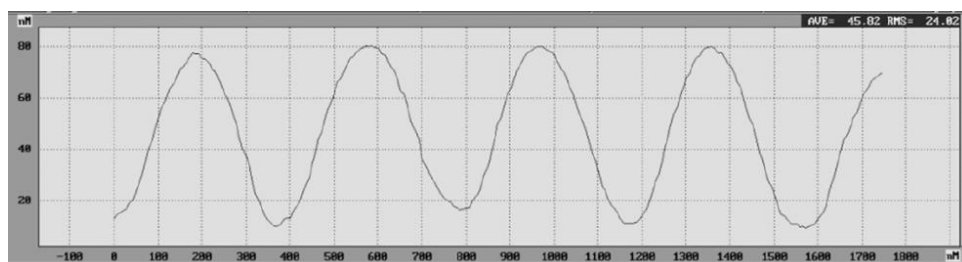
Fotoinducētas izmaiņas tika mērītas ar spektrometru (Perkin Elmer Lambda 35 UV/VIS) un parādīja absorbcijas samazināšanos pie 480-500 nm un absorbcijas palielināšanos 360 nm tuvumā, kas liecina par *trans-cis* transformāciju [41]. Pie tā laukums zem spektrālām līknēm samazinājās. Uzreiz pēc ieraksta tika mērīta

pirmās kārtas difrakcijas efektivitāte η pie viļņa garuma $\lambda_2 = 632,8$ nm ar TM (p-) polarizāciju un pie viļņa garuma $\lambda_2 = 650$ nm ar TE (s-) polarizāciju. Tika noteikta arī īpatnējā ieraksta enerģija W . Paraugam T2 $\eta = 1,0\%$, $W = 0,54 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}^2 \%}$ pie $\lambda_2 = 632,8$ nm un $\eta = 0,76\%$, $W = 0,71 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}^2 \%}$ pie $\lambda_2 = 650$ nm. Atbilstoši paraugam T3 $\eta = 2,0\%$, $W = 0,45 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}^2 \%}$ pie $\lambda_2 = 632,8$ nm un $\eta = 1,5\%$, $W = 0,60 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}^2 \%}$ pie $\lambda_2 = 650$ nm. Mērījumu precizitāte bija 3% difrakcijas efektivitātei un 8% īpatnējai ieraksta enerģijai.

Atomspēka mikroskopijas mērījumi (ar mikroskopu NT-MDT Model Smena-A) parādīja, ka ieraksta apgabalā izveidojās virsmas reljefa režģi. Maksimālas virsmas reljefa modulācijas amplitūdas bija 27 nm T2 paraugam un 35 nm T3 paraugam. Virsmas reljefa piemēru un reljefa profilu var redzēt 17. un 18. att. Atkārtotie mērījumi (pēc četriem gadiem) parādīja, ka virsmas reljefs saglabājās.



17. att. Virsmas reljefa režģis, ierakstīts paraugā T3 [30]



18. att. Virsmas reljefa režģa profils ierakstam paraugā T3 [30]

Paraugos tika arī ierakstīti hologrāfiskie režģi pie viļņa garuma 632,8 nm ar TM (p-) polarizāciju. Šajā gadījumā absorbcijas spektra izmaiņas un virsmas reljefs netika konstatēti. Šie ieraksti bija efektīvāki $\eta_{max} = 7,9\%$, $W_{max} = 0,42 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}^2 \%}$ T2 paraugam un $\eta_{max} = 4,2\%$, $W_{max} = 0,086 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}^2 \%}$ T3 paraugam, bet mazāk stabili.

Difrakcijas efektivitātes relaksācijas laiks tumsā sastādīja aptuveni 30 stundas. Acīmredzot, ka ieraksta mehānismi viļņu garumiem 514,5 nm un 632,8 nm ir dažādi [29].

Nolase tika veikta ar He-Ne lāzeru pie 632,8 nm ar dažādi polarizētu gaismu: lineāra TE, lineāra TM, pretējas ortogonālas cirkulāras polarizācijas (5. tabula). Tika mērītas nulles un pirmās kārtas difrakcijas efektivitātes caurejošiem un atstarotiem stariem [30]. Šie mērījumi tika veikti uzreiz pēc ieraksta un tika atkārtoti pēc četriem gadiem. Difrakcijas efektivitāte stipri nokrita, bet virsmas reljefa režģi saglabājās [30]. Tas liecina par to, ka paraugos tika ierakstīti arī amplitūdas un fāzes tilpuma režģi. Šis ieraksts var tikt izskaidrots ar vidējā lauka mehānismu un hromoforu fotodegradācijas mehānismu. Kovalenti piesaistīta bromā akceptoru grupa palielina ieraksta efektivitāti.

