



**LATVIJAS UNIVERSITĀTE**  
**FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE**  
**CIETVIELU FIZIKAS INSTITŪTS**

**OJĀRS BALCERS**

**HALKOGENĪDU AMORFU PLĀNU KĀRTIŅU**  
**FOTOTERMISKĀS ĪPAŠĪBAS**

Promocijas darbs

doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē

materiālu fizikas apakšnozarē

**Zinātniskais vadītājs: CFI Optiskā ieraksta lab. vadītājs**

**Dr.fiz. JĀNIS TETERIS**

RĪGA  
2008

*Promocijas darbs izstrādāts*

Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātē, LZA Fizikas un LU Cietvielu fizikas institūtos no 1989.gada līdz 1992.gadam un 2004.gada līdz 2008.gadam. Promocijas darbā daļēji iekļauts 1992. un 1993.gadā Oksfordas Universitātes Materiālu zinātnes fakultātē veiktais fāžu pārejas kinētikas pētījums.

*Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā Fonda atbalstu.*

*Promocijas darba vadītājs:*

Dr.fiz. Jānis Teteris, LU CFI Optiskā ieraksta lab. vadītājs

*Recenzenti:*

Akadēmiskais tituls	Zinātniskais grāds	Vārds	Uzvārds	Universitāte
	Dr.			
	Dr.			
	Dr.			

*Promocijas padomes sastāvs:*

Akadēmiskais tituls	Zinātniskais grāds	Vārds	Uzvārds	Padomes
	Dr.			
	Dr.			
	Dr.			
	Dr.			
	Dr.			
	Dr.			
	Dr.			
	Dr.			
	Dr.			

Promocijas darbs pieņemts aizstāvēšanai ar

.....

promocijas padomes .....

lēmumu Nr. ....

Promocijas darba atklāta aizstāvēšana notiks LU ..... promocijas padomes  
sēdē 2008.gada ..... , Rīgā, Ķengaraga ielā 8, 1. auditorijā.

Ar promocijas darbu iespējams iepazīties Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas  
institūta bibliotēkā, Rīgā, Ķengaraga ielā 8.

Atsauksmes sūtīt: Dr. ...., Fizikas un matemātikas fakultāte,  
Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas institūts, Ķengaraga ielā 8, Rīga, Latvija.

## REFERĀTS

Disertācijā ir 127 lpp., 33 zīmējumi un 7 tabulas. Disertācija sastāv no 3 daļām. Literatūras sarakstā iekļautas atsauces uz 70 zinātniskiem darbiem.

Atslēgas vārdi: AMORFIE HALKOGENĪDI, FĀŽU PĀREJU KINĒTIKA, PLĀNĀS KĀRTIŅAS, OPTISKIE SENSORI

Promocijas darba pirmais mērķis ir iegūt informāciju par fotoinducētas struktūras izmaiņas (turpmāk - FSI) procesiem amorfos halkogenīdos. Otrs mērķis ir noskaidrot kā iegūto informāciju iespējams izmantot praktiskiem lietojumiem veidojot difraktīvus optiskos elementus (turpmāk - DOE) un sensoru materiālus. Motivācija risināt problēmu ir iespēja noskaidrot FSI fundamentālos procesus un jaunu zināšanu ieguve, tādu kā fāžu pāreju reversivitāte un kinētiskās likumsakarības. Otrkārt, motivācija ir iegūto zināšanu praktiskās izmantošanas pārbaude DOE veidošanā un sensora materiāla izpētē infrasarkanajā spektra reģionā, un kā arī sensora prototipa ierīces izveidošana. DOE veidošanā nepieciešams halkogenīdu stiklu plānā kārtiņā ierakstīt difrakcijas režģus, un veikt redzamās un infrasarkanās gaismas ievadu un izvadu minētajā kārtiņā- planārā gaismas vadā.

