

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
CIETVIELU FIZIKAS INSTITŪTS



UĢIS GERTNERS

**AMORFO HALKOGENĪDU VIRSMAS FOTO
INDUCĒTĀ MODULĀCIJA**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē

Apakšnozare: cietvielu fizika

Rīga, 2015

Latvijas Universitāte
Cietvielu fizikas institūts

Uģis Gertners

AMORFO HALKOGENĪDU VIRSMAS FOTO
INDUCĒTĀ MODULĀCIJA

Promocijas darba kopsavilkums

Doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē
Apakšnozare: cietvielu fizika

Rīga, 2015

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūtā laika posmā no 2010. gada līdz 2014. gadam.



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**
ANNO 1919

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

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, trīs nodaļām, darba secinājumiem, aizstāvamām tēzēm un 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) *Dr. habil. phys. Andrejs Cēbers*, profesors, Latvijas Universitāte;
- 2) *Dr. habil. phys. Andris Ozols*, profesors, Rīgas Tehniskā universitāte;
- 3) *Dr. phys. Vjačeslavs Gerbreders*, vadošais pētnieks, Inovatīvās mikroskopijas centrs, Daugavpils Universitāte;

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Fizikas, astronomijas un mehānikas zinātņu nozares promocijas padomes atklātā sēdē 2015. gada 17. aprīlī, pulksten 15:00, Ķengaraga ielā 8, konferenču zālē.

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, 2015
© Uģis Gertners, 2015

ISBN 978-9984-45-971-4

ANOTĀCIJA

Amorfo halkogenīdu pusvadītāju (As-S, As-Se, Ge-S, Ge-Se u.c.) plānās kārtiņas izraisa pieaugošu interesi kā perspektīvi materiāli informācijas optiskam ierakstam un apstrādei. Būtiskas optisko īpašību foto inducētās izmaiņas, kā laušanas koeficienta (Δn līdz 0.8), viskozitātes, mikrocietības un zonas platuma izmaiņas (ΔE_g līdz 0.4eV), šajos materiālos dod iespēju veikt kā fāzu tā arī amplitūdas ierakstu plānās kārtiņās. Foto inducētās izmaiņas halkogenīdu pusvadītājos saistītas ar ķīmisko saišu transformāciju, kas arī nosaka šo materiālu augsto izšķiršanas spēju ($\sim 10^4 \text{ mm}^{-1}$) [1-3]. Šīs uzskaitītās lietas arī padara amorfos halkogenīdus kā konkurētspējīgus materiālus gan optiskajam ierakstam hologrāfijā, gan virsmas reljefa optisko elementu veidošanā nanolitogrāfijā, gan datu pārraidē un uzglabāšanā informācijas tehnoloģijās [4-5]. Nesenie pētījumi rāda, ka gaismas iedarbībā mīkstos materiālos (kā amorfajos halkogenīdos) veidojas ievērojamas deformācijas [6], kas saistītas ar to jutību pret starojumu. Šis process ir atgriezenisks un iegūtās deformācijas nav blīvuma efekts, jo ierakstu ir iespējams dzēst gan termāli-izkarsējot [6], gan arī optiski-izgaismojot [7] paraugu. Uz šīs parādības pamata arī balstās promocijas darbs, kura mērķis ir izpētīt amorfo halkogenīdu jutību pret gaismu. Kā viena no izpētes metodēm tiks izmantots *tiešais* hologrāfiskais ieraksts, *t.i.*, virsmas reljefa jeb hologrāfisko režģu veidošana halkogenīdos tieši ieraksta laikā bez jebkādas papildus apstrādes kā, piemēram, kodināšanas. Šīs metodes pilnīga izstrāde paver plašas pielietojuma iespējas optisko elementu ražošanā un pielietošanā, kā arī jaunu un inovatīvu tehnoloģiju ieviešanā. Vēl joprojām daudz interesantas parādības amorfajos halkogenīdos nav labi izprastas un izskaidrotas mikroskopiskā līmenī [8-9], un tāpēc šī darba uzdevumi būs tieši saistīti ar šo procesu izpēti. Darbā arī tiks apzināta ieraksta efektivitātes atkarība no tā parametriem (intensitātes, polarizācijas) un ieraksta apstākļiem. Iegūtajām nanostrukturām tiks pētītas to optiskās īpašības- caurlaidība, atstarošanās, difrakcijas efektivitāte u.c. Iegūtās struktūras tiks skatītas ar atomspēku mikroskopijas palīdzību, nosakot to formu un izmērus.

SATURS

ANOTĀCIJA	3
SATURS	4
VISPĀRĪGAIS DARBA RAKSTUROJUMS	6
Darba aktualitāte un pētījuma novitāte	6
Darba mērķis un uzdevumi	7
Autora ieguldījums	7
1. LITERATŪRAS APSKATS	9
2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA	12
2.1. Pētāmie paraugi un mērījumu metodes	12
2.2. Mērījumu metodika	12
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	14
3.1. Tiešais ieraksts un tā izpēte ar hologrāfiskām metodēm	14
3.1.1. <i>Tiešais ieraksts amorfās plānās kārtiņās</i>	<i>14</i>
3.1.2. <i>Plakanu viļņu interferences datora vizualizācija</i>	<i>16</i>
3.1.3. <i>Daudzstaru hologrāfijas eksperimentu salīdzinājums ar teoriju</i>	<i>16</i>
3.1.4. <i>Halkogenīdu foto inducētās mīkstināšanās iespaids uz tiešo hologrāfisko ierakstu</i>	<i>18</i>
3.1.5. <i>Polarizācijas ietekme hologrāfiskā režģa ierakstam un papildus apgaismojumam</i>	<i>20</i>
3.1.6. <i>Teorētiskais polarizācijas sadalījums divu staru interferences gadījumam</i>	<i>21</i>
3.1.7. <i>Masas pārneses virzieni hologrāfiskā ieraksta laikā, pamatojoties uz materiāla dubultlaušanu</i>	<i>24</i>
3. 2. Tiešais ieraksts un tā izpēte pēc parauga apstarošanas caur šauru spraugu	26
3.2.1. <i>Masas pārneses virzieni</i>	<i>27</i>

3.2.2. <i>Optiskās spraugas eksperimentu ieraksta attīstība laikā</i>	28
3.2.3. <i>Optiskās spraugas eksperimentu apkopojums</i>	29
SECINĀJUMI	31
AIZSTĀVAMĀS TĒZES	33
LITERATŪRAS SARAKSTS	34
AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS	38
SCI publikācijas par promocijas darba tēmu	38
Citas publikācijas par promocijas darba tēmu	38
DALĪBA ZINĀTNISKĀS KONFERENCĒS	40
PATEICĪBA	42

VISPĀRĪGAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte un pētījuma novitāte

Ātra, atgriezeniska un vienas pakāpes virsmas tiešā strukturēšana ir atklāta un tiek aktīvi pētīta dažādos gaismu jutīgos materiālos, bet tā fizikālā interpretācija un pilnīgs ieraksta mehānisma modelis nav vēl pilnībā saprasts [8-9]. Šī procesa pilnīga izziņāšana sniedz plašas pielietojuma iespējas dažādās iekārtās gan virsmas nano/mikro strukturēšanai, gan arī kā jau gatavas sastāvdaļas iekārtu sastāvā. Iegūtie režģi jau ir tikuši demonstrēti kā optiskie polarizatori [10], leņķiskie vai spektrālie filtri [11-12], pārejas optiskajām ierīcēm [13], difraktometros, spektrometros un citās ierīcēs. Tiek piedāvāti arī risinājumi fotoniskajiem kristāliem [14] un arī tiek izmantoti lāzeru ražošanai, kur viļņa garums ir maināms atkarībā no režģa ģeometriskajiem parametriem [15-16]. Tiešā ieraksta tehnika, protams, var tik izmantota arī datu uzglabāšanas ierīcēs [17]. Ātrs, viena soļa tiešais hologrāfiskais ieraksts tiek piedāvāts kā risinājums momentānu hologrammu veidošanā [18] (no angļu val., *instant holography*), kas noteikti var atrast praktisku pielietojumu dažādās sfērās. Šie ir tikai daži varianti no iespējām, ko spēj dot vai uzlabot tiešās ieraksta metodes un tāpēc tas ir tik svarīgi, lai turpinātos šī procesa pilnīgāka izpēte. Arī šis promocijas darbs ir veltīts tiešā ieraksta iespēju padziļinātai izpētei gaismu jutīgos amorfos halkogenīdos. Darba pētījumu novitāte iekļauj sevī sekojošas daļas:

- Attēlota tiešā hologrāfiskā ieraksta dzēšana ar to pašu ieraksta iekārtu, pārbīdot interferences ainu par pusi no tā perioda;
- Iegūts daudzstaru (trīs un četrstaru) interferences jeb hologrāfiskā ieraksta intensitātes sadalījums plašā interferējošo gaismas avotu polarizāciju diapazonā, kā arī caurskatāmi attēlots dotā teorētiskā modeļa iegūšanas process;
- Pirmo reizi ir iegūta detalizēta divstaru tiešā hologrāfiskā ieraksta efektivitātes atkarība no papildus apgaismojuma, tā intensitātes un polarizācijas, kā arī iegūta atkarība no ierakstošo staru polarizācijām ar un bez papildus apgaismojuma;
- Iegūts detalizēts divstaru interferences jeb hologrāfiskā ieraksta intensitātes, kā arī polarizācijas sadalījums plašā interferējošo gaismas avotu polarizāciju diapazonā un izanalizēts dotā intensitātes sadalījuma polarizācijas spektrs, kā arī caurskatāmi attēlots dotā teorētiskā modeļa iegūšanas process;

- Izskaidrots masas pārnese process hologrāfiskā ieraksta laikā, pamatojoties uz materiāla fotoinducēto dubultlaušanu un difrakcijas efektivitātes kopsakarībām;
- Pirmo reizi veikti masas pārnese eksperimenti, izmantojot taisnstūrveida gaismas intensitātes sadalījumu, kas iegūts no šauras spraugas;
- Iegūts detalizēts taisnstūrveida gaismas intensitātes sadalījuma tiešā ieraksta eksperimentu apkopojums pie dažādām gaismas intensitātes gradienta un/vai papildus apgaismojuma polarizācijām, intensitātēm un ekspozīcijas laikiem.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir padziļināti pētīt amorfo halkogenīdu plāno kārtiņu mehānisko un optisko īpašību izmaiņas optiskā starojuma iespaidā, pievēršot uzmanību starojuma viļņa garumam, intensitātei un polarizācijai. Lai sasniegtu darba mērķi, nepieciešams veikt šādus uzdevumus:

1. Iegūt amorfo halkogenīdu (As-S, As-S-Se un Ge-Se savienojumi) plānās kārtiņas ar vakuumuzputināšanas iekārtu;
2. Izpētīt kārtiņu optiskās īpašības un pārbaudīt tiešā ieraksta iespējas tajos;
3. Gan teorētiski, gan eksperimentāli izpētīt daudzstaru tiešā hologrāfiskā ieraksta iespējas amorfajos halkogenīdos;
4. Izpētīt tiešo hologrāfisko ierakstu amorfās halkogenīdu kārtiņās, kā arī izpētīt ieraksta atkarību no gaismas intensitātes, polarizācijas un paraugu mīkstināšanās temperatūras;
5. Noteikt iegūto struktūru formu un izmērus atkarībā no dažādiem ieraksta parametriem;
6. Teorētiski izpētīt intensitātes un polarizācijas sadalījumu hologrāfiskā ieraksta laikā un salīdzināt dotos rezultātus ar režģu ieraksta efektivitāti;
7. Noteikt masas pārnese virzienus hologrāfiskā ieraksta laikā;
8. Izmantojot taisnstūrveida gaismas intensitātes sadalījumu, izpētīt tiešā ieraksta iespējas un masas pārnese virzienus pie dažādām gaismas intensitātēm, polarizācijām un ieraksta laikiem.

Autora ieguldījums

Visi pētījumi tika veikti Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūtā Optiskā ieraksta laboratorijā un Virsmas fizikas laboratorijā. Autors pats veica visus promocijas darbā aplūkotos eksperimentus, piemēram, absorbcijas spektru uzņemšana, tiešā hologrāfiskā ieraksta veikšana un optiskās spraugas tiešā ieraksta veikšana. Doto eksperimentu rezultātus autors ieguvis plašā mainīgo (polarizācijas, intensitātes u.c.) apgabalā, kā arī apkopojis un izpētījis eksperimentos iegūtos datu masīvus. Darbu pie atomspēku mikroskopa un augstas izšķirtspējas optiskā mikroskopa autors ir veicis Virsmas fizikas laboratorijā. Teorētiskie aprēķini un iegūtie modeļi gaismas, kā arī polarizācijas sadalījumiem arī ir autora darbs. Autors pētījumu analizēšanu un secinājumu izdarīšanu veica un apsprieda kopā ar sava darba vadītāju. Iegūtos rezultātus autors ir prezentējis starptautiskās un vietēja mēroga konferencēs. Lielāko daļu publikācijas autors ir pats rakstījis un iesniedzis publicēšanai zinātniskos citējamos žurnālos.

1. LITERATŪRAS APSKATS

Gaismas un materiāla mijiedarbes pētīšanas process sākas ar pašu paraugu meklēšanu un laboratorijas iespēju robežu apzināšanu. Pētāmajam paraugam, kā hologrāfiskā ieraksta materiālam, jābūt pietiekoši gaismu jutīgam un ar potenciālu virsmas reljefa modulēšanai tieši optiskā ieraksta laikā. Visus šādus materiālus var iedalīt divās lielās grupās: organiskie un neorganiskie materiāli. Šajā darbā tika izvēlēti neorganiskie materiāli, precīzāk, amorfie halkogenīdi (galvenokārt As_2S_3). Halkogenīdu pusvadītājus veido ķīmiskās tabulas VI. grupas elementu halkogēnu (S, Se, Te) kovalenti sasistītu ar blakus V. grupas (P, As, Sb, Bi), kā arī ar IV. grupas (Si, Ge) elementiem. Tie var būt divu, trīs un vairāku elementu savienojumi. Piemēram: As-S, As-Se, As-S-Se, As-S-I, As-Te-Si-Ge u.c. Halkogenīdi var atrasties gan kristāliskajā, gan amorfajā stāvoklī [2, 19].

Neskatoties uz to, ka ir iegūti salīdzinoši daudz tiešā ieraksta eksperimentu rezultātu veselai virknei neorganisko materiālu (tai skaitā amorfos halkogenīdu pusvadītājos) [20-31] kā arī dažādos gaismu jutīgos organiskajos azo molekulu savienojumos [32-44], pilnīgs un visaptverošs ieraksta mikroskopiskais modelis vai mehānisms vēl joprojām nav atrasts. Līdz šim visko-elastiskais (jeb viskozas masas plūsmas) ieraksta modelis, tieši neaprašot mikroskopiskos spēkus, ir ļoti labi sakritis ar eksperimentāli novērotajiem tiešajiem optisko ierakstu rezultātiem [45]. Vēlāk modelī tika ņemts vērā kārtiņas biezums un ātruma sadalījums kārtiņas iekšienē [46-47], kas modelī noteica ieraksta efektivitāti jeb ieraksta dziļuma atkarību no kārtiņas biezuma. Nākamajā uzlabojumā tika ņemta vērā foto inducētā anizotropija [48], kas turpmāk labi aprakstīja anizotropās deformācijas dažādos eksperimentos [49]. Galīgo elementu lineārais visko-elastiskais modelis sevī ietver arī galīgu saspiežamību [50], no kura izriet arī fakts, ka virsmas spraigums darbojas kā pretspēks virsmas reljefa veidošanai, kas savukārt izskaidro ieraksta piesātinājuma efektu. Visbeidzot, reljefa veidošanās kinētika jeb nelineārā visko-elastiskā plūsma un deformācijas tika iegūtas ar šūnas Monte Carlo simulācijas metodi [51-53]. Lai cik labs būtu visko-elastiskais modelis, tas tomēr nedod priekšstatu par tajā iesaistītajiem spēkiem un to dabu, līdz ar to joprojām notiek aktīva pētniecība pie mikroskopisko spēku izcelsmes materiālā noskaidrošanas.