5. tabula

Difrakcijas efektivitātes atkarības no polarizācijas pie 632,8 nm T3 paraugam [30]
OCP-1 un OCP-2 ir ortogonālas cirkulāras polarizācijas.

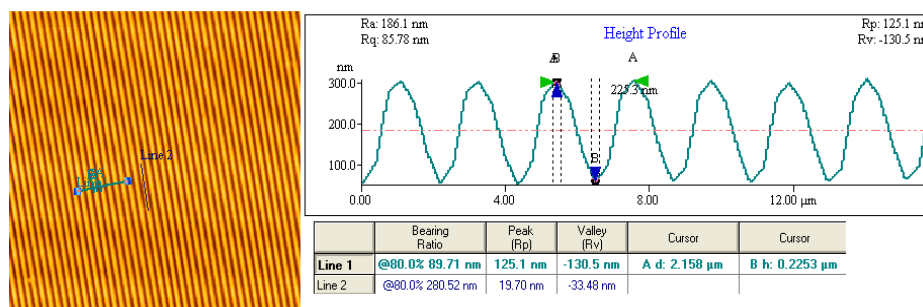
Difrakcijas efektivitāte, %	TE	TM	OCP-1	OCP-2
η	0,45	0,20	0,22	0,32
η_r	0,96	1,4	0,76	1,2
η_{0t}	14	23	16	17
η_{0r}	25	2,9	21	8,7

Stipra difrakcijas efektivitātes atkarība no polarizācijas var tikt izskaidrota ar fotoinducētu kārtiņu materiāla anizotropiju. Vairāk efektīvs, bet nestabils ieraksts ar 632,8 nm ir acīm redzot balstīts uz azohromoforu fotoorientācijas un pārlādēšanas procesiem bez *trans-cis* transformācijām.

Eksperimentos pētīti stilbēna azobenzola savienojumi bija azohromofora donorajā daļā stilbēna fragmentu saturoši molekulārie stikli. Eksperimenta gaitā tika ierakstīti hologrāfiskie režģi ar periodu 2 μm . Ieraksta intensitāte bija 0,88 W/cm^2 . Maksimālā pašdifrakcijas efektivitātes vērtība bija 17,4%. Ieraksta efektivitāte bija atkarīga no parauga vecuma. Optimālie rezultāti sasniegti ierakstot hologrāfisko režģi paraugā apmēram pēc 50 dienu no tā (parauga) izgatavošanas. Atomspēka mikroskopijas mērījumi parādīja, ka ieraksta apgabalā veidojas reljefs (19. att.). Virsmas reljefa modulācijas amplitūda sasniedza 113 nm. Virsmas struktūra saglabājās gada laikā, kā parādīja atkārtotie mērījumi.

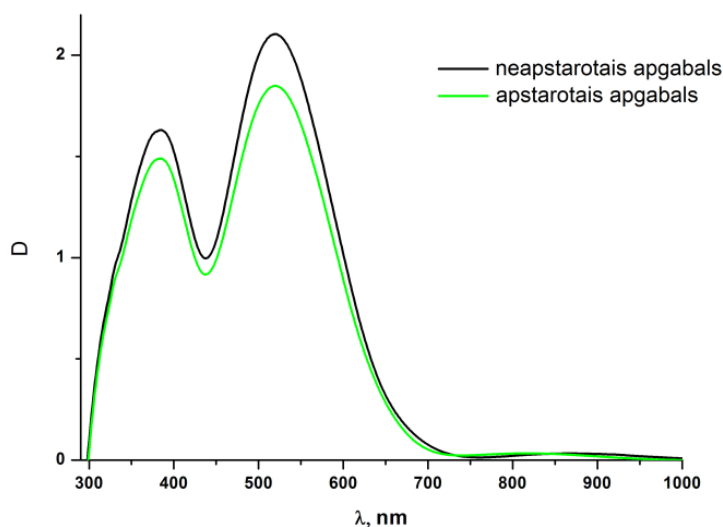
Fotoinducētas absorbcijas izmaiņas ilustrē 20. att. Galvenokārt tiek novērota fotobalēšana. Kā var redzēt, pie 638,2 nm absorbcijas izmaiņas ir niecīgas un praktiski eksistē tikai fāzes ieraksts. No 20. att. ir redzams, ka optiskais blīvums samazinājās gandrīz viendabīgi visā novērojamā spektra daļā, izņemot nelielu palielināšanās apmērām pie 700 nm. Pārsvarā viendabīga absorbcijas samazināšanās pēc ieraksta var tikt skaidrota ar hromoforu fotodegradāciju, t. i.

hromoforu destrukciju starojuma ietekmē ieraksta procesā. Piemēram, N-N saites var tikt sarautas ar 632,8 nm starojumu [41]. Fotoablācija arī ir iespējama, bet tai ir nepieciešamas intensitātes, kas ir daudz lielākas par 1 W/cm^2 [41].