Disertācijā pētīta bināru halkogenīdu - (S, Se) savienojumu uzputinātu plānu kārtiņu veidā uz stikla pamatnes fototermiskās īpašības. Halkogenīdu paraugi uzputināti LU CFI Optiskā ieraksta laboratorijā un LZA Fizikas institūtā.

Trijiem  $Sb_xSe_{1-x}$  sastāviem ( $x=0,40; 0,50; 0,75$ ) pirmoreiz izmērīti fotoinducēto fāžu pāreju ilgumi. Eksperimentāli pierādīta fotoinducēto fāžu pāreju ( $a \leftrightarrow c$ ) reversivitāte. Konstatēts, ka kristalizācijas laiki mainās mainoties  $Sb_xSe_{1-x}$  sastāvam. Novērtēta kārtiņas siltumvadības ietekme uz fotokristalizācijas procesu.

Rezultāti liecina par fotoinducēto fāžu pāreju procesa termisko raksturu. Izveidotā eksperimentālā metode ir labi piemērota fāžu pāreju kinētikas mērījumiem.

Veikts difrakcijas režģu ieraksts ( $\Lambda$  no 435nm līdz 8 $\mu$ m). Tas ir pietiekoši darbam, lai būtu iespējams strādāt ar krītošo  $\lambda \leq 16\mu$ m infrasarkanā gaismu. Veikts 635nm un 808nm staru ievads  $As_2S_3$  plānā kārtiņā. Difrakcijas efektivitāte palielinās palielinoties viļņu garumam. Pētīts lāzeru staru ievads un izvads šajos paraugos gan caur parauga skaldni, gan caur citu difrakcijas režģi.  $As_2S_3$  plānas kārtiņas planārā viļņvadā iespējams ierakstīt difrakcijas režģus, tādējādi integrējot vienā ierīcē gaismas ievada mezglu, planāro viļņvadu un izvada mezglu.

Termiskie un mehāniskie eksperimentāli pētījumi strauji dzesētai metālisku stiklu matricai vispārīgākā gadījumā papildina zināšanas par kristāliskas fāzes veidošanos nekrīstāliskā matricā un radušos fāžu mehānisko īpašību izpēti leģēšanas ietekmes noskaidrošanai. Metāliskos stiklos leģēšana ietekmē matricas kristalizācijas tendenci, fāžu sastāvu un matricas fizikālās īpašības.  $Sb_xSe_{1-x}$ , kā minēts iepriekš, FSI izmaiņas process ir atkarīgs no sastāva.

Darba rezultāti aktualizē jautājumu par viļņvadu, optisko slēdžu un optiskā ieraksta vides fototermisku veidošanu halkogenīdu plānās kārtiņās. Pēc viļņvadu veidošanas un sistēmas ģeometrisku parametru optimizācijas ir iespējama sensoru veidošana darbam ar šķīdumiem, kuros atrodas videi un iedzīvotāju veselībai aktuālas indikatorvielas- optiski aktīvas spektra infrasarkanajā daļā līdz 16 $\mu$ m.

Promocijas darba pirmā daļa satur konspektīvu literatūras apskatu - pārskatu par pētāmās sistēmas un procesu svarīgākajām īpašībām. Otrajā daļā pastāstīts par objektiem un eksperimenta metodiku. Trešajā daļā apkopoti iegūtie rezultāti un raksturots ķīmisko vielu sensora sistēmas izveides modelis.

## ABSTRACT

There are 127 pages, 33 figures and 7 tables in this PhD thesis. The work consists of three parts. 70 scientific works are referred to within the PhD thesis.

Keywords: AMORPHOUS CHALCOGENIDES, PHASE TRANSITION KINETICS, THIN FILMS, OPTICAL SENSORS

The first goal of the doctoral thesis work is to gain knowledge about photoinduced structural change (PSC) processes in amorphous chalcogenides. Second goal is to study how it is possible to apply the knowledge practically creating diffractive optical elements (DOE) and sensor materials. The motivation to study the problem are opportunities for clarification PSC fundamental processes and gain new knowledge, such as phase transition reversibility and kinetic regularities. Secondly, the motivation is practical usability testing of gained knowledge in creating DOE and sensor material research in the infrared spectral region, as well as the creation of sensor prototype device. When creating DOE in chalcogenide glass thin film it is necessary to record DOEs and to transfer visible and infrared light into and out the film- planar waveguide.