Tālāk tiks apskatīti līdz šim populārākie modeļi, kas, iespējams, apraksta foto inducētos spēkus un to virzienus kā rezultātā tiek novērota masas pārnese kādā noteiktā virzienā. Neviens no turpmāk minētajiem modeļiem nav pilnīgs un visaptverošs - katram ir savi trūkumi, kuru dēļ ir

nepieciešama turpmāka šī procesa padziļināta izpēte. Tā kā tiešais ieraksts salīdzinoši vairāk ir pētīts organiskajos materiālos, arī šie modeļi galvenokārt izveidoti balstoties uz organiskajiem azo savienojumiem, bet tos ir iespējams arī vispārināt uz visiem gaismas jutīgiem materiāliem.

Asimetriskās difūzijas modelis

Vienkāršu anizotropu masas pārnese mehānismu pirmais aprakstīja Lefins ar kolēģiem 1998. gadā [54-55]. Šajā modelī masas pārnese tiek novērota azo savienojumos sakārtotības gradienta iespaidā. Pēc nejauša pārvietojuma principa molekulas, kas satur hromoforus, ātras *trans-cis* pārslēgšanās jeb izomerizācijas rezultātā pārvietojas galvenokārt savas garākās ass virzienā. Šo procesu apraksta difūzijas vienādojums. Pārvietojuma varbūtība ir proporcionāla molekulu izomerizācijas varbūtībai, kas, protams, ir atkarīga no gaismas intensitātes un leņķa starp molekulu asīm un gaismas polarizācijas virzienu. Šis modelis paredz molekulu plūsmu prom no apgaismotajiem apgabaliem uz neapgaismotiem, kas arī sakrīt ar eksperimentu rezultātiem. Tomēr pretēji eksperimentos novērotajam, asimetriskās difūzijas modelis paredz labākos rezultātus nevis polimēriem, bet gan mazmolekulārajiem savienojumiem.

Vidējā lauka modelis

Mehānisms, kas balstās uz elektromagnētiskajiem spēkiem, ir visai daudzsološs, jo tas jau pamatā iekļauj izmantotā starojuma intensitāti un tā polarizāciju. Šo modeli pirmais aprakstīja Pedersens ar kolēģiem 1998. gadā [56-57]. Organiskajos azo savienojumos hromofori atrodas kaimiņu hromoforu dipola momenta radītā potenciālā. Vidējā lauka modelī gaisma orientē hromoforus noteiktā virzienā un, vienādi orientētu dipolu pievilkšanās spēku rezultātā, hromofori pievelkas viens pie otra. Šāds modelis paredz masas pārnesei gaismas virzienā, tādējādi iegūtā reljefa maksimumi sakrīt ar gaismas intensitātes maksimumiem, kas izpildās šķīdros kristālos, bet ne vienmēr eksperimentāli izpildās amorfos halogēnīdos vai amorfos polimēros.

Dielektriskās caurlaidības (ϵ) gradienta modelis

Modeli, balstīti uz dielektriskās caurlaidības ϵ telpisku sadalījumu, pirmais ir aprakstījis Baldus 2001. gadā [58]. Šeit tiek pieņemts, ka kārtiņā tiek inducēts telpiski sadalīts laušanas koeficients, kas savukārt ir saistīts ar telpiski sadalītu dielektrisko caurlaidību. Šāds pieņēmums ir pilnībā pamatots, jo lielākā daļa gaismu jutīgo organisko un neorganisko materiālu raksturojas ar foto-orientācijas īpašību un foto inducēto dubultlaušanu. Elektriskais lauks un dielektriskās caurlaidības gradients rada spēku:

$$\vec{f} = -\frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2 \nabla \epsilon \quad 1-1$$

Dotais spēks ir proporcionāls dielektriskās caurlaidības gradientam un elektriskā lauka intensitātei masas pārnesei virzienā. No formulas seko, ka masa tiek bīdīta prom no dielektriskās caurlaidības gradienta, kas vairums gadījumos nozīmē masas pārnesei virzienā uz neapgaismoto vietu. No šī modeļa seko, ka jebkurai sistēmai ar telpiski sadalītu laušanas koeficientu vajadzētu būt iespējai veidot tiešos ierakstus, bet vēl nekas tāds literatūrā nav aplūkots.

Elektriskā lauka intensitātes gradienta spēka modelis

Kumars ar kolēģiem ieviesa mehānismu balstītu uz novērojumiem, ka veiksmīgam tiešajam ierakstam ir nepieciešama elektriskā lauka komponente masas pārnesei virzienā [59-62]. Šādu modeli var aprakstīt ar optiskā gradienta spēku [63-64]. Telpisks gaismas sadalījums jeb elektriskā lauka intensitātes un orientācijas sadalījums noved pie dielektriskās uzņēmības χ sadalījuma uz kārtiņas virsmas. Elektriskais lauks polarizē materiālu un inducētā polarizācija ir saistīta ar izmantotās gaismas intensitāti un lokālo dielektrisko uzņēmību χ :

$$\vec{P}_i = \epsilon_0 \chi \vec{E}_j, \quad 1-2$$

kur \vec{P}_i ir polarizācija, ϵ_0 ir dielektriskā caurlaidība vakuumā, χ ir kārtiņas dielektriskā uzņēmība un \vec{E}_j ir gaismas radītais elektriskais lauks. Līdzīgi kā uz dipolu elektriskajā laukā darbojas spēks, tā pat arī šajā gadījumā no gaismas lauka parādās spēki polarizētā materiālā. Laikā vidējots spēks ir ar sekojošu izskatu [61]:

$$\vec{f} = \langle (\vec{P} \cdot \nabla) \vec{E} \rangle \quad 1-3$$

No šīs formulas redzam, ka ieraksta efektivitāte ir saistīta ar kārtiņas dielektriskās uzņēmības telpisko sadalījumu, elektriskā lauka lielumu un tā intensitātes gradientu. Elektriskā lauka intensitātes gradienta spēka modelis sevī iekļauj ierakstu atkarībā no izmantotās gaismas polarizācijas un tādējādi labi apraksta eksperimentos novēroto polarizācijas atkarību. Savukārt citā literatūrā tiek aprakstīts, ka dotais spēks ir nepietiekams masas pārnesei reālā sistēmā [50].

2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

2.1. Pētāmie paraugi un mērījumu metodes

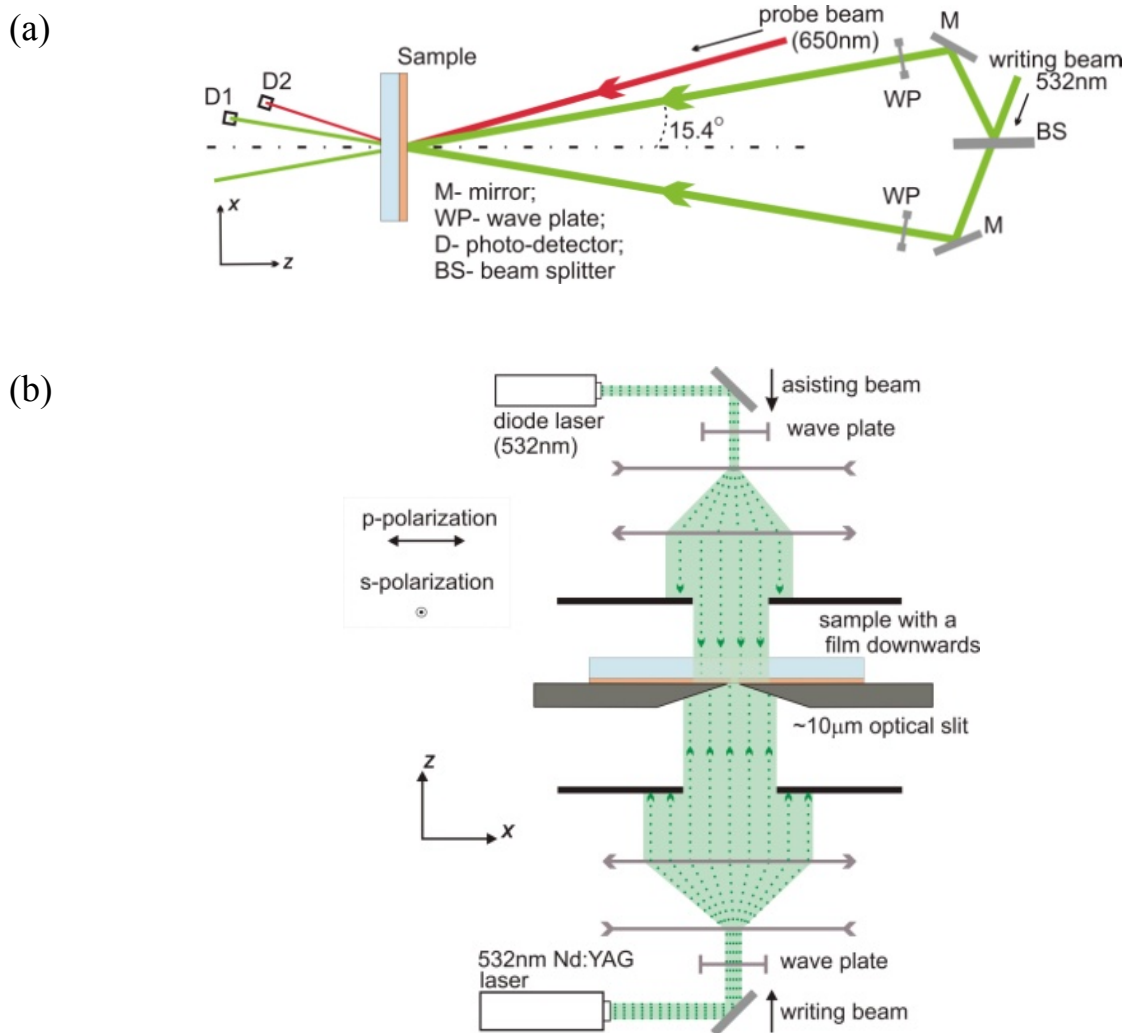
Promocijas darbam tika apkopota informācija par amorfajiem halkogenīdiem, kuru sastāvs atbilst formulai As_2S_3 , kā arī $As_4S_{1.5}Se_{4.5}$ un $GeSe_3$ rezisti. Fotorezists ar kārtiņas biezumu 1.7-3.3 μm tika iegūts ar kondensācijas metodi uz stikla pamatnes pēc iztvaicēšanas vakuumā ($\sim 5 \times 10^{-5}$ Torr). Kā iztvaicētāju lietoja tantāla laiviņu, kurā tika ievietots sintezētais materiāls.

Kārtiņas biezums un liela perioda virsmas reljefs tika noteikts ar profilometra *Veeco Dektak 150* palīdzību. Kārtiņas vizuālo īpašību novērtēšanai un virsmas topogrāfijas izpētei, uzņemot mikro-foto attēlus, tika izmantots augstas izšķirtspējas optiskais mikroskops *NIKON ECLIPSE L150* un *Veeco AFM CP-II* atomspēku mikroskops. Savukārt kārtiņu caurlaidības spektri tika noteikti 250 – 800nm diapazonā ar spektrometra *Ocean Optic HR4000CG* palīdzību.

2.3. Mērījumu metodika

Promocijas darba rezultāti sastāv no trim daļām, kur pirmā daļa ir veltīta darbā izmantoto plāno kārtiņu izpētei. Tiks noteikts kārtiņu absorbcijas spektrs, pēc kura tiks izvēlēti noteikta viļņa garuma lāzeri tiešā ieraksta izpētei tajos. Pārlicināsimies par tiešā ieraksta procesa atgriezeniskumu, dzēšot ierakstu pēc principiāli jaunas tehnikas. Ieraksta dzēšanas iespēja, savukārt liecina par masas fizisku pārnesi nevis par ieraksta blīvuma vai tilpuma efektu. Atgriezeniskuma faktors ir vitāli svarīgs posms promocijas darbam, jo viss darbs turpmāk balstīsies uz masas pārneses procesu izpēti amorfajos halkogenīdos.

Otrā daļā apskatīsimies uz tiešā jeb viena soļa (apejot ķīmiskās kodināšanas procesu) virsmas reljefa hologrāfisko ierakstu un tā efektivitāti (ieraksta principiālā shēma 2.1a. att.). Tiks sīkāk apskatīts režģa veidošanās process, tā īpatnības- atkarība no polarizācijas un parauga mīkstināšanās temperatūras. Lai samazinātu parauga viskozitāti un palielinātu tā plūstamību, tiks izmantots neatkarīgs gaismas avots, kas režģa ieraksta laikā apgaismos paraugu. Pārlicināsimies par šī papildus apgaismojuma viļņa garuma un polarizācijas izvēles būtisko ietekmi uz tiešo virsmas reljefa hologrāfisko ierakstu. Pamatojoties uz materiāla dubultlaušanu, ar netiešiem mērījumiem tiks noskaidroti masas pārneses



2.1. attēls. (a) hologrāfiskā ieraksta un (b) 10µm optiskās spraugas reljefa ieraksta principiālā shēma

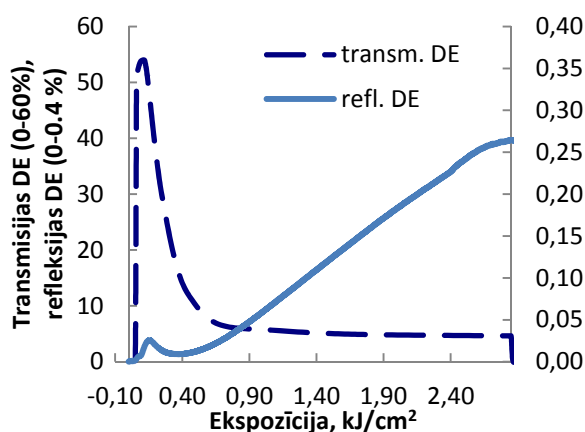
virzieni tiešā hologrāfiskā ieraksta laikā. Tiks iegūts plakānu viļņu interferences intensitātes, kā arī polarizācijas sadalījuma teorētiskais modelis, kas būtiski atvieglos eksperimentālo datu analīzi šajā daļā.

Trešajā daļā tiks apkopoti rezultāti par taisnstūrveida gaismas intensitātes sadalījuma ietekmi uz dotajiem paraugiem (ieraksta principiālā shēma 2.1b. att.). Šāda veida gaismas sadalījums tiks nodrošināts izmantojot šauru, aptuveni 10µm platu optisko spraugu. Dotā iekārta ļauj ar tiešiem mērījumiem noteikt ieraksta procesu virzību atkarībā no jebkura parametra, tai skaitā intensitātes, polarizācijas vai ekspozīcijas laika. Ieraksta iekārtas shēmas uzbūve ir ļoti vienkārša un raksturojas ar labu izturību pret vibrācijām, lāzera intensitātes svārstībām un sliktu vai neesošu koherenci, kas kopumā garantē ļoti precīzus un akurātus rezultātus.