19. att. Virsmas reljefs un tas profils ieraksta apgabala centrā
Reljefa amplitūda ir 113 nm, maksimālas līmeņa izmaiņās – 226 nm.

Ņemot vērā aplūkotās virsmas reljefa hologrammas ieraksta īpatnības (arī to, ka ieraksts tika veikts ar He-Ne lāzera p-polarizētu 638,2 nm gaismu) un zināmos virsmas reljefa modulācijas mehānismus par ierakstu var būt atbildīgi gaismas elektriskā lauka gradienta, vidēja lauka, hromoforu anizotropās difūzijas modeļi, kā arī hromoforu fotodegradācijas mehānisms.



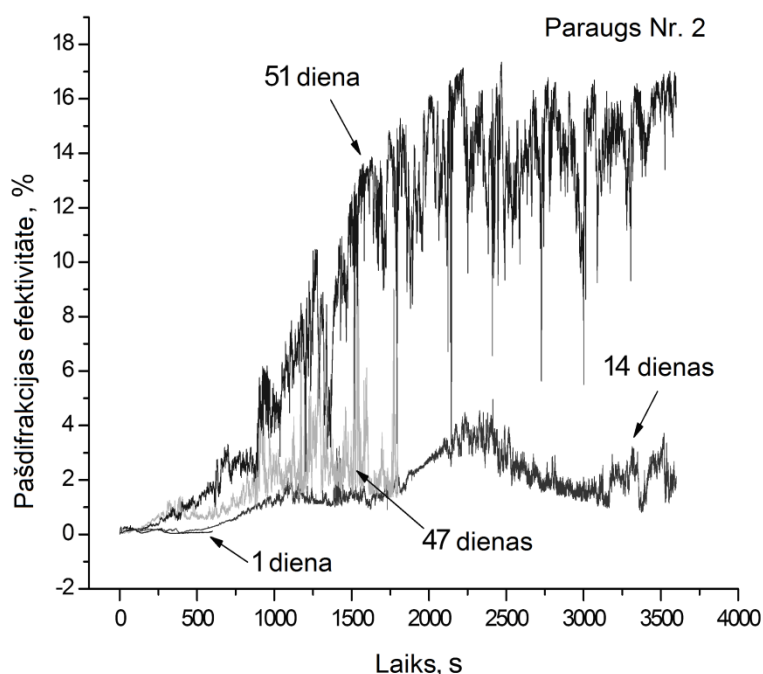
20. att. Parauga Nr. 2 (8a) absorbcijas spektra fotoinducētas izmaiņas 628,3nm gaismas ietekmē

Par pēdējā iespējamību liecina novērotā fotobalēšana un parauga uzsilšana. Iespējama ir arī sarkanās gaismas inducēta *trans-cis* fotoizomerizācija. Šo iespēju apstiprina tālākie RTU Tehniskās fizikas institūta Materiālu optikas laboratorijā veiktie eksperimenti [24]. Ticama ir arī vairāku mehānismu kopīga darbība. Lai precizētu virsmas reljefa režģu ieraksta mehānismus pētītajos azobenzola savienojumos ir nepieciešami tālākie detalizētākie pētījumi.

Praktiskā nozīme efektīvam ierakstam sarkanajā spektra daļā ir lētāka aprīkojuma pieejamība un, tā rezultātā, lētāka hologrāfisko optisko elementu, antirefleksijas kārtiņu u. c. veidošana.

Divpadsmitā nodaļa satur darbā iegūto informāciju par stilbēna azobenzola savienojumu relaksācijas īpatnībām.

Galvenokārt tika pētīti divi paraugi azohromofora elektrondonorajā daļā stilbēna fragmentu saturošie molekulārie stikli kārtiņu veidā. Eksperimentu rezultāti ir parādīti 21. attēlā un 6. tabulā. No tiem izriet, ka svaigie paraugi nav visefektīvākie hologrāfiskajām ierakstam, ka parasti tiek domāts [35, 40]. Visefektīvākajām ierakstam (maksimāla pašdifrakcijas efektivitāte un minimāla īpatnēja ieraksta enerģija) atbilst kaut kāds optimālais parauga glabāšanas laiks.