In the doctoral thesis work the photothermal properties of the binary chalcogenides (S, Se) systems sputtered onto glass substrates in form of thin films is studied.  $As_2S_3$  samples are sputtered in the Optical Recording Laboratory of the Latvian University Institute of Solid State Physics and at the Institute of Physics.

For three  $Sb_xSe_{1-x}$  compositions ( $x=0.40, 0.50, 0.75$ ) photoinduced phase transition lengths have been measured. The reversibility of photoinduced phase transition ( $a \leftrightarrow c$ ) has been experimentally proved. It has been established that

crystallisation time lengths varies with compositional sample change in  $Sb_xSe_{1-x}$ . The influence of substrate thermal conductivity on photocrystallization process was evaluated. The results demonstrate the thermal character of photoinduced phase transition process. A new, developed experimental method is well suited for measuring phase transition kinetics.

Diffraction gratings (435nm - 8 $\mu$ m) were recorded. This enables work with infrared light  $\leq 16\mu$ m. 635nm and 808nm laser beams coupling into  $As_2S_3$  thin films have been performed. The diffraction efficiency increases with the increase of wavelength. The laser beam coupling into these samples and out was studied both through samples' side facet as well as diffraction gratings. It is shown possible into  $As_2S_3$  thin films to record diffraction gratings as well as to integrate into one device light input node, planar waveguide and output node.

Studies of rapidly cooled matrix of metallic glass add knowledge in a general way about forming of crystalline phase within noncrystalline matrix and dependence of created phase mechanical properties on alloying. In metallic glasses alloying influences crystallisation tendency, phase composition and matrix properties.

The results of doctoral thesis work update on problem of photothermal creation of waveguide, optical switches and optical recording media in chalcogenide thin films. After optimizing of system geometrical parameters it is possible to create water solution sensors for environmental and population health significant analytes that are optically active in the infrared part of the spectrum up until 16 $\mu$ m.

The first part of the promotion work contains literature review of the most important features of system and studied processes. The preparing of samples and experimental setup is reviewed in the second part. The third part contains results of dissertation and the chemical sensor system prototype model is characterized.

## РЕФЕРАТ

Диссертация содержит 127 страниц, 33 иллюстраций и 7 таблиц. Диссертация состоит из трёх частей. В списке литературы 70 названий.

Ключевые слова: АМОΡФНЫЕ ХАЛЬКОГЕНИДЫ, КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ, ТОНКИЕ ПЛЁНКИ, ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОΡЫ

Основная цель работы – получение информации о процессах фотоиндуцированных структурных изменений (далее – ФСИ) в аморфных халькогенидах. Вторая цель – найти возможность применения полученной информации для создания дифракционных оптических элементов (далее – ДОЭ) и сенсорных материалов. Мотивация решения проблемы – возможность изучения фундаментальных процессов ФСИ и получения новой информации, например, о реверсивности фазовых переходов и кинетических закономерностях. Во-вторых, мотивация заключается в проверке практического применения полученных знаний для создания ДОЭ и изучения сенсорного материала в инфракрасной области спектра, а также разработке прототипа сенсорного прибора. Для создания ДОЭ необходимо записать дифракционные решётки в тонких плёнках халькогенидовых стёкол и изучить ввод и вывод видимого и инфракрасного света в упомянутых плёнках – планарном световоде.

В диссертации рассматриваются фототермические свойства соединений бинарных халькогенидов (S, Se), напылённых в виде тонких плёнок на стеклянную основу. Образцы  $As_2S_3$  напылены в лаборатории оптической записи

Института физики твёрдого тела Латвийского университета и Института Физики Латвийской Академии наук.