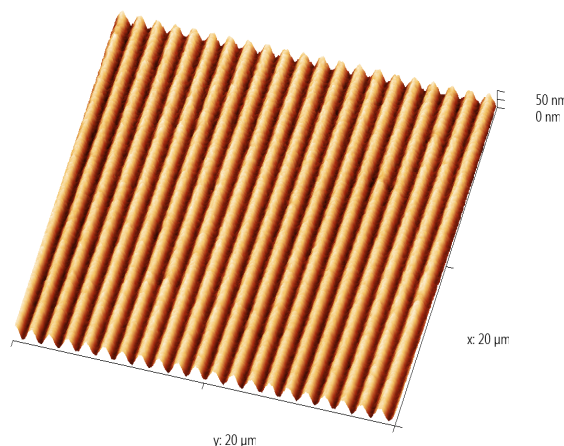
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Tiešais ieraksts un tā izpēte ar hologrāfiskām metodēm

Tipisks virsmas reljefa (SRG) ieraksta process un iegūtais ieraksts plānās amorfās As_2S_3 kārtiņās ir redzams 3.1. un 3.2. attēlā. Šajā gadījumā interferējošie stari ir p polarizēti un to intensitāte $0.2W/cm^2$. Tā kā absorbcijas un/vai laušanas koeficienta foto inducētās izmaiņas ir salīdzinoši ātrs process, transmisijas difrakcijas efektivitāte (DE jeb η) sasniedz maksimumu dažās sekundēs (3.1. att., pārtrauktā līkne pie $\sim 55\%$). Turpinot apstarot paraugu, tilpuma ieraksta kontrasts pasliktinās un transmisijas DE vērtība krītas un tajā pašā laikā refleksijas DE (3.1. att., nepārtrauktā līkne pēc pirmā nelielā pīķa) sāk pieaugt, kas liecina par virsmas reljefa veidošanos.



3.1. attēls. Tipisks p polarizācijas hologrāfiskā ieraksta procesa attēlojums uzņemot transmisijas (650nm) un refleksijas (405nm) DE

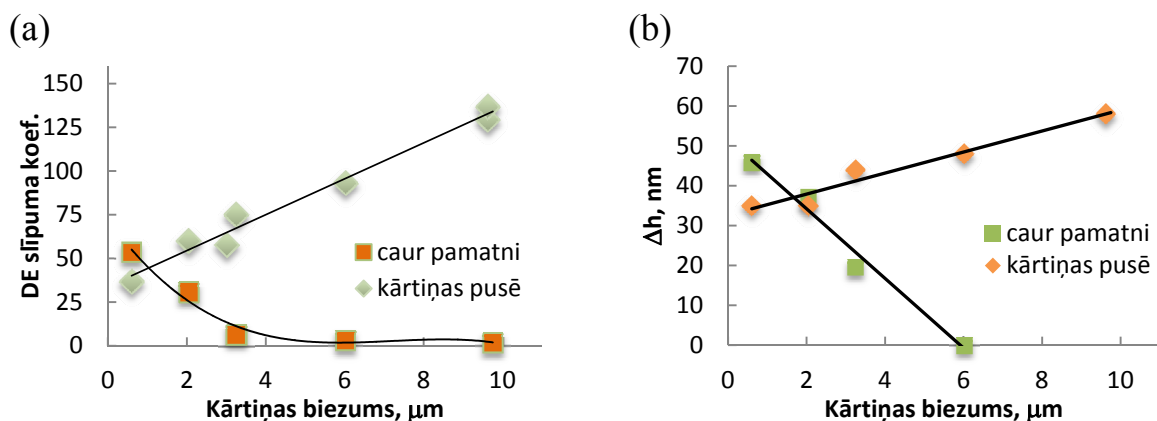


3.2. attēls. Elementārā hologramma jeb difrakcijas režģa tiešais ieraksts amorfā As_2S_3 kārtiņā, režģa periods $\Lambda=1\mu m$

No literatūras ir zināms un paši esam pārlicinājušies, ka šāds tiešā ieraksta process ir atgriezenisks [7, 9]. Ieraksta dzēšanas iespēja, savukārt, liecina par masas fizisku pārnesi nevis par ieraksta blīvuma vai tilpuma efektu. Atgriezeniskuma faktors ir vitāli svarīgs posms promocijas darbam, jo viss darbs turpmāk balstīsies uz masas pārneses procesu izpēti amorfajos halogenīdos.

3.1.1. Tiešais ieraksts amorfās plānās kārtiņās

Iepriekšējā sadaļā jau noskaidrojām, ka refleksijas DE līkne raksturo tiešā ieraksta procesu un līdz ar to tās forma vai precīzāk slīpuma



3.3. attēls. Tiešā hologrāfiskā ieraksta (a) refleksijas DE slīpuma koeficienta relatīvs salīdzinājums dažādiem As_2S_3 parauga biezumiem ierakstam gan no kārtiņas puses, gan no pamatnes puses, (b) iegūtā ieraksta augstuma salīdzināšana abos šajos gadījumos
 45 un -45 grādu polarizācijas hologrāfiskais ieraksts veikts ar 532nm lāzeru ($I_1=I_2=0.25\text{W}/\text{cm}^2$, $\Lambda=1\mu\text{m}$)

1. Tabula. Tiešā hologrāfiskā ieraksta iespējas amorfās As_2S_3 kārtiņās
 Ieraksts veikts ar Nd:YAG 532nm lāzeru ($I_1=I_2=0.25\text{W}/\text{cm}^2$, $\Lambda=1\mu\text{m}$)

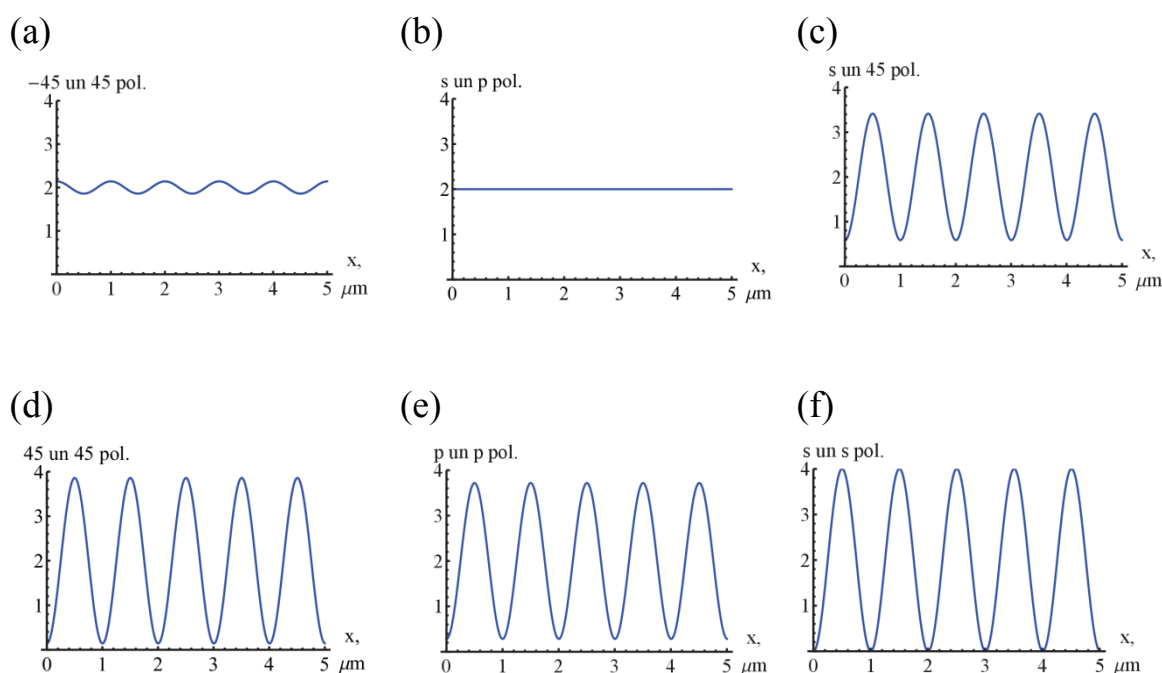
Ieraksta polarizācija	Ieraksta efektivitāte ($\Delta\eta/\Delta t$), $10^{-7}/\text{sek}$.	Tiešā ieraksta relatīvs novērtējums
$p + p$	0.35	Labi (3)
$s + s$	0.1	Slikti (4)
$s + p$	0.04	Ļoti slikti (5)
$45^0 + 45^0$	0.72	Labi (2)
$45^0 + -45^0$	44	Ļoti labi (1)

koeficients ($\Delta\eta/\Delta t$) raksturo ieraksta efektivitāti. No 3.3a. un 3.3b. attēla grafikiem redzam, ka DE slīpuma koeficienta taisnes dažādiem parauga biezumiem labi raksturo iegūto reljefu augstumus. Salīdzinot ierakstus no kārtiņas un pamatnes (stikla) puses, redzam, ka tiešajam hologrāfiskajam ierakstam ir iespējams noteikt *aktīvo ieraksta dziļumu* jeb optimālo kārtiņas biezumu, kas šajā gadījumā ir aptuveni $2.5\mu\text{m}$.

Ierakstu ar vairākām interferējošo staru polarizāciju kombinācijām apkopojums redzams 1. Tabulā. Pēc tiešā ieraksta novērtējuma, kas balstīts uz slīpuma koeficienta vērtībām, redzam, ka tiešais ieraksts ir stipri atkarīgs no izvēlētās polarizācijas. Lai varētu turpināt datu analīzi un noskaidrotu doto rezultātu lielo diverģenci, ir nepieciešams veikt teorētiskos interferences aprēķinus, kas darba ietvaros arī tika paveikts.

3.1.2. Plakanu viļņu interferences datora vizualizācija

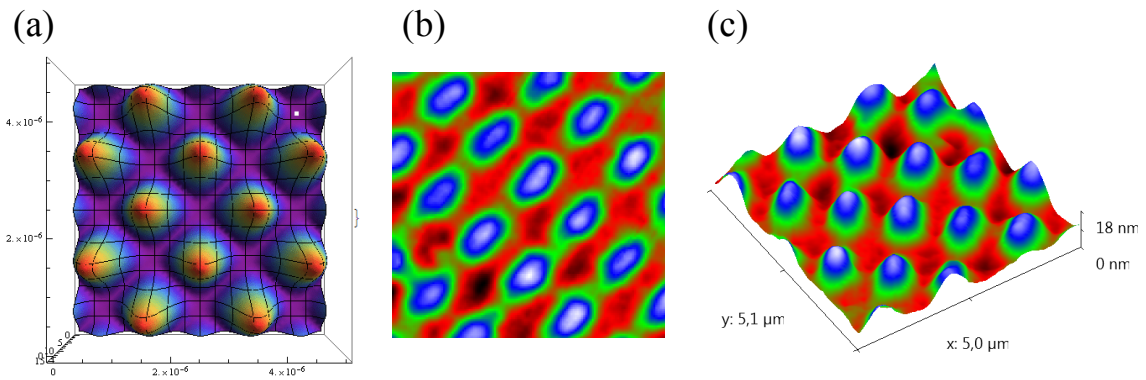
Šajā daļā tiek apskatīts teorētiskais hologrāfiskā ieraksta intensitātes sadalījums, ko reģistrē gaismu jutīgais materiāls jeb paraugs, kurā veic ierakstu. Salīdzinot iegūtos teorētiskos divstaru interferences intensitātes sadalījumus (3.4. att.) ar iepriekš iegūto ieraksta efektivitāti jeb DE slīpuma koeficientu (1. Tabula), varam secināt, ka efektīvam ierakstam (piem., -45 un 45 pol.) nav nepieciešams liels gaismas intensitātes gradients. Gaismas gradienta neesamība, kā s un p polarizācijas gadījumā, arī negarantē efektīvu ierakstu. Lai turpinātu pētīt gaismas iespaidu uz masas pārnesei, nākamajā daļā tiks apskatīts daudzstaru interferences modelis un iegūtie eksperimentālie rezultāti.



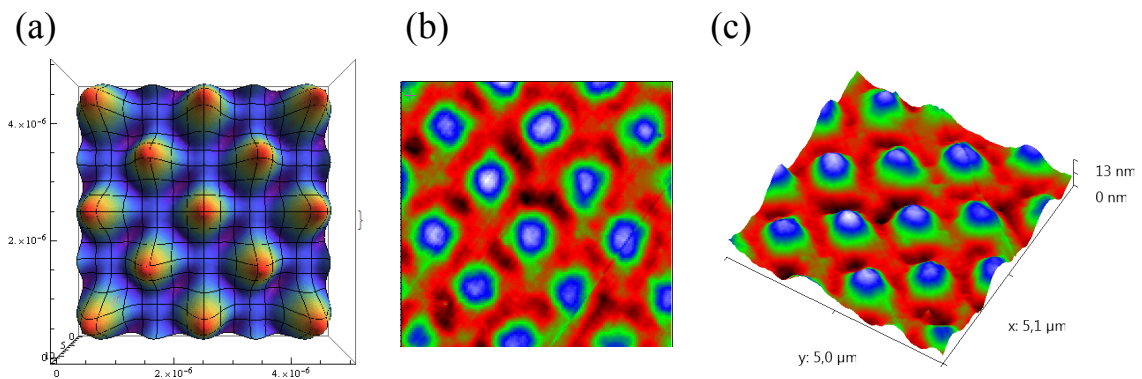
3.4. attēls. Divstaru interferences teorētiskais intensitātes sadalījums, kad leņķis starp interferējošo staru polarizācijām ir 90 grādi (a, b), 45 grādi (c) un 0 grādi (d, e, f), režģa periods $\Lambda=1\mu\text{m}$ un $\lambda=532\text{nm}$

3.1.3. Daudzstaru hologrāfijas eksperimentu salīdzinājums ar teoriju

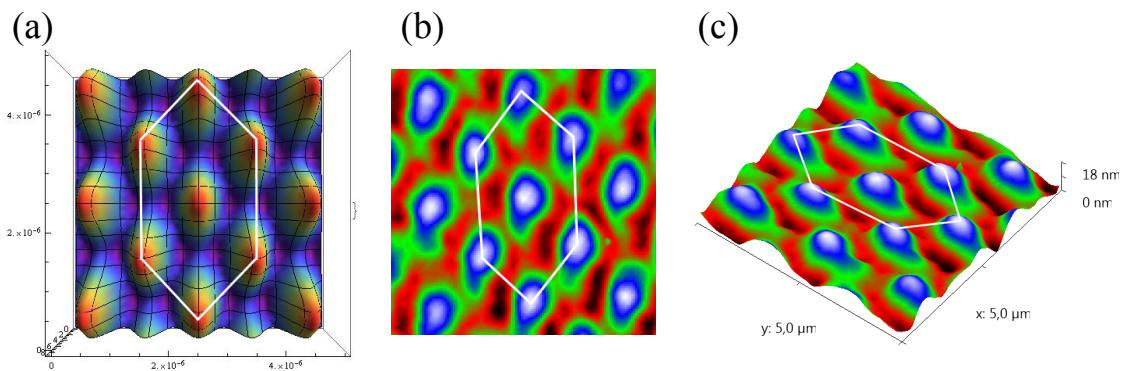
Četrstaru hologrāfiskajā iekārtā, kad visi gaismas avoti polarizēti vienā virzienā, gaismas interference ir ar stipri izteiktiem pīķiem (16 reizes intensīvāki par katru no krītošās gaismas stariem) un minimumos gaismas intensitāte ir vienāda ar nulli (3.5a. att.). Šāda gadījuma hologrāfiskajā ierakstā redzam, ka iegūtais virsmas reljefs atkārti intensitātes sadalījumu (3.5. att.). Gadījumā, kad divu pretējo staru gaismas polarizācijas tiek