21. att. Pašdifrakcijas efektivitātes atkarība no ekspozīcijas laika dažādiem parauga Nr. 2 (8a) vecumiem

Ieraksta process bija efektīvāks vecākajam paraugam [38].

Mērījumi parādīja, ka ieraksta efektivitāte stilbēna azobenzola paraugos ir nemonotona funkcija no parauga vecuma. Eksistē optimālais laiks, pēc kura ir iespējams hologrāfiskais ieraksts ar maksimālo efektivitāti. Šo laiku viennozīmīgi nenosaka ķīmiskais sastāvs tāpēc, ka eksperimentos šis laiks bija dažāds dažādiem paraugiem ar vienādiem hromoforiem. Visticamāk, šo efektu nosaka stilbēna azobenzola atvasinājumu paraugu relaksācijas īpatnības, jo šie paraugi sastāv tikai no hromoforu molekulām starp kurām ir liels brīvais tilpums.

Nobeigumā un secinājumos ir apkopoti promocijas darba rezultāti, kvantitatīvi salīdzināta izpētīto materiālu hologrāfiskā efektivitāte un noformulēti darba secinājumi.

Hologrāfiskā ieraksta efektivitātes atkarība no hromofora koncentrācijas polivinilpirolidonā un parauga vecuma vielai 3-(4-(bis(2-(tritoloksi)etil)amino)fenil)-2-(4-(2-bromo-4-nitrofenil)diazenil)fenil)akrilonitrils (8a)

SDE_{max} ir pašdifrakcijas efektivitātes maksimāla vērtība, W_{max} ir īpatnējā ieraksta enerģija, kura atbilst SDE_{max} , I ir ieraksta starojuma intensitāte [38].

	6 dienas no parauga izgatavošanas				7 dienas	
Parauga apzīmējums	6,1	6,2	7,1	8	9	10
Koncentrācija (pēc masas), %	100	100	95	70	35	20
SDE_{max} , %	15,8	5,05	9,79	0,07	0,11	0,06
W_{max} , J/cm ² %	57	265	162	22651	13692	30068
I , W/cm ²	0,51	0,74	0,89	0,90	0,98	1,01
	66 dienas no parauga izgatavošanas					
SDE_{max} , %	0,23		0,35	0,04	0,03	
W_{max} , J/cm ² %	5175		4506	144	161	
I , W/cm ²	0,87		0,95	0,92	0,85	

Secinājumi

1. **Eksperimentāli izpētīts hologrāfisko režģu ieraksts ar fokusētu un nefokusētu He-Ne lāzera 633 nm zemspraugas gaismu neatlaidinātās un atlaidinātās a-As₂S₃ kārtiņās. Konstatēts, ka fokusēts ieraksts ir daudz efektīvāks par nefokusēto (14,9% un 0,11% difrakcijas efektivitāte, 0,216 kJ/cm² un 72,4 kJ/cm² ieraksta īpatnējā enerģija), to īpašības ievērojami atšķiras (divu gadu hologrāfisko režģu dzīves laiks un pozitīvas laušanas koeficienta izmaiņas fokusētā ieraksta gadījumā, bet tikai divu dienu dzīves laiks un negatīvas laušanas koeficienta izmaiņas nefokusētā ieraksta gadījumā). Paraugu atlaidināšana samazina ieraksta efektivitāti vairāk nekā pa kārtu.**

2. **Zemspraugas gaismas ieraksts a-As₂S₃ kārtiņās atšķiras no spraugas un virsspraugas gaismas ieraksta.** Ja pirmajā gadījumā notiek vāja fotoinducēta kārtiņas balēšana, tad otrajā – izteikta fotoinducēta nomelnošanās. Kā zināms, spraugas un virsspraugas gaismas gadījumā notiek kārtiņas struktūras fototransformācija. Fokusētas zemspraugas gaismas gadījumā iegūtos rezultātus var izskaidrot ar fotostimulētu struktūras relaksāciju un ar D-centru fotoinducētu ģenerāciju un pārlādēšanu, bet nefokusētas zemspraugas gaismas gadījumā – ar D-centru fotoorientāciju un struktūras relaksāciju.