Впервые измерена длительность фотоиндуцированных фазовых переходов для трёх составов  $Sb_xSe_{1-x}$  ( $x = 0,40; 0,50; 0,75$ ). Экспериментально доказана реверсивность фотоиндуцированных фазовых переходов ( $a \leftrightarrow c$ ). Констатируется изменение времени кристаллизации при изменении состава. Оценено влияние теплопроводности плёнки на процесс фотокристаллизации. Результаты свидетельствуют о термическом характере процесса фотоиндуцированных фазовых переходов. Разработанная экспериментальная методика хорошо применима для измерения кинетики фазовых переходов.

Осуществлена запись дифракционных решёток ( $\Lambda$  от 435 нм до 8  $\mu$ м). Этого достаточно для работы с падающим инфракрасным светом  $\lambda \leq 16 \mu$ м. Осуществлено введение лучей 635 нм и 808 нм в тонкую плёнку  $As_2S_3$ . Эффективность дифракции растёт с длиной волны.

Изучен ввод и вывод лазерного луча в эти образцы как сквозь грань образца, так и через другую дифракционную решётку. В планарный волновод тонкой плёнки  $As_2S_3$  можно записать дифракционные решётки, интегрировав таким образом узел ввода света, планарный световод и узел вывода света в одном устройстве.

Термические и механические экспериментальные исследования резко охлаждённой матрицы  $Fe_{70}Cr_{20}B_{10}$  с добавлением (Nb, V, Mo) в общем случае дополняют сведения об образовании кристаллической фазы в некристаллической матрице и исследовании механических свойств образовавшейся фазы для изучения влияния легирования. Легирование металлических стекол влияет на тенденцию кристаллизации матрицы, её



физические свойства и состав фазы. В  $Sb_xSe_{1-x}$ , как уже упоминалось, процессы ФСИ зависят от состава.

Результаты работы актуализируют вопрос о фототермическом создании волноводов, оптических затворов и сред оптической записи в халькогенидовых тонких плёнках. После создания волноводов и оптимизации геометрических параметров системы возможна разработка сенсоров для работы с жидкостями, поглощающими в инфракрасной области спектра до 16 мкм. Многие вещества-индикаторы, важные для здоровья населения и среды, оптически активны именно в этом спектральном диапазоне.

В первой части диссертации конспективно изложен обзор литературы о важнейших свойствах изучаемой системы и процессов. Вторая часть описывает объекты и методику эксперимента. В третьей части обобщены полученные результаты и охарактеризована модель создания оптического сенсора для распознавания химических веществ.

## SATURS

	lpp.
REFERĀTS .....	3
ABSTRACT .....	5
РЕФЕРАТ .....	7
SATURS .....	10
IEVADS .....	12
1. LITERATŪRAS APSKATS .....	15
1.1. Halkogenīdu īpašību raksturojums .....	15
1.1.1. $Sb_xSe_{1-x}$ sistēma .....	16
1.1.2. $As_2S_3$ .....	19
1.2. Fototermisko procesu modelis .....	21
1.2.1. Optisko procesu raksturojums .....	21
1.2.2. Termisko procesu dinamika .....	22
1.2.3. Kristalizācija nekristāliskā matricā .....	29
1.2.4. Ar gaismas izplatīšanos viļņvadā saistītie jēdzieni .....	31
1.3. Saistītas tematikas apskats .....	42
1.3.1. Lāzeru, viļņvadu un sensoru tehnoloģiju attīstība .....	42
1.3.2. Molekulārā spektroskopija .....	49
2. OBJEKTI UN EKSPERIMENTA METODIKA .....	51
2.1. Mērījumu objektu izvēle un raksturojums .....	51
2.1.1. $Sb_xSe_{1-x}$ plānu kārtiņu sistēma .....	52
2.1.2. $As_2S_3$ plānu kārtiņu paraugi .....	55
2.1.3. Metālisku stiklu matrica .....	57