3.5. attēls. Četrstaru hologrāfiskā ieraksta As-S-Se kārtiņā (a) teorētiskais intensitātes un (b, c) AFM virsmas reljefa attēlojums
Ieraksts veikts gadījumā, kad visi gaismas avoti polarizēti vienā virzienā



3.6. attēls. Četrstaru hologrāfiskā ieraksta As-S-Se kārtiņā (a) teorētiskais intensitātes un (b, c) AFM virsmas reljefa attēlojums
Ieraksts veikts gadījumā, kad divi pretējie gaismas avoti polarizēti 45 grādu leņķī



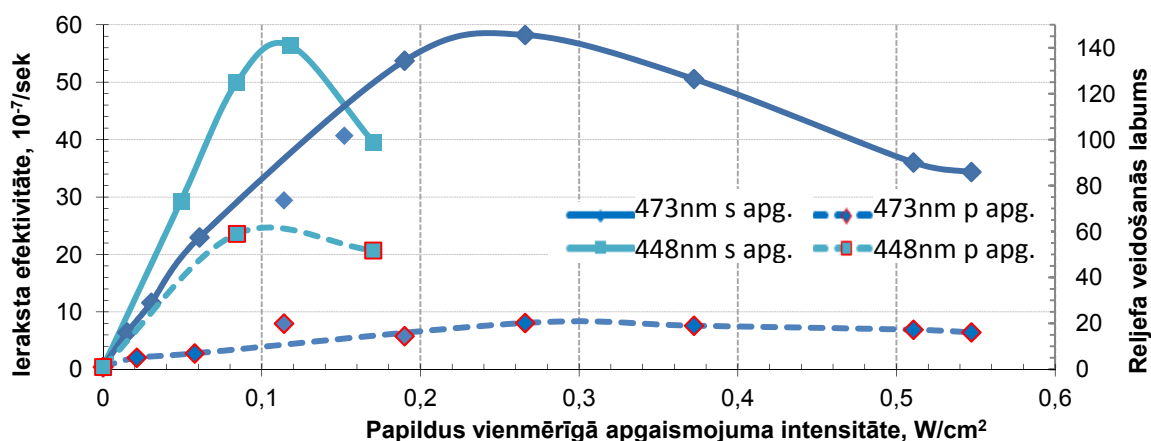
3.7. attēls. Trīsstaru hologrāfiskā ieraksta As-S-Se kārtiņā (a) teorētiskais intensitātes un (b, c) AFM virsmas reljefa attēlojums
Ieraksts veikts gadījumā, kad visi gaismas avoti polarizēti vienā virzienā

pagrieztas par 45 grādiem, tiek samazināts gaismas intensitātes gradients un intensitātes pīķi vairs nav tik izteikti, minimumos intensitāte arī vairs nav vienāda ar nulli (3.6a. att.). Eksperimentālajos ieraksta gadījumos masa tiek pārnesta uz gaismas intensīvākajām vietām (3.6. att.). Identiska situācija tiek novērota trīsstaru hologrāfiskā ierakstā, kad visi trīs gaismas avoti polarizēti vienā virzienā (3.7. att.)- reljefs atkārtoti teorētisko interferences intensitātes sadalījumu.

No iegūtiem rezultātiem varam secināt, ka šajā gadījumā masa tiek pārnesta virzienā uz intensīvāk apgaismotajām vietām. Ar daudzstaru (trīs un četrstaru) hologrāfiskā ieraksta iekārtu ir iespējams iegūt dažādu veidu 3D punktveida intensitātes sadalījumus un līdz ar to arī ierakstīt dažādas 3D punktveida struktūras. Šādi punktveida intensitātes sadalījumi ir saistoši ne tikai no praktiskā pielietojuma, bet arī no parauga pētīšanas viedokļa, jo ļauj vienā piegājienā ierakstīt unikālas un augstas precizitātes struktūras, kuras ir viegli sasaistīt ar aprēķināto interferences sadalījumu.

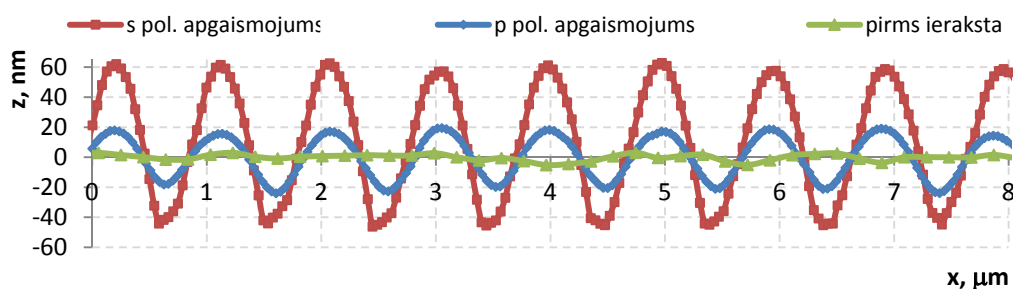
3.1.4. Halkogenīdu foto inducētās mīkstināšanās iespāids uz tiešo hologrāfisko ierakstu

Šajā daļā tiks apskatīta tiešā hologrāfiskā ieraksta virsmas reljefa veidošanās efektivitāte, kā arī polarizācijas ietekmes anizotropija uz ieraksta efektivitāti. Tika atklāts, ka, tiešā hologrāfiskā ieraksta laikā, apstarojot paraugu ar nesaistītu jeb nekoherentu gaismu, ieraksta efektivitāti ir iespējams vairākkārtīgi uzlabot. Efekts iespējams saistīts ar šī papildus apgaismojuma inducētu parauga mīkstināšanos.



3.8. attēls. Hologrāfiskā režģa ieraksta efektivitāte un reljefa veidošanās labums As_2S_3 kārtiņā atkarībā no papildus apgaismojuma viļņa garuma, intensitātes un tās polarizācijas

Ieraksts tika veikts ar $\text{Nd}:\text{YAG}$ 532nm p un p polarizācijām,
 $(I_1=I_2=0.2\text{W}/\text{cm}^2, \Lambda=1\mu\text{m})$



3.9. attēls. Virsmas reljefa profils tiešajam hologrāfisko režģu ierakstam gadījumos, kad paraugs papildus apgaismots ar $0.24\text{W}/\text{cm}^2$ 473nm s vai p polarizētu gaismu, to salīdzinājums ar parauga virsmu pirms ieraksta. Hologrāfiskais ieraksts tika veikts As_2S_3 ar $\text{Nd}:\text{YAG}$ 532nm p un p polarizētiem gaismas avotiem ($I_1=I_2=0.2\text{W}/\text{cm}^2$, $\Lambda=1\mu\text{m}$)

Hologrāfiskajam ierakstam tika izmantots $\text{Nd}:\text{YAG}$ 532nm lāzers. Par papildus apgaismojumu tika izvēlēti pusvadītāju lāzeri ar pietiekami lielu absorbciju dotajam gaismu jutīgajam As_2S_3 paraugam: 448 un 473 nm viļņu garumi. 3.8. attēlā redzams šīs daļas eksperimentu apkopojums-hologrāfiskā režģa ieraksta efektivitātes ($\Delta\eta_R/\Delta t$) salīdzinājums ar un bez papildus apgaismojuma As_2S_3 kārtiņā un tā atkarība no papildus apgaismojuma viļņa garuma, intensitātes un polarizācijas. Mainot papildus apgaismojuma intensitāti un viļņa garumu, interferējošo gaismas staru polarizācija un intensitāte (p -polarizācija un $0.2\text{W}/\text{cm}^2$ katrā starā) tika uzturēta nemainīga.

No grafika redzam, ka, palielinoties papildus apgaismojuma intensitātei, virsmas reljefa formēšanās efektivitāte palielinās ļoti strauji. Šis efekts visvairāk izpaužas pie papildus apgaismojuma viļņu garumiem, kas atrodas tālāk no parauga absorbcijas sliekšņa jeb tiek vairāk absorbēti. Neatkarīgi no apgaismojuma polarizācijas, katra viļņa garuma papildus apgaismojuma ieguldījums hologrāfiskā režģa ieraksta efektivitātes uzlabošanā piesātinās pie tai noteiktas papildus apgaismojuma intensitātes ($I_{448\text{nm}}=0.11\text{W}/\text{cm}^2$, $I_{473\text{nm}}=0.24\text{W}/\text{cm}^2$). Pie apgaismojuma intensitātes, kas lielākas par šīm vērtībām, interferējošie gaismas avoti vairs nespēj pietiekami labi formēt hologrāfisko režģi, paraugs paliek pārāk plūstošs, palielinātā apgaismojuma intensitāte sāk pasliktināt ieraksta efektivitāti.

Redzam, ka ieraksta efektivitāte ir stipri atkarīga ne tikai no papildus apgaismojuma viļņa garuma un intensitātes, bet arī no tā polarizācijas. P -polarizācijas ieraksta gadījumā, neatkarīgi no papildus apgaismojuma viļņa garuma, labākos rezultātus hologrāfisko režģu veidošanas procesā dod tieši s jeb ortogonāli polarizēts papildus apgaismojums. Difrakcijas efektivitāte un līdz ar to arī ieraksta efektivitāte ($\Delta\eta_R/\Delta t$) un reljefa veidošanās labums (reljefa ieraksta efektivitāte bez papildus apgaismojuma normēta uz 1)

sniedz tikai netiešu informāciju par tiešā hologrāfiskā ieraksta virsmas reljefa amplitūdas izmaiņām ieraksta laikā. Tieši režģa profila mērījumi tika veikti ar CFI pieejamo atomspēku mikroskopu (AFM). Virsmas reljefa profils tiešajam hologrāfisko režģu ierakstam gadījumos, kad paraugs papildus apgaismots ar $0.24\text{W}/\text{cm}^2$ 473nm s vai p polarizētu gaismu, to salīdzinājums ar parauga virsmu pirms ieraksta redzams 3. 9. attēlā. Varam secināt, ka pietiek tikai pamainīt papildus apgaismojuma polarizāciju no p uz s un iegūstam vismaz trīskārtīgu ieraksta augstuma pieaugumu. Nākamajā daļā tiks apkopoti rezultāti arī par visām pārējām ierakstošo staru polarizāciju kombinācijām.

3.1.5. Polarizācijas ietekme hologrāfiskā režģa ierakstam un papildus apgaismojumam

Šajā daļā tiek apskatīts, kādi rezultāti ir iegūstami veicot hologrāfisko ierakstu pie dažādām polarizācijām. Ieraksta efektivitāte tiek salīdzināta ar rezultātiem, kuri tika iegūti eksperimentos ar papildus dažādu polarizāciju 473nm lāzera apgaismojumu.

2. Tabula apkopo datus ne tikai par p un p polarizācijas ierakstošajiem stariem, bet arī par visām pārējām polarizāciju kombinācijām. Bez papildus apgaismojuma labākie ieraksta rezultāti ir iegūti ar pretēji cirkulārām (LC un RC) un arī ar 45 un -45 (45° un 135°) grādu ierakstošo staru polarizācijām. Abu šo gadījumu ieraksta efektivitātes būtiski atšķiras no pārējo polarizāciju kombināciju ieraksta. Nākamajā sadaļā tiks apskatīts šādu rezultātu iemesls.

Kad tiek izmantots papildus apgaismojums, situācija mainās. Kā jau iepriekš noskaidrojām, pie p un p (jeb saīsinot p:p) interferējošiem stariem papildus s polarizētas gaismas apgaismojums ir nepieciešams maksimālas režģa efektivitātes iegūšanas. Savukārt s:s ieraksta gadījumā, papildus apgaismojumam jābūt p polarizētam. Abos gadījumos ir nepieciešams ortogonāls papildus nekoherentais apgaismojums. Savstarpēji ortogonālu ierakstošo staru gadījumā, ja izmanto -45:+45 grādu polarizāciju, tad, neatkarīgi no tā kādas polarizācijas apgaismojumus tiek izmantots, iegūstam aptuveni divkārt uzlabotu ieraksta efektivitāti. Ja hologrāfiskajam ierakstam izmanto cirkulāri polarizētu gaismu, papildus apgaismojums dod daudzkārtīgu ieraksta uzlabojumu gadījumā, kad interferējošie gaismas avoti ir vienādi cirkulāri polarizēti (piem., LC:LC). Savukārt pretēji cirkulāras polarizācijas gadījumā (LC:RC), papildus apgaismojums tikai pasliktina dotos rezultātus.

2. Tabula. Hologrāfisko režģu difrakcijas un virsmas reljefa veidošanās efektivitātes atkarība no ierakstošo un apgaismošanas staru polarizācijas *Hologrāfiskais ieraksts tika veikts As_2S_3 kārtiņā ar Verdi-6 532nm lāzeru ($I_1=I_2=0.25W/cm^2$, $\Lambda=1\mu m$), papildus apgaismojot ar 473nm viļņu garuma gaismu (0 vai $0.24W/cm^2$)*

Ieraksta polarizācija	Papildus apgaismojuma polarizācija	Ieraksta efektivitāte ($\Delta\eta/\Delta t$), $10^{-7}/\text{sek.}$	Reljefa veidošanās labums	Ieraksts bez apgaismojuma novērtējums	Ieraksts ar apgaismojumu novērtējums
$p : p$	s	91	260.0		Ļoti labi
	p	13.7	39.1		
	-	0.35	1.0	Labi	
$s : s$	s	0.22	2.2		
	p	19	190.0		Labi
	-	0.1	1.0	Slikti	
$s : p$	s	0.17	4.3		Ļoti slikti
	p	0.035	0.9		
	-	0.04	1.0	Ļoti slikti	
$45^0 : 45^0$	s	23	31.9		Labi
	p	0.2	0.3		
	-	0.72	1.0	Labi	
$45^0 : -45^0$	s	102	2.3		Ļoti labi
	p	90.4	2.1		
	-	44	1.0		
	45^0	98	2.2	Ļoti labi	
$LC : RC$	s	58	0.6		Ļoti labi
	p	62	0.7		
	-	90	1.0	Ļoti labi	
$LC : LC$ vai $RC : RC$	s	57	100.0		Ļoti labi
	p	0.25	0.4		
	-	0.57	1.0	Labi	

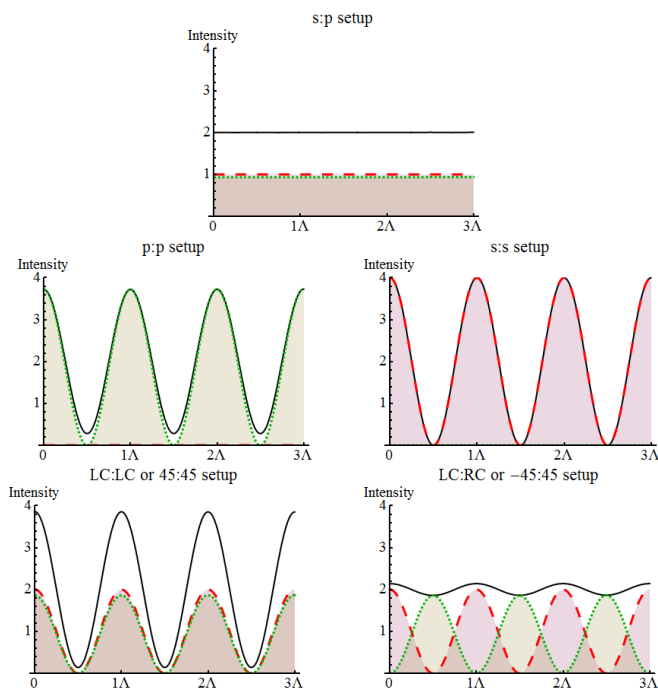
Šo rezultātu izskaidrošanai ir nepieciešams veikt jaunus teorētiskos aprēķinus divstaru interferences intensitātes sadalījuma sīkākai izpētei, proti, izpētīt polarizācijas sadalījumu divstaru interferences gadījumā.