3. **Eksperimentāli izpētīts hologrāfisko režģu ieraksts dažāda sastāva azobenzola oligomēru (ABO) un stilbēna azosavienojumu molekulāro stiklu kārtiņās ar lineāri polarizētu 633 nm gaismu. Konstatēts, ka visos gadījumos tiek ierakstīti dinamiski tilpuma fāzes hologrāfiskie režģi ar relaksācijas laiku no pāris dienām līdz pāris gadiem. Ieraksta mehānisms galvenokārt ir hromoforu grupu dipolu momentu fotoorientācija perpendikulāri gaismas elektriskā lauka intensitātei, kas rada arī saistīto molekulāro segmentu nobīdes. Par šādu mehānismu liecina ieraksta nestabilitāte un tā fāzes raksturs, izteikta hologrāfisko režģu īpašību maiņa, ja maina gaismas polarizāciju, kā arī izteikta atkarība no hromoforu koncentrācijas.**

4. **Īstenots hologrāfisko režģu ieraksts ar nefokusētiem un fokusētiem stariem četru viļņu mijiedarbes ģeometrijā a-As₂S₃ un ABO [4-((4-nitrofenil) diazenil)-N,N-bis(2-(tetrahidro-2H-pirān-2-iloksi)etil)benzolanīna] kārtiņās. Fokusēts ieraksts šajā ģeometrijā, cik zināms, veikts pirmo reizi. Abos gadījumos augstāka invertētā viļņa efektivitāte tiek sasniegta fokusēta ieraksta gadījumā. Atšķirībā no tā, jutība ir lielāka fokusēta ieraksta gadījumā a-As₂S₃ kārtiņā, bet nefokusēta ieraksta gadījumā – ABO kārtiņā. Šī atšķirība ir izskaidrojama ar dažādu temperatūras paaugstināšanās ietekmi uz ieraksta mehānismiem. Temperatūras paaugstināšanās stimulē struktūras relaksāciju a-As₂S₃ kārtiņās, bet kavē hromoforu fotoorientāciju ABO kārtiņās.**

5. Eksperimentāli izpētīta hologrāfiskā ieraksta efektivitātes atkarība no ABO (toluila vai heksametilēna) hromoforu grupu piesaistes (kovalents vai disperģēts) veida matricai, jeb oligomēra pamatķēdei, un to koncentrācijas ABO kārtiņās uz poliuretāna un polistirola bāzes. **Konstatēts, ka vispār kovalenta hromoforu grupu piesaiste matricai ir efektīvāka un ka ir vēlama elastīgāka matrica ar lielāku brīvo tilpumu. Tajā pat laikā hologrāfiska režģa ieraksta efektivitāte ir arī lielā mērā atkarīga no hromoforu grupu koncentrācijas, pie kam pastāv koncentrācijas sliekšnis robežās starp 0,01 un 0,04 mol/l. Pēc tā sasniegšanas ieraksta efektivitāte ievērojami un aptuveni lineāri palielinās. Sliekšņa esamību var izskaidrot ar kooperatīvu hromoforu grupu mijiedarbi (to elektrisko dipolu momentu mijiedarbes dēļ).**

6. Lai gan vispār kovalenta hromoforu grupu piesaiste matricai nodrošina lielāku hologrāfiskā ieraksta efektivitāti, **ABO kārtiņas ar pietiekoši lielu disperģētu hromoforu grupu koncentrāciju var būt gandrīz tikpat efektīvas.** Disperģēšanas priekšrocība ir lielāks paraugu tehnoloģiskums un lielākas to standartizācijas iespējas.

7. ABO kārtiņās, kurās dialkiloazobenzola grupas tika disperģētas polistirola matricā bez kovalentas piesaistes, atrasts fotosensibilizācijas efekts. Tas izpaužas materiāla gaismasjutības pieaugumā hologrāfiskā režģa ieraksta vietā pēc tam, kad iepriekšējais hologrāfiskais režģis ir izdzisis.

8. Eksperimentāli un teorētiski izpētīts virsmas reljefa hologrāfisko režģu ieraksts kārtiņās ar azobenzola grupām kovalenti piesaistītām pie poliuretāna matricas, izmantojot 514,5 nm Ar^+ lāzera gaismu. Virsmas reljefa hologrāfisko režģu amplitūda sasniedza 35 nm. Secināts, ka ierakstu izskaidro fotoinducēta masas pārnese saskaņā ar hromoforu fotodegradācijas vai vidējā lauka mehānismu, ko inicē *trans-cis* fotoizomerizācija.

9. Eksperimentāli noskaidrots, ka organiskie molekulārie stikli uz stilbēna azosavienojumu bāzes ir perspektīvi materiāli hologrāfiskajam informācijas ierakstam spektra sarkanajā daļā (pašdifrakcijas efektivitāte sasniedz 17%, virsmas reljefa modulācijas amplitūda – 113 nm). Cik zināms, **pirmo reizi ir veikts virsmas reljefa hologrāfisko režģu ieraksts organiskos materiālos ar gaismu spektra sarkanajā daļā.** Galveno ieguldījumu difrakcijas efektivitātē tāpat kā citos pētītajos materiālos dod nestabili tilpuma amplitūdas-fāzes hologrāfiskie režģi. Virsmas reljefa hologrāfisko režģu ieraksta mehānismi stilbēna azosavienojumos visticamāk ir hromoforu fototermiskā degradācija un *trans-cis* fotoizomerizācija.