2.2. Mēriekārtu uzbūve un mērījumu metodika .....	58
2.2.1. $Sb_xSe_{1-x}$ plānu kārtiņu sistēmas eksperimentālā izpēte .....	58
2.2.2. $As_2S_3$ plānu kārtiņu pētījumi .....	63
2.2.3. Metālisku stiklu matricas īpašību analīze .....	67
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA .....	69
3.1. Fototermiskie pētījumi $Sb_xSe_{1-x}$ sistēmā .....	69
3.1.1. Amorfu $Sb_xSe_{1-x}$ kārtiņu kristalizācija .....	69
3.1.2. Fāžu pāreju $a \leftrightarrow c$ reversivitāte un $Sb_xSe_{1-x}$ kārtiņu fotoamorfizācija ...	74
3.2. Optiskie pētījumi $As_2S_3$ .....	80
3.2.1. Hologrāfiskais Brega režģa ieraksts ar dažādiem difrakcijas režģa parametriem, $\Lambda$ .....	80
3.2.2. Atstarotā, caurizejošā, un difragēto gaismas staru leņķiskā atkarība sarkanajai un tuvajai infrasarkanajai gaismai .....	89
3.2.3. Stara ievads un izvads .....	98
3.3. Metālisku stiklu sastāvu modifikācija .....	101
3.4. Darba turpmākās attīstības virzieni .....	104
3.4.1. Optisko balinātājus saturoša šķīduma salīdzinoša indikācija .....	104
3.4.2. Amorfo halkogenīdu viļņvadu pilnveidošana .....	110
AIZSTĀVĀMĀS TĒZES .....	113
SECINĀJUMI .....	114
NOBEIGUMS (perspektīva) .....	116
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS .....	117
PATEICĪBA .....	122
PIELIKUMS. AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS .....	123

## IEVADS

Fundamentāls materiālu fizikas uzdevums ir pētīt materiālu fizikālās īpašības. Piemērotu, izpētīto fizikālo īpašību praktiskas izmantošanas analīze ir vēl viens zinātņu nozares uzdevums. Promocijas darbā svarīgākie pētītie materiāli ir halkogenīdu stikli plānu kārtiņu formā un ir veikta šo materiālu, iedarbojoties ar lāzeru, īpašību analīze atsevišķu, praktiski iespējamu lietojumu kopsakarībā.

### Tēmas aktualitāte

Halkogenīdu stikli ir nekristālisko pusvadītāju grupa, kuru atklāja pagājušā gadsimta piecdesmitajos gados [1]. Halkogenīdi var būt gan sakārtotā (kristāliskā), gan nesakārtotā (stikla, amorfā) stāvoklī. Halkogenīdos iespējams ar lāzera palīdzību veikt fotoinducētas struktūras izmaiņas (turpmāk - FSI) [2], t.sk., atgriezeniskas (amorf(a) $\leftrightarrow$ kristālisk(c)), un veidot difraģējošas struktūras. FSI ir atkarīgas no matricas tendences kristalizēties un tās amorfā stāvokļa stabilitātes. Līdz ar to FSI un matricas amorfa stāvokļa stabilitāte ir saistāma ar plašāku jautājumu par nekristālisku vielu uzbūvi un īpašību saistību ar nekristāliskas matricas īpašībām un kristalizācijas tendenci [3, 4].

Halkogenīdu stikli ir perspektīvi dažādos lietojumos tautsaimniecībā, tādos kā plānu kārtiņu formā - optiskā ieraksta vide un difraktīvu optisko elementu (DOE) veidošana. Tāpēc joprojām tiek veikti daudzi eksperimentāli darbi lai labāk izprastu halkogenīdu stiklu fizikālās un ķīmiskās īpašības, kā arī lai noteiktu to piemērotību praktiskiem lietojumiem [5]. Par perspektīvu tiek uzskatīta iespēja halkogenīdus izmantot kā šķidrumu sensorus spektra infrasarkanajā apgabalā [6].