3.1.6. Teorētiskais polarizācijas sadalījums divu staru interferences gadījumam

No iepriekš apskatītajiem rezultātiem (2. Tabula) varam secināt, ka ir tādas ierakstošo staru polarizāciju kombinācijas (piem., -45 un 45) pie

kurām tiešais ieraksts ir iespējams ar ļoti lielu efektivitāti. Tā kā aprēķinātais intensitātes sadalījums -45:45 gadījumā ir praktiski vienmērīgs (3.4a. att.), radās doma, ka režģa ieraksta nepieciešamais nosacījums ir polarizācijas jeb elektriskā lauka intensitātes gradients, nevis gaismas intensitātes gradients. Ir pieejams ļoti maz zinātniskās literatūras ar apskatītiem plakānu viļņu interferences elektriskā lauka intensitātes sadalījumiem un tā ir nepilnīga (ietver tikai dažus gadījumus, informācijas vai paskaidrojumu trūkumi u.c.) un nav parādīta vai paskaidrota rezultātu izcelsme (matemātiski aprēķini, modelis utt.). Lai atvieglotu eksperimentālo rezultātu interpretāciju un analīzi, šajā daļā tiks teorētiski apskatīts visu populārāko ierakstošo staru interferences elektriskā lauka sadalījumi.

Teorētiski aprēķinātais divu plakānu viļņu interferences polarizācijas sadalījums redzams 3.10. attēlā. Ar melno līkni ir attēlota kopējā gaismas interferences intensitāte, kas ir identiski ar tiem rezultātiem, kas iegūti



3.10. attēls. Teorētiski aprēķinātais divu staru interferences intensitātes sadalījums (melnā nepārtrauktā līkne), kā arī summārās intensitātes s un p komponentes attēlotas ar pārtrauktām līknēm un iekrāsotiem apgabaliem zem tām
Interferējošās gaismas intensitāte $I_1=I_2=1$ vienība, interferences periods $\Lambda=1\mu\text{m}$, leņķis starp \mathbf{k} vektoriem $2\alpha=30.86^\circ$, $\lambda=532\text{nm}$

Polarization of the beams		Sum of the electric fields in x-y plane					
first (l=1)	second (l=1)	$\Delta\phi:$	$-\pi$	$-\pi/2$	0	$+\pi/2$	$+\pi$
		x:	$-\Lambda/2$	$-\Lambda/4$	0	$+\Lambda/4$	$+\Lambda/2$
s ↑	s ↑	n/a	↑	↑	↑	↑	n/a
		I:	0.00	2.00	4.00	2.00	0.00
p ↔	p ↔	•	↔	↔	↔	↔	•
		I:	0.28	2.00	3.72	2.00	0.28
s ↑	p ↔	↘	○	↗	○	↘	○
		I:	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
+45 ↗	-45 ↙	↔	○	↑	○	↔	○
		I:	1.86	2.00	2.14	2.00	1.86
-45 ↙	-45 ↙	•	↘	↘	↘	↘	•
		I:	0.14	2.00	3.84	2.00	0.14
RC ○	RC ○	•	○	○	○	○	•
		I:	0.14	2.00	3.86	2.00	0.14
RC ○	LC ○	↔	↗	↑	↖	↔	○
		I:	1.86	2.00	2.14	2.00	1.86

3.11. attēls. Teorētiski aprēķinātais divu staru interferences polarizācijas sadalījums dažādu interferējošo staru polarizācijas gadījumiem
Interferējošās gaismas intensitāte $I_1=I_2=1$ vienība, interferences periods $\Lambda=1\mu\text{m}$, leņķis starp \mathbf{k} vektoriem $2\alpha=30.86^\circ$, $\lambda=532\text{nm}$

3.1.2. sadaļā. Papildus gaismas interferences intensitātei ar raustītām līnijām un iekrāsotiem laukumiem ir attēlotas arī tās komponentes- pret krišanas plakni perpendikulāri (s virziens) un paralēli (p virziens) polarizētas gaismas apgabali. Šeit jāuzsver tas, ka ir vēl arī trešā gaismas komponente ar radiālu polarizācijas virzienu (perpendikulāri s un p virzieniem), bet tā ir salīdzinoši maza un netiks šajā darbā apskatīta. Savukārt teorētiski aprēķinātā summārā polarizācija pie dažādām interferējošo staru polarizācijām ir redzama 3.11. attēlā. Šajā attēlā var arī redzēt summārās polarizācijas un intensitātes absolūtās vērtības pie vairākām interferējošo viļņu fāzu starpībām $\Delta\varphi$ ($-\pi$; $-\pi/2$; 0 ; $\pi/2$ un π).

Salīdzinot iegūtos rezultātus ar eksperimentālajiem virsmas reljefa ierakstiem (no 2. Tabulas), redzam, ka liels gaismas intensitātes gradients (piem., s:s, p:p, LC:LC) nav noteicošais faktors režģu veidošanai. Labākajos ieraksta gadījumos (-45:45 un LC:RC) gaismas intensitātes gradienta vietā ir novērojams liels s un p polarizēta elektriskā lauka intensitātes gradients. Abu šo gaismas polarizāciju intensitātes gradientu periodiskums ir pretfāzēs, kas, visticamāk, arī ir atbildīgs par ieraksta lielo efektivitāti. Gadījumā, kad ir tikai viena no s vai p komponentēm (s:s vai p:p ieraksts) vai abas šīs komponentes ir ar vienādu fāzi (45:45 vai LC:LC ieraksts), vai arī bez elektriskā lauka intensitātes gradienta (s:p ieraksts) ir iespējams iegūt vidējas vai sliktas efektivitātes ierakstu.

Eksperimentāli parādījām, ka ieraksta efektivitāti ir iespējams vairākkārtīgi uzlabot, ieviešot hologrāfiskā ieraksta shēmā trešo-nekoherento gaismas avotu. Šis papildus gaismas avots neinterferē ar pārējiem un tādējādi kalpo tikai kā papildus apgaismojums, kas ieraksta laikā papildus mīkstina paraugu. Ieraksta efektivitātes palielināšanos tagad ir iespējams izskaidrot: izmantojot papildus apgaismojumu ir iespējams iegūt summārās intensitātes sadalījumu tuvu 45:-45 vai LC:RC gadījumam (ar s un p komponentēm pretējās fāzēs), tādējādi palielinās ieraksta efektivitāte arī visiem pārējiem ierakstošo staru polarizācijas gadījumiem. No tā arī seko, ka izmantojot ortogonālas polarizācijas apgaismojumu attiecībā pret interferējošo staru summāro polarizāciju, ir iespējams vairākkārtīgi uzlabot ieraksta efektivitāti (sk. 2. Tabula). Piemēram, p:p ieraksta gadījums, kas tika novērtēts kā salīdzinoši „labs” virsmas reljefa ieraksts, bet izmantojot papildus s polarizētu apgaismojumu, ieraksts ir ar tikpat lielu efektivitāti kā 45:-45 un LC:RC gadījumos. Turklāt papildus apgaismojums 45:-45 un LC:RC gadījumos ieraksta efektivitāti praktiski nemaina vai arī pasliktina.

Citiem vārdiem sakot, visefektīvākais ieraksts ir iespējams gadījumā, kur interferences periodiskās s un p komponentes ir pretējās fāzēs, jo tās vienlaicīgi *palīdz* viena otrai veidot kalnu un rakt bedri. Katra no

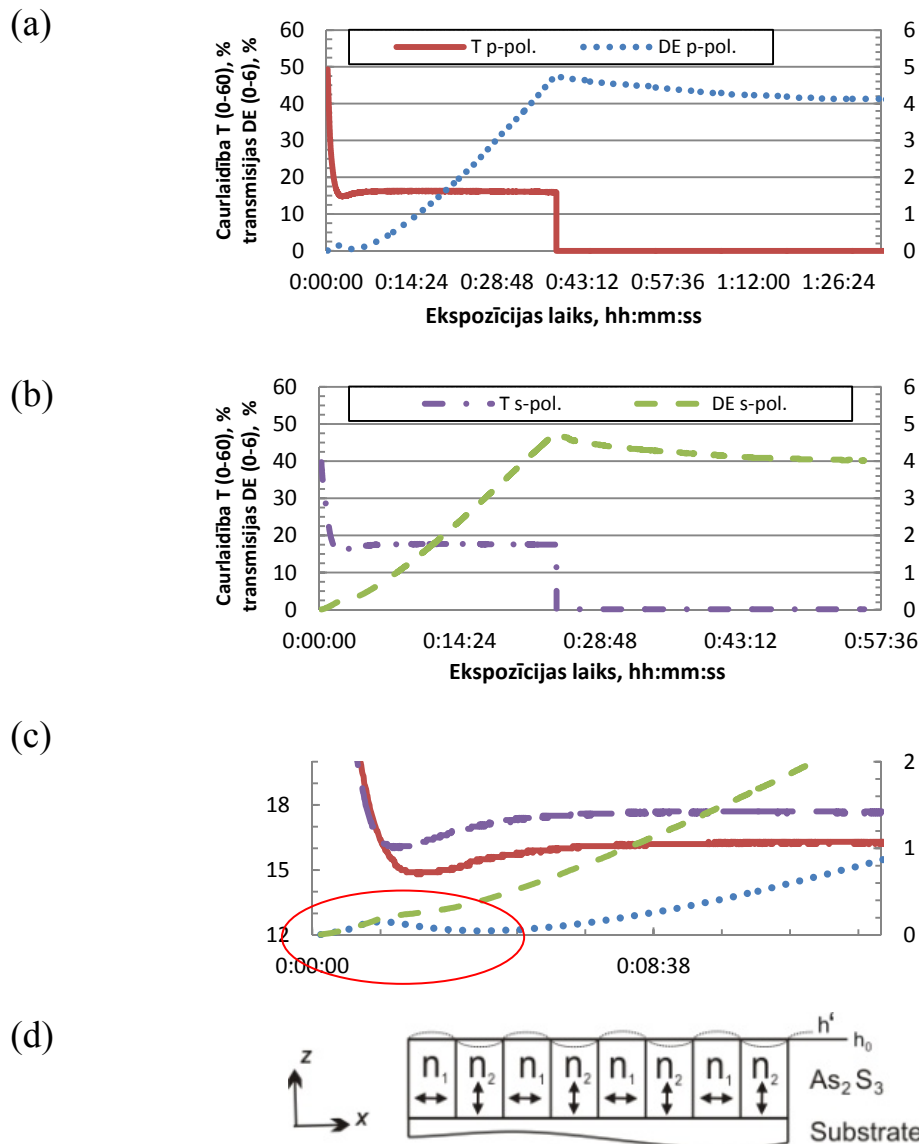
komponentēm atbild par vienu no šiem procesiem. Nākamās daļas tiks veltītas šī procesa smalkākai izpētei un ieraksta laikā notiekošā izskaidrošanai.

3.1.7. Masas pārnese virzieni hologrāfiskā ieraksta laikā, pamatojoties uz materiāla dubultlaušanu

No iepriekš apskatītajām sadaļām varam secināt, ka vislabākais hologrāfiskais virsmas reljefa ieraksts ir iespējams pie divām polarizāciju kombinācijām: $-45:45$ un pretēji cirkulārām. Šo gadījumu teorētiski aprēķinātais interferences intensitātes sadalījums ir gandrīz vienmērīgs- ar ļoti vāju kontrastu (sk. 3.10. att., $-45:45$ gadījums). Apskatot sīkāk aprēķināto intensitātes sadalījumu, redzam, ka tas sastāv no periodiskām s un p polarizācijas komponentēm ar lielu kontrastu jeb gradientu (3.10. att. iekrāsotās daļas). Abu šo komponentu periodi ir pretfāzēs. Ņemot vērā šo faktu un to, ka amorfajos halkogenīdos un arī citos gaismu jutīgos materiālos tiešais ieraksts ir atgriezenisks, ir iespējams tikai viens vienīgs ieraksta procesa izskaidrojums, kas arī tiks apskatīts šajā daļā.

Hologrāfiskā ieraksta laikā, masas pārnese tiek novērota paralēli elektriskā lauka intensitātes gradientam (nevis gaismas intensitātes gradientam) un arī dažādos virzienos, kas ir atkarīgi no dotā elektriskā lauka virziena. Ar hologrāfiskā ieraksta shēmu šos masas pārnese virzienus ir iespējams noteikt eksperimentāli, mainot transmisijas DE lāzera polarizāciju no p uz s vai otrādi. 3.12a. attēlā ir redzams režģa ieraksta process, kur nepārtrauktā līkne attēlo viena ierakstošā stara absorbciju (transmisiju) paraugā un otra līkne attēlo transmisijas DE ieraksta laikā. Šeit DE tiek mērīta ar p polarizētu gaismu. Sākuma posmā, kad caurlaidība strauji samazinās, veidojas tilpuma ieraksts jeb laušanas koeficienta un/vai absorbcijas koeficienta izmaiņas. Līdz ar straujo caurlaidības izmaiņu apstāšanos, parādās neliels DE pīķis. Identiskos apstākļos, mērot ar s polarizētu gaismu, šāds pīķis netiek novērots (3.12b. att.). Abi ierakstu rezultāti kopā ar izceltu sākuma posmu ir redzami 3.12c. attēlā. Šādu atšķirību un reizē arī masas pārnese virzienu var izskaidrot ar parauga foto inducēto dubultlaušanu Δn .