10. Noskaidrots, ka hologrāfiskā ieraksta efektivitāte stilbēna azosavienojumos ir nemonotona parauga vecuma funkcija. Pastāv optimālais vecums (ap 50 dienām), kad ir iespējams hologrāfiskā režģa ieraksts ar maksimālo

efektivitāti. Šis laiks nav atkarīgs no konkrēta ķīmiskā sastāva. Visticamāk, ka šo efektu nosaka stilbēna azobenzola savienojumu kārtiņu struktūras relaksācijas īpatnības, jo tās sastāv tikai no hromoforu molekulām, starp kurām ir liels brīvais tilpums.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Ashkin A., Dziedzic J. M., Bjorkholm J. E., Chu S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optical Letters*. – 1986. – Volume 11. – pp. 288-290.
2. Barrett C. J., Natansohn A. L., Rochon P. L. Mechanism of optically inscribed highefficiency diffraction gratings in azo polymer films// *Journal of Physical Chemistry*. – 1996. – Volume 100. – pp. 8836-8842.
3. Barrett C. J., Rochon P. L., Natansohn A. L. Model of laser-driven mass transport in thin films of dye-functionalized polymers// *Journal of Chemical Physics*. – 1998. – Volume 109. – pp. 1505-1516.
4. Bian S. P., Williams J. M., Kim D. Y., Li L. A., Balasubramanian S., Kumar J., Tripathy S. Photoinduced surface deformations on azobenzene polymer films// *Journal of Applied Physics*. – 1999. – Volume 86. – pp. 4498-4508.
5. Eichler H. J., Günter P., Pohl D. W. *Laser-Induced Dynamic Gratings*. – Berlin: Springer-Verlag, 1986. – 256 p.
6. Feinleib J., de Neufville J., Moss S. C., Ovshinsky S. R. Rapid reversible light-induced crystallisation of amorphous semiconductors// *Applied Physics Letters*. – 1971. – Volume 18. – pp. 254-257.
7. Fritzsche H. Photo-Induced Fluidity of chalcogenide glasses// *Solid State Communications*. – 1996. – Volume 99. – pp. 153-155.
8. Frumar M., Polak Z., Cernosek Z., Frumarova B., Wagner T. Photoinduced effects in amorphous chalcogenides// *Chemical Papers*. – 1997. – Volume 51. – pp. 310-327.
9. Fukuda T., Sumaru K., Yamanaka T., Matsuda H. Photo-induced formation of the surface relief grating on azobenzene polymers: Analysis based on the fluid mechanics// *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2000. – Volume 345. – pp. 263–268.
10. He J. A., Bian S., Li L., Kumar J., Tripathy S. K. Photochemical behavior and formation of surface relief grating on self-assembled polyion/dye composite film// *Journal of Physical Chemistry B*. – 2000. – Volume 104. – pp. 10513-10521.
11. Hisakuni H., Tanaka K. Optical fabrication of microlences in chalcogenide glasses// *Optics Letters*. – 1995. – Volume 20. – pp. 958-960.
12. Jiang X. L., Kumar J., Kim D. Y., Shivshankar V., Tripathy S. K. Polarization dependent recordings of surface relief gratings on azobenzene containing polymer films// *Applied Physics Letters*. – 1996. – Volume 68. – pp. 2618-2620.