## Darba mērķi un motivācija

Promocijas darba mērķis ir iegūt informāciju par FSI procesiem amorfos halkogenīdos. Otrs mērķis ir noskaidrot kā iegūto informāciju iespējams izmantot praktiskiem lietojumiem veidojot DOE un sensoru materiālus. Tādējādi, pirmkārt motivācija risināt problēmu ir iespēja noskaidrot FSI fundamentālos procesus, un līdz ar to jaunu zināšanu ieguve, tādu kā fāžu pāreju reversivitāte un kinētiskās likumsakarības. Otrkārt motivācija ir iegūto zināšanu praktiskās izmantošanas pārbaude DOE veidošanā un sensora materiāla izpētē infrasarkanajā spektra apgabalā, un sensoru prototipa ierīces izveidošana. DOE veidošanā nepieciešams halkogenīdu stiklu plānā kārtiņā ierakstīt difrakcijas režģus, un veikt redzamās un infrasarkanās gaismas ievadu un izvadu minētajā kārtiņā - planārā gaismas vadā.

Halkogenīdu stiklu plānām kārtiņām nekristāliskā un kristāliskā stāvoklī ir atšķirīgas optiskās īpašības. Tāpēc plānu kārtiņu izpētei ērti lietojamas ir optiskās metodes. Izvirzīto mērķu sasniegšanai promocijas darbā tika pētīta lāzera stara ietekme uz halkogenīdu plānu kārtiņu paraugiem. Darbā tika analizēta iespēja izveidot oriģinālu eksperimentālu metodi ātru FSI procesu pētīšanai amorfos halkogenīdos ar lielu kristalizācijas tendenci.

Vispārīgākā gadījumā kristāliskas fāzes veidošanās likumsakarības strauji dzesētā, nekristāliskā matricā izpratni papildina radušos fāžu mehānisko īpašību izpēte un leģēšanas ietekmes noskaidrošana. Tāpēc promocijas darbā ir iekļauts pabeigts ar kristalizāciju no nekristāliskas matricas un termisko procesu izpēti fāžu pārejās saistīts pētījumu cikls, kurš veikts metāliskos stiklos. Metālisku stiklu matricai piemīt liela kristalizācijas tendence, leģējot mainās kristalizācijas temperatūra, un salīdzinājumā ar halkogenīdu stikliem ir augstāka fāžu pāreju temperatūra. Saistībā ar

aktuāliem fāzi mainošas atmiņas vides pētījumiem noteiktiem  $Sb_xSe_{1-x}$  sistēmas sastāviem tiek atzīmēta zināma līdzība ar metālisku stiklu matricas fāžu maiņu [7].

Promocijas darbā tika izvirzīti sekojoši darba uzdevumi:

1. Izpētīt lāzeru inducēto fototermisko iedarbību amorfās halkogenīdu plānās  $Sb_xSe_{1-x}$  un  $As_2S_3$  kārtiņās.
  - $Sb_xSe_{1-x}$  sistēmā izpētīt fotoinducēto fāžu pāreju ilgumus. Eksperimentāli pārbaudīt fotoinducēto fāžu pāreju (amorfs $\leftrightarrow$ kristālisks) reversivitāti. Pārliecināties vai kristalizācijas laiki mainās mainoties sastāvam. Analizēt fotoinducēto fāžu pāreju procesu termisko procesu modeļa ietvaros.
  - veikt gaismas stara ievadu-izvadu caur difrakcijas režģi un noskaidrot svarīgākās ar stara izplatīšanos viļņvadā saistītās likumsakarības.
2. Pētīt fāžu rašanos no nekristāliskas matricas karsējot amorfu metālisku stiklu matricu ar augstu kristalizācijas tendenci. Izpētīt matricas mehāniskās un termiskās īpašības pievienojot borīdus veidojošus pārejas metālus- Mo, Nb, vai V. Strādājot ar šīm metāla stiklu sistēmām apgūt mūsdienīgas materiālu fizikas eksperimentālās metodes.