Amorfajiem halkogenīdu pusvadītājiem foto inducētā dubultlaušana ir negatīva, *t.i.*, $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} < 0$ [65], kur n_{\parallel} un n_{\perp} ir attiecīgi laušanas koeficienti gaismai izplatoties paralēli un perpendikulāri ierosinošās gaismas elektriskajam laukam. Pirms hologrāfiskā ieraksta laušanas koeficients paraugam ir izotrops attiecībā pret gaismas polarizāciju. Pirmajās ieraksta sekundēs periodisks laušanas koeficients sāk veidot



3.12. attēls. (a) un (b) hologrāfiskā ieraksta viena ierakstošā stara transmisijas (T) līknes (nepārtrauktā un punktoti-raustītā līkne) un attiecīgā ieraksta transmisijas DE līknes (punktotā un raustītā līkne) atkarībā no DE lāzera polarizācijas. (c) izcelts abu ierakstu sākuma posms. (d) hologrāfiskā ieraksta reljefa veidošanās modelis
 Ieraksts veiks As_2S_3 kārtiņā ar -45 un 45 grādu polarizāciju

tilpuma ierakstu. Vienkāršots ieraksta modelis redzams 3.12d. attēlā. Pie laušanas koeficienta režģa pēc nejaušības principa attēlā arī tiek piekārtots ieraksta interferējošo staru polarizācijas komponentes (kā 3.10. att. $-45:45$ datora vizualizācijā). Ņemot vērā to, ka $\Delta n < 0$, s polarizētam (3-1) un p polarizētam (3-2) DE gaismas avotam, uzsākot ierakstu, varam uzrakstīt sekojošo:

$$n_1 \cdot h_0 > n_2 \cdot h_0 \quad 3-1$$

$$n_1 \cdot h_0 < n_2 \cdot h_0 \quad 3-2$$

kur piereizinātā konstante h_0 ir parauga biezums. Turpinot ierakstu, n_1 un n_2 starpība pieaug un attiecīgi abu eksperimentu DE pieaug, līdz brīdim, kad sāk veidoties reljefs. Reljefa veidošanās sākuma posmā, iepriekšējās formulas s polarizētam (3-3) un p polarizētam (3-4) DE gaismas avotam var uzrakstīt sekojoši:

$$n_1 \cdot h_1' > n_2 \cdot h_2' \quad 3-3$$

$$n_1 \cdot h_1' < n_2 \cdot h_2' \quad 3-4$$

kur h_i' apzīmē kārtiņas lokālo biezumu virsmas reljefa veidošanās rezultātā. Reljefam augot, h_1' palielinās un h_2' samazinās vai arī otrādi- h_1' samazinās un h_2' palielinās. Kā jau iepriekš minēts, p polarizētam DE ieraksta gadījumam vienīgajam parādās sākuma ieraksta pīķis. Šis fakts ir izskaidrojams tikai un vienīgi ar to, ka ieraksta laikā h_1' palielinās un attiecīgi h_2' - samazinās. Tādējādi p polarizētam DE ieraksta gadījumam n_1 , h_1' palielinās un n_2 , h_2' samazinās- attiecīgā DE līkne monotoni pieaug. Savukārt s polarizētam DE ieraksta gadījumam n_2 , h_1' palielinās ieraksta laikā un n_1 , h_2' - samazinās. Sākuma posmā tilpuma ieraksts nosaka DE augšanu, tālāk jaunizveidotais virsmas reljefs sāk dzēst DE un attiecīgajai līknei izveidojas sākuma maksimums. Ierakstu turpinot, difrakcija no $\Delta h'$ paliek daudz izteiktāka par ieguldījumu no Δn un tam seko p polarizētās (arī s polarizētās) gaismas DE monotons pieaugums.

Ierakstītā virsmas reljefa uzvedības izpētei tika nomērītas DE relaksācijas abiem gadījumiem pie izslēgtiem ierakstošajiem stariem (3.12. att. grafikos, kur transmisija nokrīt līdz nullei). Kad DE tika sasniegta aptuveni 4.6%, ierakstošais lāzers tika izslēgts un DE nokritās līdz aptuveni 4%. Šajā stāvoklī DE abos gadījumos palika nemainīga ilgu laiku, kas liecina par ierakstītā reljefa stabilitāti. Šādi ir iespējams ierakstīt liela laukuma, augstas kvalitātes un perfekta ģeometrijas režģus bez jebkādas papildus apstrādes, kas no praktiskā pielietojuma viedokļa, protams, ir liels ieguvums.

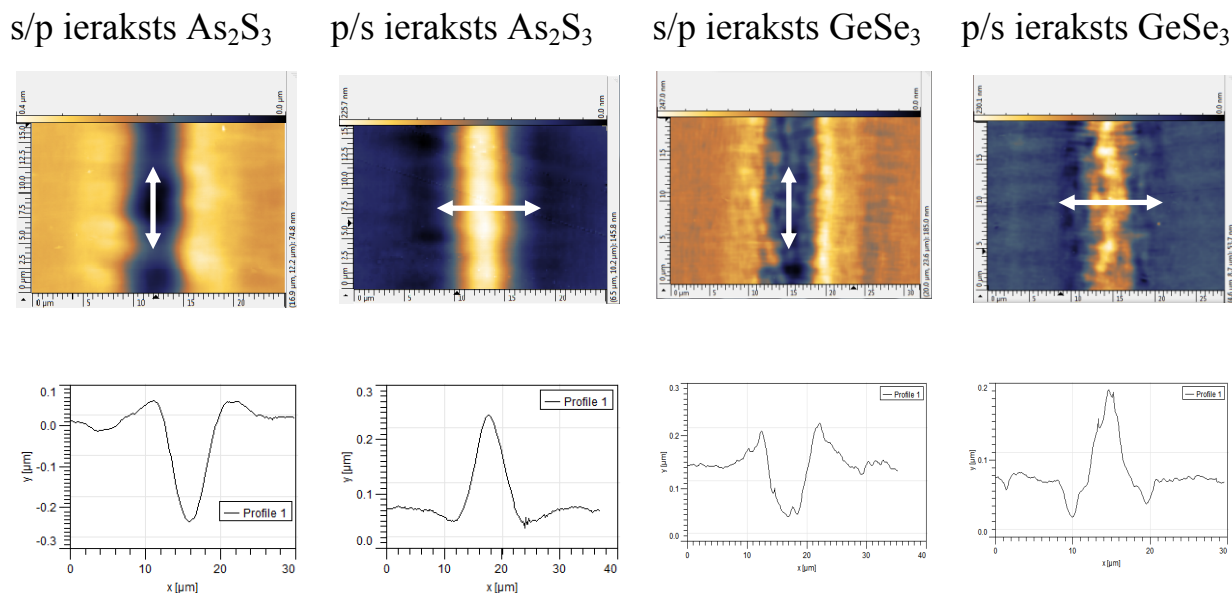
3.2. Tiešais ieraksts un tā izpēte pēc parauga apstarošanas caur šauru spraugu

Lai eksperimentāli pārlicinātos par iepriekšējās sadaļās noteikto masas pārneses virzienu un elektriskā lauka intensitātes gradienta kopsakarībām, tika izveidota jauna ieraksta shēma (sk. shēmu 2.1b. attēlā). Shēmas galvenā sastāvdaļa ir aptuveni 10 μ m šaura sprauga, kas ideālā variantā dod iespēju apstarot paraugu ar taisnstūrveida gaismas intensitātes sadalījuma gaismu. Realizējot šādu vienmērīga intensitātes sadalījuma ierakstu, ir iespējams pētīt virsmas reljefa veidošanos pilnīgi kontrolētā

vidē, kur polarizāciju ir iespējams pieņemt par nemainīgu un konstantu gan laikā, gan arī telpā. Tā kā šeit ieraksta stars krīt perpendikulāri pret parauga virsmu, polarizācija tiek definēta attiecībā pret spraugas virzienu: paralēlas polarizācijas gadījumā (s virziens) ir iespējams simulēt s:s gadījuma hologrāfiskā ieraksta viena perioda ierakstu gaismu jutīgā materiālā. Perpendikulāras polarizācijas gadījums (p virziens), savukārt, simulē viena perioda p:p hologrāfisko ierakstu.

3.2.1. Masas pārnese virzieni

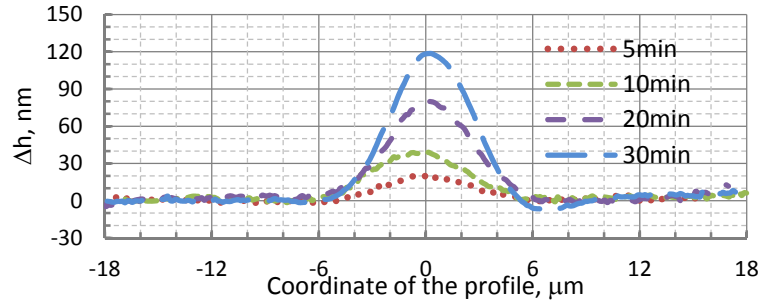
Iepriekš apskatītais hologrāfiskais ieraksts tikai netieši izskaidro masas pārnese procesus ieraksta laikā. Izmantojot šauras spraugas ieraksta shēmu, ir iespējams to noskaidrot vienkārši nomērot iegūto topogrāfiju uz AFM. Pirmie ierakstītie reljefi bija ļoti mazi un neizteiksmīgi (tikai dažu nanometru izmaiņas). Lai panāktu dotā materiāla lielāku plūstamību, tika nolemts izmantot arī papildus vienmērīgu nekoherentu apgaismojumu no parauga otrās puses. Šādu eksperimentu ieraksta polarizācija tiks saīsināta kā a/b , kur a - ieraksta jeb elektriskā lauka intensitātes gradienta polarizācija un b - papildus vienmērīgā apgaismojuma polarizācija. Kā turpmāk redzēsīm, šāds shēmas papildinājums dod nozīmīgu ieraksta uzlabojumu.



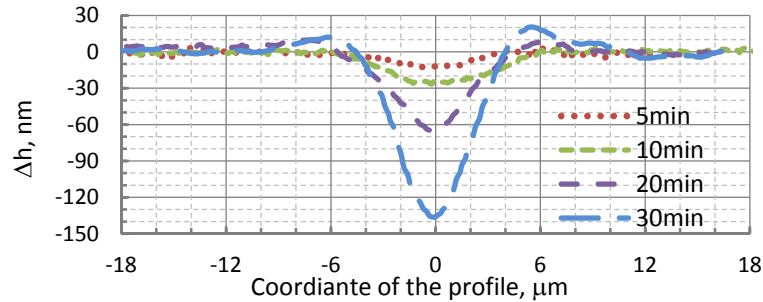
3.13. attēls. S polarizēta (s/p ieraksts) un p polarizēta (p/s ieraksts) gaismas intensitātes gradienta iespaids uz masas pārnese virzienu As_2S_3 un GeSe_3 kārtiņās

Ieraksta elektriskā lauka virziens attēlots ar abpusējām bultiņām

(a) ieraksta polarizācija paralēla gradientam



(b) ieraksta polarizācija perpendikulāra gradientam



3.14. attēls. Optiskās spraugas eksperimentu ieraksta attīstība laikā *Rezultāti iegūti no AFM mērījumiem, ieraksts veikts As_2S_3 kārtiņā ar (a) p polarizācijas gaismas intensitātes gradientu (p/s ieraksts) un (b) s polarizācijas gaismas intensitātes gradientu (s/p ieraksts), ieraksta un papildus apgaismojuma intensitātes: $4.24W/cm^2$ un $0.37W/cm^2$, ieraksta laiks 5, 10, 20, 30 minūtes*

Realizējot pirmos s un p polarizācijas ierakstus ar ortogonāli polarizētu papildus apgaismojumu, redzam, ka ir iespējami divi dažādi masas pārneses virzieni (3.13. attēls). Tātad, s polarizēts gaismas gradients, stimulēts ar p polarizētu papildus vienmērīgu apgaismojumu (s/p ieraksts), izveido aptuveni $10\mu m$ platu bedri. Attiecīgi p polarizētas gaismas gradients, stimulēts ar s polarizētu papildus vienmērīgu apgaismojumu (p/s ieraksts), izveido tikpat platu kalnu. Varam secināt, ka s polarizācijas gaismas intensitātes gradients atgrūž no sevis masas daļiņas, bet, savukārt, p polarizācijas gaismas intensitātes gradients pievelk masas daļiņas. Šeit iegūto rezultātu secinājumi pilnībā sakrīt ar iepriekšējās 3.1.7. sadaļas secinājumiem.

3.2.2. Optiskās spraugas eksperimentu ieraksta attīstība laikā

Iepriekšējās sadaļās tika noskaidrots, ka amorfajos halkogenīdos p polarizētas gaismas intensitātes gradients veido kalnu paraugā, bet, savukārt, s polarizēts- bedri. Citiem vārdiem sakot, ja gaismas intensitātes gradienta virziens sakrīt ar tās gaismas polarizācijas virzienu, masas

pārnese tiks novērota gradienta virzienā (no mazākās gaismas intensitātes uz lielāko). Savukārt, ja gaismas intensitātes gradienta virziens būs perpendikulārs tās gaismas polarizācijas virzienam, masas pārnese tiks novērota pretēji gradienta virzienam (no lielākās gaismas intensitātes uz mazāko). Reljefa veidošanos atkarībā no dažādiem ieraksta parametriem (galvenokārt no ieraksta laika un ierakstošo staru intensitātes) sīkāk apskatīsim šajā sadaļā.

Reljefa veidošanās pirmajās 5, 10, 20 un 30 ieraksta minūtēs ir redzama 3.14. attēlā. Aktīvas masas pārneses rezultātā abos p/s un s/p gadījumos reljefs sāk veidoties nevis pie lielākā gradienta (spraugas malas tuvumā), bet no spraugas vidusdaļas. Īsa laika ierakstam (līdz 10min) veidojas A vai V veida profils. Ja ieraksta laiks pārsniedz 10 minūtes, masas *drūzmēšanās* rezultātā, ierakstītais reljefa jau ir ar W vai M veida profilu. Šāda veida ieraksta attīstība liecina par to, ka reljefa veidošanās procesā piedalās viss tilpums, nevis tikai virsējais tā slānis.

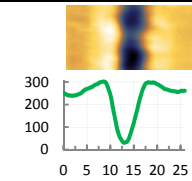
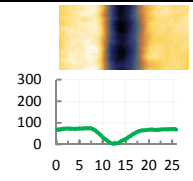
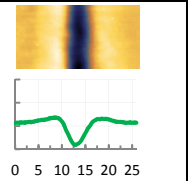
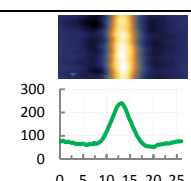
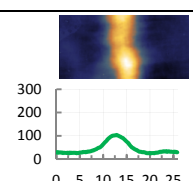
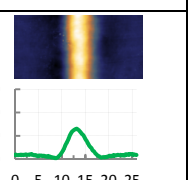
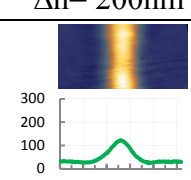
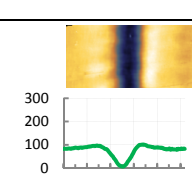
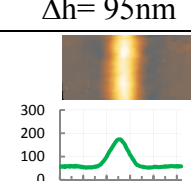
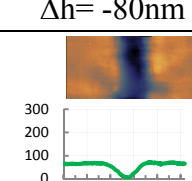
3.2.3. Optiskās spraugas eksperimentu apkopojums

Ieraksta shēmā ievietojot pusviļņa un/vai $\frac{1}{4}$ viļņa plāksnītes, ir iespējams variēt ieraksta un papildus apgaismojuma polarizācijas un iegūtos ieraksta reljefus nomērīt ar *Veeco CPII* AFM. Šādu eksperimentu rezultātu apkopojums tiks apskatīts šajā sadaļā.