13. Kim D. Y., Tripathy S. K., Li L., Kumar J. Laser-induced holographic surface relief gratings on nonlinear optical polymer films// *Applied Physics Letters*. – 1995. – Volume 66. – pp. 1166–1168.
14. Klein W. R., Cook B. D. Unified Approach to Ultrasonic Light Diffraction// *IEEE Transactions on Sonics Ultrasonics*. – 1967. – Volume 14. – pp. 123-134.
15. Kumar J., Li L., Jiang X. L., Kim D. Y., Lee T. S., Tripathy S. Gradient force: The mechanism for surface relief grating formation in azobenzene functionalized polymers// *Applied Physics Letters*. – 1998. – Volume 72. – pp. 2096–2098.
16. Lefin P., Fiorini C., Nunzi J. M. Anisotropy of the photoinduced translation diffusion of azo-dyes// *Optical Materials*. – 1998. – Volume 9. – pp. 323–328.
17. Mahadevan S., Giridhar A., Singh A. K. Chemical ordering and topological effects in chalcogenide glass systems// *Indian Journal of Pure and Applied Physics*. – 1995. – Volume 33. – pp. 643-652.
18. Matsui T., Oaki M., Yoshino K., Kajzar F. Fabrication of Flexible Distributed Feedback Laser Using Photoinduced Surface Relief Grating on Azo-Polymer Film as a Template// *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2002. – Volume 41. – pp. L1386-L1388.
19. Mott N. F., Davis E. A. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. 2nd edition. – New York: Oxford University Press, 1979. – 604 p.
20. Neilands O. *Organiskā ķīmija*. – Rīga: Zvaigzne, 1977. – 798 lpp.
21. Ogusu K., Hosokawa Y., Maeda S., Minakata M., Li H. Photo-oxidation of As₂Se₃, Ag-As₂Se₃, and Cu-As₂Se₃ chalcogenide films// *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2005. – Volume 351. – pp. 3132-3138.
22. Ozols A. O. Diffraction efficiency of thin amplitude-phase holograms// *Optics and Spectroscopy*. – 1977. – Volume 42. – pp. 93-96.
23. Ozols A., Kampars V., Reinfelds M., Kokars V. Hologram recording in azobenzene oligomers// *Proceedings of SPIE*. – 2003. – Volume 5123. – pp. 102-109.
24. Ozols A., Kokars V., Augustovs P., Uiska I., Traskovskis K., Mezinskis G., Pludons A., Saharov D. Polarization dependence of holographic recording in glassy azocompounds// *Lithuanian Journal of Physics*. – 2010. – Volume 50. – pp. 17-25.
25. Ozols A., Nordman N., Nordman O. Mechanisms of holographic recording in amorphous semiconductor films// *Proceedings of SPIE*. – 1998. – Volume 3347. – pp. 247-258.
26. Ozols A., Nordman N., Nordman O., Riihola P. Model of holographic recording in amorphous chalcogenide films using subband-gap light at room temperature// *Physical Review B*. – 1997. – Volume 55. – pp. 14236–14244.

27. Ozols A., Nordman N., Salminen O., Riihola P. Holographic recording in amorphous semiconductor films// *Proceedings of SPIE*. – 1997. – Volume 2968. – pp. 282-291.
28. Ozols A., Ozols K., Ivanovs G. Phase conjugation properties of a-As-S-Se films// *Proceedings of SPIE*. – 2006. – Volume 6180. – pp. 61801O.1-6101O.6.
29. Ozols A., Reinfelds M., Kampars V., Kokars V. Structure optimization of azobenzene oligomers for holography// *Physica Status Solidi (c)*. – 2005. – Volume 2. – pp. 673-676.
30. Ozols A., Reinfelds M., Saharov D., Kundzins K., Kampars V., Kokars V. Holographic recording of surface relief gratings in tolyle-based azobenzene oligomers// *Thin Solid Films*. - 2008. – Volume 516. – pp. 8887-8892.
31. Ozols A., Saharov D. Sub-bandgap light hologram recording in amorphous chalcogenides. *Proceedings of SPIE*. – 2007. – Volume 6596. – pp. 65961C-1 - 65961C-6.
32. Ozols A., Saharovs Dm., Reinfelds M. Holographic recording in amorphous As₂S₃ films at 633 nm// *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2006. - Volume 352. – pp. 2652-2656.
33. Ozols A., Salminen O., Riihola P., Mönkkönen P. Nonlinear exposure dependence of the holographic recording and relaxational structural changes in amorphous As₂S₃ films// *Journal of Applied Physics*. – 1996. – Volume 79. – pp. 3397-3402.
34. Pedersen T. G., Johansen P. M., Holme N. C. R., Ramanujam P. S., Hvilsted S. Mean-Field Theory of Photoinduced Formation of Surface Reliefs in Side-Chain Azobenzene Polymers// *Physical Review Letters*. – 1998. – Volume 80. – pp. 89-92.
35. Righini G. C., Verciani A., Pelli S., Guglielmi M., Martucci A., Fick J., Vitrant G. Sol-gel glasses for nonlinear optics// *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*. – 1996. – Volume 5. – pp. 655-666.
36. Rochon P., Batalla E., Natansohn A. Optically induced surface gratings on azoaromatic polymer films// *Applied Physics Letters*. – 1995. – Volume 66. – pp. 136-138.
37. Saharov D., Ozols A. DFWM of focused laser beams in a-As₂S₃ and azobenzene oligomer films// *Journal of Material Science: Materials in Electronics*. – 2009. – Volume 20. – pp. S395-S399.
38. Saharov D., Ozols A., Kokars V., Kampars V., Mezinskis G., Maleckis A., Pludons A., Jansone M. Relaxation effect of stilbene azobenzene derivatives on their holographic properties// *Journal of Physics: Conference Series*. – 2007. – Volume 93. – p. 012029.
39. Saliminia A., Galstian T. G., Villeneuve A. Optical Field-Induced Mass Transport in As₂S₃ Chalcogenide Glasses// *Physical Review Letters*. – 2000. – Volume 85. – pp. 4112-4115.
40. Schwartz K. *The Physics of Optical Recording*. – Berlin: Springer-Verlag, 1993. – 191 p.