### Autora ieguldījums

Darbs tika izstrādāts sadarbībā ar vairākiem zinātniskajiem līdzstrādniekiem. Autora veikums ir eksperimentālo iekārtu izveidošana, uzturēšana un mērījumu veikšana, rezultātu analīze un apkopošana.

Darbs ir apspriests Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas institūta (LU CFI) 2007.gada 15.oktobra zinātniskajā seminārā. Galvenie rezultāti ir publicēti 6 recenzētos rakstos un referēti 12 konferencēs.

## 1. LITERATŪRAS APSKATS

### 1.1. Halkogenīdu īpašību raksturojums

Halkogenīdu stiklus- nekristālisku stiklveida matricu veido viens vai vairāki VI grupas neoksīdu- halkogenīdu elementi (S, Se, Te) un pārejas grupu III, IV un V metāli, piemēram,  $As_2S_3$ ,  $Sb_xSe_{1-x}$ . Šie materiāli ir caurspīdīgi infrasarkanajā spektra daļā. Neliels piejaukumu daudzums var modificēt fizikālās, t.sk. optiskās īpašības. Halkogenīdu stikliem piemīt augsti gaismas laušanas koeficienti (2 – 2,6). Šīs īpašības veido pamatu lai pārbaudītu kā šajos stiklos notiek laboratorijas rīcībā esošo sarkano un infrasarkanā lāzeru staru izplatīšanās.

Sērs un selēns kūstot veido viskozu šķidrumu, kurš atdziestot tiecas veidot stiklus. Pārsvarā gadījumu ķīmiskā saite ir kovalenta. Kausējumu struktūru raksturo sēra un selēna gredzeni un ķēdītes. Šķidrā stāvoklī esošs skābeklis fizikāli atšķiras no izkausēta sēra un selēna ar to, ka skābeklim nav tieksmes veidot stiklus. Telūrs arī neveido stiklus un tam ir salīdzinoši augsta kušanas temperatūra - 453 °C. Telūra stiklus iespējams iegūt strauji dzesējot vai putinot no gāzveida stāvokļa [8].

Stiklu veidošanās (stikla kausējuma un cietas fāzes relaksācija) tendences tiek skaidrotas ar saistītiem kinētiskiem, termodinamiskiem un struktūr-ķīmiskiem kritērijiem [2,4,8]. Divsimt gadu laikā ir attīstījusies konceptuālā saistība starp polimorfismu un vielas, t.sk. halkogenīdu stiklu, spēju veidot nekristālisku vielu. Nekristāliskā matricā iespējami vairāki enerģētiski tuvi lokālie stāvokļi, turklāt tie var būt atkarīgi no temperatūras. Nekristāliskā struktūrā var atrasties kristāliskām vielām raksturīgi strukturāli „fragmenti”. Ir iespējamas gan nelielas un atgriezeniskas lokālā stāvokļa izmaiņas (saistītas ar saišu īpatsvaru un „fragmentu”, (arī „kristaloīdu”), attiecību), gan būtiskas izmaiņas saistītas ar pāreju kristāliskā stāvoklī (un saišu leņķisko pārorganizāciju un būtiskām lokālās struktūras izmaiņām). Tanaka pieļauj

šajos materiālos citu, īpašu maz-dimensionālu, kovalentu, nanocaurulīšu un fulerēnu tipa „iekšēji bezgalīgu objektu” eksistenci. Darbā [9] t.s. barjeru-klāsteru modelis piemērots halkogenīdu stikliem. Modelis pamatojas uz pieņēmumu, ka nekristāliskos pusvadītājos pastāv mikroskopiski vielas apgabali, kurus atdala potenciālu barjeras.