3.15. attēlā rezultātu apkopojums ir izkārtots tabulas veidā. Vairākām polarizāciju kombinācijām (attēlā redzamas kā $\Delta h \rightarrow 0$) tika novērotas niecīgas reljefa izmaiņas, kas grūti atšķiramas no līdzenas virsmas. Neizmantojot papildus apgaismojumu, nenozīmīgs ieraksts arī tika novērots pie visām ierakstošo staru polarizācijām (nav atzīmētas attēlā). Pārējās tabulas vietās, kur ir bijis iespējams ierakstīt reljefu, ir attēlots ieraksta 3D AFM attēls un tā profils. Apskatot ieraksta polarizāciju kombinācijas, no kurām veidojas reljefa ieraksts, varam jau daudz vairāk secinājumus izdarīt par polarizētas gaismas intensitātes gradienta iespaidu uz paraugu.

Gadījumā, ja ierakstošā stara polarizācijas virziens sakrīt ar spraugas virzienu (definēta kā s polarizācija), neatkarīgi no papildus apgaismojuma polarizācijas (pirmā rinda 3.15. attēlā: CP- cirkulāra, p- perpendikulāra spraugai vai 45 grādu polarizācija), masas pārnese tiek novērota virzienā prom no gaismas intensitātes gradienta un tiek formēts grāvis. Ieraksta efektivitāte jeb izveidotā grāvja dziļums mainās no labākā gadījuma, kad papildus apgaismojuma polarizācija ir perpendikulāra ieraksta polarizācijai, tad seko 45 grādu un CP polarizācija. Tas pats ir novērojams arī tad, kad ieraksta polarizācija ir perpendikulāra spraugai (p polarizācija,

otrā rinda attēlā), tikai šajā gadījumā masas pārnese tiek novērota tuvāk ieraksta zonai un tiek formēts kalns. Ierakstošā stara polarizācija nav vienīgais faktors, kas nosaka masas pārnese virzienu. Neatkarīgi no ierakstošā stara polarizācijas, pie papildus s polarizēta apgaismojuma tiek novērota kalna veidošanās (pirmā kolona 3.15. attēlā), bet pie p polarizēta papildus apgaismojuma- grāvja veidošanās (otrā kolona attēlā).

	Assisting by s pol.	Assisting by p pol.	Assisting by CP pol.	Assisting by 45° pol.
Rec. by s pol.	w/out $\Delta h \rightarrow 0$	 $\Delta h = -220\text{nm}$	 $\Delta h = -65\text{nm}$	 $\Delta h = -96\text{nm}$
sRec. by p pol.	 $\Delta h = 200\text{nm}$	w/out $\Delta h \rightarrow 0$	 $\Delta h = 78\text{nm}$	 $\Delta h = 113\text{nm}$
Rec. by CP pol.	 $\Delta h = 95\text{nm}$	 $\Delta h = -80\text{nm}$	w/out $\Delta h \rightarrow 0$	w/out $\Delta h \rightarrow 0$
Rec. by 45° pol.	 $\Delta h = 115\text{nm}$	 $\Delta h = -60\text{nm}$	w/out $\Delta h \rightarrow 0$	w/out $\Delta h \rightarrow 0$

3.15. attēls. Optiskās spraugas eksperimentu apkopojums pie dažādām ieraksta jeb gaismas intensitātes gradienta polarizācijām un papildus apgaismojuma polarizācijām, attēlota ir AFM $26 \times 13 \mu\text{m}$ topogrāfija un tā profils $25 \mu\text{m} \times 300\text{nm}$ rāmī

Ieraksts veikts $2.1 \mu\text{m}$ biezā As_2S_3 kārtiņā, ierakstošā stara intensitāte $1000\text{mW}/\text{cm}^2$ un papildus apgaismojums $1500\text{mW}/\text{cm}^2$, ieraksta laiks 1 h

Visas ieraksta polarizāciju kombinācijas 3.15. attēlā ir simetriski izvietojušās attiecībā pret galveno tabulas diagonāli. Tas liecina par to, ka masas pārneses procesos nozīmīgu lomu spēlē ne tikai ierakstošā stara polarizācija, bet arī papildus apgaismojuma polarizācija. Bez attiecīgi polarizēta papildus apgaismojuma ieraksts netiek realizēts. Vislielākā efektivitāte jeb labākais ieraksts tiek iegūts pie savstarpēji ortogonālu ieraksta un papildus apgaismojuma polarizācijas (s/p un p/s ieraksts), kas pie dotajiem ieraksta uzstādījumiem ir aptuveni 200nm. Pamainot ierakstošo staru intensitātes un/vai ieraksta laiku, ir iespējams iegūt augstākus reljefus.

SECINĀJUMI

Doktora darba ietvaros tika veikti visi iepriekš paredzētie uzdevumi, tai skaitā apzināta tiešā ieraksta efektivitātes atkarība no tā parametriem (intensitātes un polarizācijas) un ieraksta apstākļiem, apskatīts gan intensitātes, gan arī polarizācijas sadalījuma teorētiskais modelis dažādiem staru interferences gadījumiem. Izmantojot unikālu un relatīvi vienkāršu iekārtu ir izpētītas tiešā ieraksta iespējas un masas pārnese virzieni ar taisnstūrveida gaismas intensitātes sadalījumu pie dažādām gaismas intensitātēm, polarizācijām un ieraksta laikiem.

Kā jau tika minēts, hologrāfiskā ieraksta laikā, apgaismojot paraugu ar papildus nekoherentu apgaismojumu, ir iespējams palielināt režģu ieraksta efektivitāti- dažos gadījumos pat vairāk nekā simts reizes. Iegūtie režģi ir augstas kvalitātes un praktiski nav iegūstami ne ar kodināšanas, ne litogrāfijas, ne arī kādu citu metodi. Lai iegūtu noteiktu difrakcijas efektivitāti, papildus apgaismojot paraugu, ir iespējams stipri samazināt režģu ieraksta laiku, kas arī uzlabo to kvalitāti un iegūšanas tehnoloģiju. Iegūtais hologrāfiskais režģis ir stabils pie istabas temperatūras un, kopā ar reālā laika virsmas reljefa ieraksta amplitūdas kontroli, iegūtās zināšanas un tehnoloģija var atrast praktisko pielietojumu gan optikā (hologrāfija, litogrāfija, anti-refleksijas pārklājumi, saules baterijas u.t.t.), gan elektronikā (mikro un nano matricu veidošanā), gan nanotehnoloģijās (*top-down* metode), gan arī vēl daudzos citos sektoros.

AIZSTĀVAMĀS TĒZES

1. **Efektīvākais tiešais hologrāfiskais ieraksts** amorfās halkogenīdu plānās kārtiņās **iespējams gadījumos, kad ierakstošie stari ir ar -45 un 45 grādu polarizāciju vai ar pretēji cirkulāru polarizāciju;**
2. **Tiešā hologrāfiskā ieraksta efektivitāti ir iespējams būtiski uzlabot, ieraksta laikā izmantojot papildus nekoherentu vienmērīgu apgaismojumu;**
3. Masas pārnesei nodrošina gaismas elektriskā lauka intensitātes gradients, un **masas pārnese virziens ir atkarīgs no gaismas elektriskā lauka intensitātes gradienta un elektriskā lauka virziena savstarpējā novietojuma;**
4. **Tiešajam hologrāfiskajam ierakstam ir iespējams noteikt aktīvo ieraksta dziļumu** jeb optimālo kārtiņas biezumu, salīdzinot ierakstus no kārtiņas un pamatnes (stikla) puses.
5. Šauras spraugas jeb **taisnstūrveida gaismas intensitātes sadalījuma izmantošana tiešajam ierakstam dod iespēju modelēt hologrāfiskās iekārtas viena atsevišķa perioda ierakstu** gaismu jutīgā materiālā.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] A. Kikineshi, V. Palyok, I. A. Szabó, M. Shipljak, I. Ivan, and D. L. Beke, "Surface deformations and amplitude-phase recording in chalcogenide nanolayered structures," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 326&327, pp. 484-488, 2003.
- [2] Y. Kaganovskii, M. L. Trunov, C. Cserhati, P. M. Lytvyn, D. L. Beke, and S. Kökényesi, "Electron-beam induced variation of surface profile in amorphous As₂₀Se₈₀ films " *J. Appl. Phys.* , vol. 115 (18), p. 183512, 2014.
- [3] R. P. Wang, *Amorphous Chalcogenides: Advances and Applications*: Pan Stanford Publishing, 2014.
- [4] A. Kikineshi, V. Palyok, M. Shiplyak, I. A. Szabo, and D. L. Beke, "Photo- induced surface deformation during hologram recording in a-Se films," *J. of Optoelectronics and Adv. Materials* vol. 2 (1), pp. 95-98, 2000.
- [5] S. Kokenyesi, I. Iván, V. Takátsa, J. Pálkása, S. Birib, and I. A. Szabo, "Formation of surface structures on amorphous chalcogenide films," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 353 (13-15), pp. 1470–1473, 2007.
- [6] V. Palyok, I. A. Szabó, D. L. Beke, and A. Kikineshi, "Surface grating formation and erasing on a-Se films," *Appl Phys A*, vol. 74 (5), pp. 683-687, 2002.
- [7] U. Gertners and J. Teteris, "Photo-induced Mass Transfer in Chalcogenides," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 23, p. 012007, 2011.
- [8] K. E. Asatryan, T. Galstian, and R. Vallée, "Optical Polarization Driven Giant Relief Modulation in Amorphous Chalcogenide Glasses," *Phys Rev Lett*, vol. 94 (8), p. 087401, 2005.
- [9] M. Reinfelde, R. Grants, and J. Teteris, "Photoinduced mass transport in amorphous As-S-Se films," *P hys. Status Solidi C*, vol. 9 (12), pp. 2586–2589, 2012.
- [10] S. K. Tripathy, N. K. Viswanathan, S. Balasubramanian, and J. Kumar, "Holographic fabrication of polarization selective diffractive optical elements on azopolymer film," *Polym Adv Technol* vol. 11 (8 12), pp. 570-574, 2000.
- [11] P. Rochon, A. Natansohn, C. L. Callendar, and L. Robitaille, "Guided mode resonance filters using polymer films," *Appl Phys Lett*, vol. 71 (8), pp. 1008-1010, 1997.
- [12] R. J. Stockermans and P. L. Rochon, "Narrow band resonant grating waveguide filters constructed with azobenzene polymers," *Appl Opt* vol. 38 (17), pp. 3714-3719, 1999.
- [13] J. Paterson, A. Natansohn, P. Rochon, C. L. Callendar, and L. Robitaille, "Optically inscribed surface relief diffraction gratings on azobenzene containing polymers for coupling light into slab waveguides," *Appl Phys Lett* vol. 69 (22), pp. 3318-3320, 1996.
- [14] T. Nagata, T. Matsui, M. Ozaki, K. Yoshino, and F. Kajzar, "Novel optical properties of conducting polymer photochromic polymer systems," *Synth Met* vol. 119 (1 3), pp. 607-608, 2001.
- [15] V. Dumarcher, L. Rocha, C. Denis, C. Fiorini, J. M. Nunzi, F. Sobel, *et al.*, "Polymer thin film distributed feedback tunable lasers," *J Opt A: Pure Appl Opt* vol. 2 (4), pp. 279-283, 2000.
- [16] L. Rocha, V. Dumarcher, C. Denis, P. Raimond, C. Fiorini, and J. M. Nunzi, "Laser emission in periodically modulated polymer films," *J Appl Phys* vol. 89 (5), pp. 3067-3069, 2001.
- [17] C. Egami, Y. Kawata, Y. Aoshima, S. Alasfar, O. Sugihara, H. Fujimura, *et al.*, "Two stage optical data storage in azo polymers," *Jpn J Appl Phys* vol. 39 (3B), pp. 1558-1561, 2000.
- [18] P. S. Ramanujam, M. Pedersen, and S. Hvilsted, "Instant holography," *Appl Phys Lett* vol. 74 (21), pp. 3227-3229, 1999
- [19] R. Zallen, *The Physics of Amorphous Solids*: Wiley-VCH, 1998.

- [20] A. Csik, M. Malyovanika, J. Dorogovicsa, A. Kikineshia, D. L. Beke, I. A. Szabo, *et al.*, "Photo-stimulated structural transformations and optical recording in amorphous semiconductor multilayers," *J Optoelectronics and Adv. Materials*, vol. 3 (1), pp. 33-36 2001.
- [21] M. Fischer, T. Galstian, R. Vallée, and A. Saliminia, "Surface and volume contributions to total diffractive efficiency in As₂S₃ thin film glasses " *Synthetic Metals*, vol. 127 (1-3), pp. 303-306, 2002.
- [22] T. V. Galstyan, J. F. Viens, A. Villeneuve, K. Richardson, and M. A. Duguay, "Photoinduced Self-Developing Relief Gratings in Thin Film Chalcogenide As₂S₃ Glasses," *Lightwave Technology*, vol. 15 (98), pp. 1343 - 1347 1997.
- [23] Y. Hayasaki and D. Kawamura, "High-density bump formation on a glass surface using femtosecond laser processing in water," *Appl. Phys. A*, vol. 87 (4), pp. 691-695, 2007.
- [24] A. Kikineshi, "Light-stimulated structural transformations and optical recording in amorphous nano-lauered structures," *J Optoelectronics and Adv. Materials*, vol. 3 (2), pp. 377-0382, 2001.
- [25] V. Palyok and M. Malyovanik, "Photoinduced extension and optical recording in a-Se/As₂S₃ multilayers," *J Optoelectronics and Adv. Materials*, vol. 1 (3), pp. 77-80, 1999.
- [26] J. U. Park, W. S. Kima, and B. S. Bae, "Photoinduced low refractive index in a photosensitive organic-inorganic hybrid material," *J. Mater. Chem.*, vol. 13, pp. 738-741, 2003.
- [27] E. Spanakis, E. Stratakis, and P. Tzanetakis, "Metastable photoexpansion of hydrogenated amorphous silicon produced by exposure to short laser pulses," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 352 (5), pp. 429-433, 2006.
- [28] M. L. Trunov, "Photoplastic effect in non-crystalline materials: a nanoindentation study," *J Physics D: Appl Physics*, vol. 41, p. 074011 2008.
- [29] H. Ukita, H. Uemi, and A. Hirata, "Near Field Observation of a refractive Index Grating and a Topographical Grating by an Optically-Trapped Gold Particle," *Opt. Rev.*, vol. 11 (6), pp. 1-5, 2004.
- [30] C. Vass, K. Osvay, and B. Hopp, "Fabrication of 150 nm period grating in fused silica by two-beam interferometric laser induced backside wet etching method," *Opt Express*, vol. 14 (18), pp. 8354-8359, 2006.
- [31] F. S. D. Vicente, M. S. Li, and Y. Messaddeq, "Holographic recording in [Sb(Po-3)(3)](n)-Sb₂O₃ glassy films by photoinduced volume and refraction index changes," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 348, pp. 245-249, 2004.
- [32] R. Bachelot, F. H'Dhili, D. Barchiesi, G. Lerondel, R. Fikri, P. Royer, *et al.*, "Apertureless near-field optical microscopy: A study of the local tip field enhancement using photosensitive azobenzene-containing films," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, pp. 2060-2072 2003.
- [33] S. Bian, L. Li, J. Kumar, D. Y. Kim, J. Williams, and S. K. Tripathy, "Single laser beam-induced surface deformation on azobenzene polymer films " *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, p. 1817 1998.
- [34] C. Cojocariu and P. Rochon, "Light-induced motions in azobenzene-containing polymers," *Pure Appl. Chem.*, vol. 76 (7-8), pp. 1479-1497, 2004.
- [35] C. Fiorini, N. Prudhomm, G. d. Veyrac, I. Maurin, P. Raimond, and J. M. Nunzi, "Molecular migration mechanism for laser induced surface relief grating formation," *Synthetic Metals*, vol. 115 (1-3), pp. 121-125, 2000.
- [36] Y. He, J. Yin, P. Che, and X. Wang, "Epoxy-based polymers containing methyl-substituted azobenzene chromophores and photoinduced surface relief gratings," *European Polymer Journal*, vol. 42 (2), pp. 292-301, 2005.