41. Sekkat Z., Knoll W. Photoreactive organic thin films. – New York: Academic Press, 2002 – 560 p.
42. Suhara T., Nishihara H., Koyama J. Hologram recording in amorphous semiconductor films// Electronics and Communications in Japan. – 1976. – Volume J59-C. – pp. 116-122.
43. Sumaru K., Yamanaka T., Fukuda T., Matsuda H. Photoinduced surface relief gratings on azopolymer films: Analysis by a fluid mechanics model// Applied Physics Letters. – 1999. – Volume 75. – pp. 1878–1880.
44. Tanaka K. Photoinduced processes in chalcogenide glasses// Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 1996. – Volume 1. – pp 567-571.
45. Tanaka K., Hisakuni H. Photoinduced phenomena in As_2S_3 glass under sub-bandgap excitation// Journal of Non-Crystalline Solids. – 1996. – Volumes 198-200. – pp. 714-718.
46. Tanaka K., Ohtsuka Y. Composition dependence of photo-induced refractive index changes in amorphous As-S films// Thin Solid Films. – 1979. – Volume 57. – pp. 59-64.
47. Teteris J. Holographic recording in amorphous chalcogenide semiconductor films// Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2002. – Volume 4. – pp. 687-697.
48. Tikhomirov V. K., Asatryan K., Galstian T. V., Vallee R., Seddon A. B. Photoinduced volume changes related to photoinduced anisotropy in chalcogenide glasses. Philosophical Magazine Letters. – 2003. – Volume 83. – pp. 117-124.
49. Tripathy S. K., Kumar J., Kim D. Y., Li L., Xiang X. L. Novel photoprocessing using photo-dynamic azobenzene polymers// Naval Research Reviews. – 1997. – Volume 2. – pp. 1-9.
50. Turnbull D. Phase stability of glasses// Journal of Non-Crystalline Solids. – 1988. - Volume 102. – pp. 117-124.
51. Valters R. Organiskā ķīmija (pamatkurss). - Rīga: RTU Izdevniecība, 2007. - 187 lpp.
52. Viswanathan N. K., Balasubramanian S., Li L., Kumar J., Tripathy S. K. Surface-Initiated Mechanism for the Formation of Relief Gratings on Azo-Polymer Films// The Journal of Physical Chemistry B. – 1998. – Volume 102. – pp. 6064-6070.
53. Wikipedia. The Free Encyclopedia: Polystyrene / Internet. - <http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>
54. Zhao Y., Ikeda T. Smart Light-Responsive Materials: Azobenzene-Containing Polymers and Liquid Crystals. - Hoboken, New Jersey, US: John Wiley and Sons, 2009. – 522 p.
55. Клингер М. И. Низкотемпературные свойства и локализованные электронные состояния стёкол. – 1987. – Успехи Физических Наук. – Том 152. – стр. 623-652.

56. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – Москва: Мир, 1973. – 686 с.
57. Лягичев И. Я., Литвак И. И., Ощепов Н. А. Приборы на аморфных полупроводниках и их применение. – Москва: Советское радио, 1976. – 127 с.
58. Степанов Б. И. Введение в химию и технологию органических красителей. – Москва, Химия, 1984 – 592 с.
59. Тугов И. И., Костыркина Г. И. Химия и физика полимеров. – Москва: Химия, 1989. – 432 с.
60. Физическая Энциклопедия/ Гл. ред. Прохоров А. М. – Москва: Советская энциклопедия, т.1. – 1988. – 704 с.
61. Шабаров Ю. С. Органическая химия: Часть 1. Нециклические соединения. Москва: Химия, 1994. – 496 с.
62. Шварц К. К. Физика оптической записи в диэлектриках и полупроводниках. – Рига: Зинатне, 1986. – 232с.
63. Шварц К. К., Готлиб В. И., Кристалсон Я. Ж. Оптические регистрирующие среды. Рига: Зинатне, 1976. – 184 с.