- [37] H. Ishitobi, M. Tanabe, Z. Sekkat, and S. Kawata, "Nanomovement of azo polymers induced by metal tip enhanced near-field irradiation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, p. 091911 2007.
- [38] P. Karageorgiev, D. Neher, B. Schulz, B. Stiller, U. Pietsch, M. Giersig, *et al.*, "From anisotropic photo-fluidity towards nanomanipulation in the optical near-field," *Nat. Mater.*, vol. 4, pp. 699-703 2005.
- [39] D. Y. Kim, S. K. Tripathy, L. Li, and J. Kumar, "Laser-induced holographic surface relief gratings on nonlinear optical polymer films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, pp. 1166-1168, 1995.
- [40] N. Koyayashi, C. Egami, and Y. Kawata, "Optical Storage Media with Dye-Doped Minute Spheres on Polymer Films," *Opt. Rev.*, vol. 10, pp. 262-266 2003.
- [41] F. L. Labarthe, J. L. Bruneel, T. Buffeteau, and C. Sourisseau, "Chromophore Orientations upon Irradiation in Gratings Inscribed on Azo-Dye Polymer Films: A Combined AFM and Confocal Raman Microscopic Study," *J. Phys. Chem. B*, vol. 108, pp. 6949-6960 2004.
- [42] K. Munakata, K. Harada, M. Itoh, S. Umegaki, and 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.*, vol. 191, pp. 15-19 2001.
- [43] L. L. Nedelchev, A. S. Matharu, S. Hvilsted, and P. S. Ramanujam, "Photoinduced anisotropy in a family of amorphous azobenzene polyesters for optical storage," *Appl. Opt.*, vol. 42, pp. 5918-5927 2003.
- [44] P. Rochon, E. Batalla, and A. Natansohn, "Optically induced surface gratings on azoaromatic polymer films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, pp. 136-138 1995.
- [45] C. J. Barrett, P. L. Rochon, and A. L. Natansohn, "Model of laser driven mass transport in thin films of dye functionalized polymers," *J Chem Phys* vol. 109 (4), pp. 1505-1516, 1998.
- [46] T. Fukuda, K. Sumaru, T. Yamanaka, and H. Matsuda, "Photo induced formation of the surface relief grating on azobenzene polymers analysis based on the fluid mechanics," *Mol Cryst Liq Cryst* vol. 345 pp. 587-592, 2000.
- [47] K. Sumaru, T. Yamanaka, T. Fukuda, and H. Matsuda, "Photoinduced surface relief gratings on azopolymer films analysis by a fluid mechanics model," *Appl Phys Lett* vol. 75 (13), pp. 1878-1880, 1999.
- [48] D. Bublitz, B. Fleck, and L. Wenke, "A model for surface relief formation in azobenzene polymers," *Appl Phys B Lasers*, vol. 72 (8), pp. 931-936, 2001.
- [49] D. Bublitz, M. Helgert, B. Fleck, L. Wenke, S. Hvilsted, and P. S. Ramanujam, "Photoinduced deformation of azobenzene polyester films," *Appl Phys B Lasers Opt* vol. 70 (6) pp. 863-865, 2000.
- [50] M. Saphiannikova, T. M. Geue, O. Henneberg, K. Morawetz, and U. Pietsch, "Linear viscoelastic analysis of formation and relaxation of azobenzene polymer gratings," *J Chem Phys* vol. 120 (8), pp. 4039-4045, 2004.
- [51] A. C. Mitus, G. Pawlik, A. Miniewicz, and F. Kajzar, "Kinetics of diffraction gratings in a polymer matrix containing azobenzene chromophores experiment and Monte Carlo simulations," *Mol Cryst Liq Cryst* vol. 416 pp. 113-126, 2004.
- [52] G. Pawlik, A. C. Mitus, A. Miniewicz, and F. Kajzar, "Kinetics of diffraction gratings formation in a polymer matrix containing azobenzene chromophores experiments and Monte Carlo simulations," *J Chem Phys* vol. 119 (13) pp. 6789-6801, 2003.
- [53] G. Pawlik, A. C. Mitus, A. Miniewicz, and F. Kajzar, "Monte Carlo simulations of temperature dependence of the kinetics of diffraction gratings formation in a polymer matrix containing azobenzene chromophores," *J Nonlinear Opt Phy Mater*, vol. 13(3-4), pp. 481-489, 2004.

- [54] P. Lefin, C. Fiorini, and J. M. Nunzi, "Anisotropy of the photo induced translation diffusion of azobenzene dyes in polymer matrices," *Pure Appl Opt* vol. 7 (1) pp. 71-82, 1998.
- [55] P. Lefin, C. Fiorini, and J. M. Nunzi, "Anisotropy of the photoinduced translation diffusion of azo dyes," *Opt Mater*, vol. 9 (1-4), pp. 323-328, 1998.
- [56] T. G. Pedersen and P. M. Johansen, "Mean field theory of photoinduced molecular reorientation in azobenzene liquid crystalline side chain polymers," *Phys Rev Lett* vol. 79 (13) pp. 2470-2473, 1997.
- [57] T. G. Pedersen, P. M. Johansen, N. C. R. Holme, P. S. Ramanujam, and S. Hvilsted, "Mean field theory of photoinduced formation of surface reliefs in side chain azobenzene polymers," *Phys Rev Lett* vol. 80 (1) pp. 89-92, 1998.
- [58] O. Baldus and S. J. Zilker, "Surface relief gratings in photoaddressable polymers generated by cw holography," *Appl Phys B Lasers Opt*, vol. 72 (4) pp. 425-427, 2001.
- [59] S. P. Bian, W. Liu, J. Williams, L. Samuelson, J. Kumar, and S. Tripathy, "Photoinduced surface relief grating on amorphous poly(4 phenylazo phenol) films," *Chem Mater* vol. 12 (6) pp. 1585-1590, 2000.
- [60] J. Kumar, L. Li, X. L. Jiang, D. Y. Kim, T. S. Lee, and S. Tripathy, "Gradient force: the mechanism for surface relief grating formation in azobenzene functionalized polymers" *Appl Phys Lett* vol. 72 (17) pp. 2096-2098, 1998.
- [61] N. K. Viswanathan, S. Balasubramanian, L. Li, S. K. Tripathy, and J. Kumar, "A detailed investigation of the polarization dependent surface relief grating formation process on azo polymer films," *Jpn J Appl Phys* vol. 38 (10) pp. 5928-5937, 1999.
- [62] K. Yang, S. Z. Yang, and J. Kumar, "Formation mechanism of surface relief structures on amorphous azopolymer films," *Phys Rev B* vol. 73 (16), p. 165204 2006.
- [63] A. Ashkin, "Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers," *Proc Natl Acad Sci USA* vol. 94 (10) pp. 4853-4860, 1997.
- [64] P. C. Chaumet and M. N. Vesperinas, "Time averaged total force on a dipolar sphere in an electromagnetic field," *Opt Lett* vol. 25 (15) pp. 1065-1067, 2000.
- [65] V. G. Zhdanov and V. K. Malinovsky, "Photoinduced birefringence and dichroism in As₂S₃ films," *Sov. Tech. Phys. Lett.*, vol. 3, pp. 387-388, 1977.

AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

SCI publikācijas par promocijas darba tēmu:

1. **U.Gertners**, J.Teteris, Light intensity and its polarization relation to the photoinduced mass movement in thin layers of chalcogenide vitreous semiconductors, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, (November-December 2011), Vol. 13, No 11-12, pp. 1462-1466;
2. A.Gerbreders, J.Aleksejeva, **U.Gertners**, J.Teteris, The synthesis of different variants of azo-polyurethane polymers for optical recording, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, (November-December 2011), Vol. 13, No 11-12, pp. 1559-1562;
3. **U.Gertners**, J.Teteris, Surface relief formation in amorphous chalcogenide thin films during holographic recording, *Optical Materials*, 32 (8), (June 2010), 807-810;
4. **U.Gertners**, J.Teteris, Surface relief formation during holographic recording, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 11 (12), (December 2009), 1963-1966.

Citas publikācijas par promocijas darba tēmu:

5. **U.Gertners**, Z.Gertnere, E.Potanina, J.Teteris, Optical-field induced volume- and surface-relief formation phenomenon in thin films of vitreous chalcogenide semiconductors, *Proc. of SPIE*, Vol.8836, (September 2013), 88360X;
6. **U.Gertners**, J.Teteris, Photo-induced Mass Transport in Thin Films of Amorphous As_2S_3 , *Physics Procedia*, Vol.44, (May 2013), 45 – 51;
7. J.Teteris, M.Reinfelde, J.Aleksejeva, **U.Gertners**, Optical field-induced mass transport in soft materials, *Physics Procedia*, Vol.44, (May 2013), 151 – 158;
8. **U.Gertners**, J.Teteris, The impact of light polarization on the direct relief forming processes in As_2S_3 thin films, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol.38, (August 2012), 012026;
9. J.Teteris, **U.Gertners**, Optical field-induced surface relief formation on chalcogenide and azo-benzene polymer films, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol.38, (August 2012), 012012;
10. **U.Gertners**, J.Teteris, Photo-induced Mass Transfer in Chalcogenides, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol.23, (June 2011),

- 012007;
11. J.Teteris, **U.Gertners**, M.Reinfelde, Photoinduced mass transfer in amorphous As_2S_3 films, *Physica Status Solidi (c)*, 8, (May 2011), 2780–2784;
 12. J.Teteris, J Aleksejeva, **U.Gertners**, Photoinduced mass transport in soft materials, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol.23, (June 2011), 012002.

DALĪBA ZINĀTNISKĀS KONFERENCĒS

1. **U. Gertners**, J. Teteris, Z. Gertnere, E. Potanina, Direct Light-Induced Surface Patterning in a-As₂S₃ Thin Films, Scientific Conference of Physics and Natural Sciences: Open Readings, Vilnius, Lithuania, March 19-21, 2014
2. **U. Gertners**, J. Teteris, Z. Gertnere, E. Potanina, Investigation of Several Techniques for Light Induced Surface Patterning, 5th International Conference on Radiation interaction with materials: fundamentals and applications, Kaunas, Lithuania, May 12-15, 2014
3. **U. Gertners**, J. Teteris, Gaismas inducētās izmaiņas amorfās As₂S₃ plānās kārtiņās, LU CFI 29.zinātn. konference, 20. – 22. februāris 2013
4. **U. Gertners**, J. Teteris, Optical-Field Induced Surface-Relief Formation Phenomenon in Thin Films of Vitreous Chalcogenide Semiconductors, International conference Functional materials and nanotechnologies (FMNT13), Tartu, Estonia, April 21-24, 2013
5. **U. Gertners**, J. Teteris, Optical-field Induced Surface-relief Modification in Amorphous As₂S₃ Films, 6th International Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides (ANC6), Brasov, Romania, June 24-28, 2013
6. **U. Gertners**, Z. Gertnere, E. Potanina, J. Teteris, Optical-field induced volume- and surface-relief formation phenomenon in thin films of vitreous chalcogenide semiconductors, SPIE Optics + Photonics 2013, San Diego, ASV, August 24-29, 2013.
7. **U. Gertners**, J. Teteris, The Impact of Light Polarization on the Direct Relief Forming Processes in As₂S₃ Thin Films, International conference Functional materials and nanotechnologies (FMNT12), Riga, Latvia, April 17-20, 2012, p.176
8. **U. Gertners**, J. Teteris, Photo-induced Mass Transfer in Thin Films of Amorphous As₂S₃, 10th International Conference Solid State Chemistry 2012 (SSC2012), Czech Republic, Pardubice, June 10-14, 2012, p.143
9. **U. Gertners**, J. Teteris, Photo-induced Mass Movement in Chalcogenide Vitreous Semiconductors and Its Direction Versus the Polarization, 16th edition of the International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS12), Genoa, Italy, July 1-6, 2012, MonA-POM.22
10. **U. Gertners**, J. Teteris, Surface relief modulation phenomena by light induced interference, 18th International Symposium on Non-Oxide

and New Optical Glasses (ISNOG12), St. Malo, France, July 1-5, 2012, II-P31

11. **U.Gertners**, Foto-inducētā masas pārbīde halkogenīdos, LU CFI 27.zinātn. konference, 14. – 16. februāris 2011, 86.lpp.
12. **U.Gertners**, J.Teteris, Photo-induced Mass Transfer in Chalcogenides, Int. Conf. Functional materials and nanotechnologies (FM&NT2011), Latvia, Riga, April 5 – 8, 2011, p.110.;
13. J.Teteris, **U.Gertners**, Photoinduced Mass Transport in Soft Materials, Int. Conf. Functional materials and nanotechnologies (FM&NT2011), Latvia, Riga, April 5 – 8, 2011, p.62.;
14. **U.Gertners**, J.Teteris, Light intensity and Its Polarization Relation to the Photo-induced Mass Movement in Thin Layers of Chalcogenide Vitreous Semiconductors, 5th International Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides (ANC5), Magurele-Bucharest, Romania, June 26 – July 1, 2011, p.35.;
15. J.Teteris, J.Aleksejeva, **U.Gertners**, Photoinduced Mass Transport in Amorphous Chalcogenide and Organic Polymer Films, 24th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS24), Nara, Japan, August 21 – 26, 2011, p.38.;
16. **U.Gertners**, J.Aleksejeva, J.Teteris, Photo-induced Structural Transformations in Chalcogenide Vitreous Semiconductors, 24th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS24), Nara, Japan, August 21 – 26, 2011, p.143.;
17. **U.Gertners**, Direct Photo-induced Surface-relief Formation in Thin Layers of Chalcogenide Vitreous Semiconductors, The 13th International Conference – School: Advanced Materials and Technologies 2011, Lithuania, Palanga, August 27 – 31, 2011, p.46.
18. J.Teteris, **U.Gertners**, M.Reinfelde, Photoinduced Mass Transfer in Disordered Materials, 17th International Symposium on Non-Oxide and New Optical Glasses (XVII ISNOG), Ningbo, China, June 13 – 18, 2010;
19. **U.Gertners**, Surface Relief Modulation Phenomena by Light Induced Interference, 4th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA2010), Budapest, Hungary, August 15 – 18, 2010, p.230.;
20. J.Teteris, **U.Gertners**, M.Reinfelde, Photoinduced Mass Transfer in Soft Materials, 4th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA2010), Budapest, Hungary, August 15 – 18, 2010, p.204.;

PATEICĪBA

Darba autors izsaka pateicību savam darba vadītājam Dr. phys. Jānim Teterim par vērtīgām idejām un diskusijām visā studiju garumā. Paldies arī Virsmas fizikas laboratorijai par iespēju izmantot laboratorijas iekārtas.

Vislielākā pateicība manai sievai Zandai par morālo atbalstu.

Īpaša pateicība par finansiālo atbalstu šī darba tapšanā un rezultātu prezentēšanā Eiropas Sociālā fonda projektam „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē”



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**
ANNO 1919