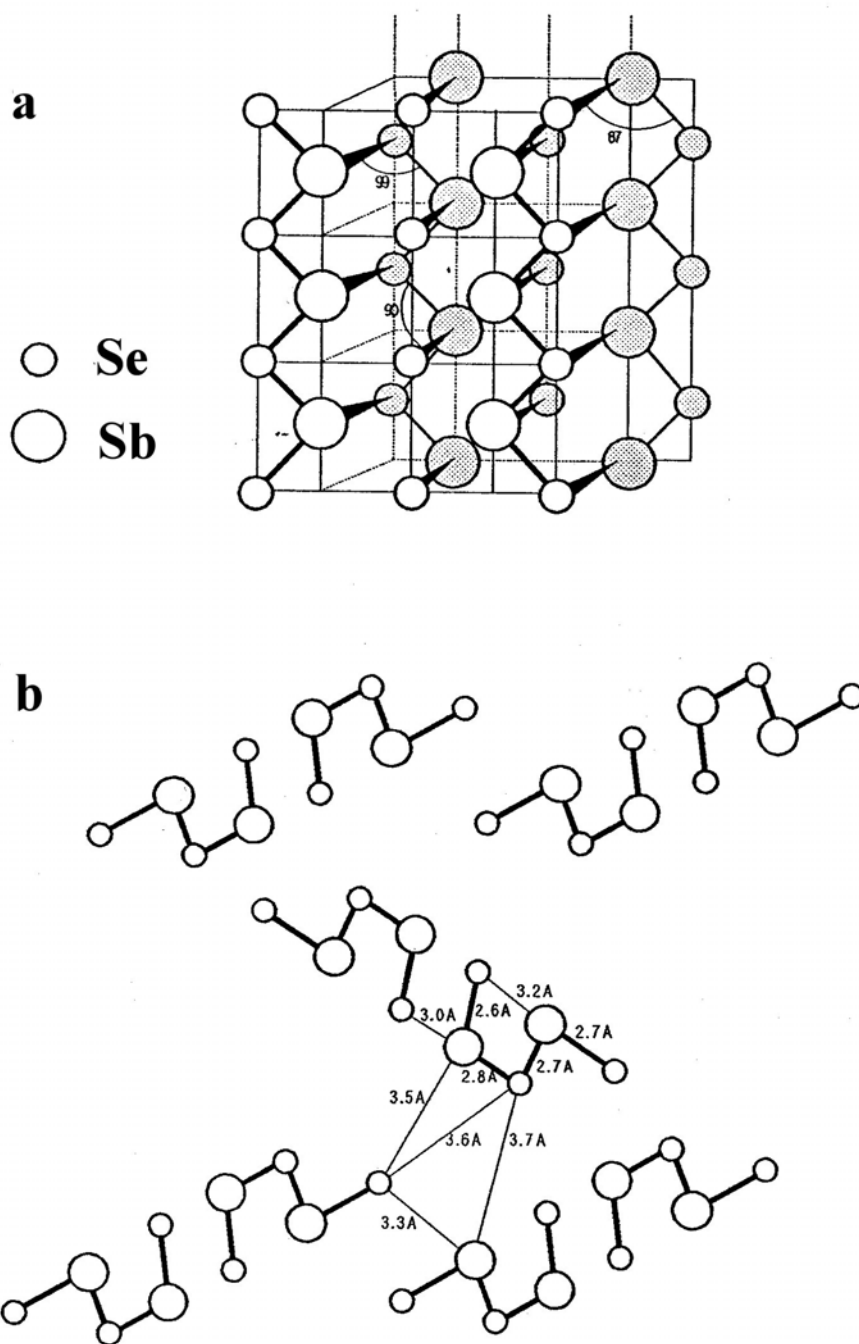
Fotoinducēto efektu izpēte halkogenīdu stiklos ir tehnoloģiski svarīga dažādos praktiskos lietojumos. Detalizēta procesu mehānismu raksturošana ir gan teorētisku, gan eksperimentālu pētījumu mērķis. Tas attiecas gan uz relatīvi nelielām ar atomu pārkārtošanos saistītām izmaiņām, gan arī uz ar būtisku atomu pārkārtošanos saistītu efektu izpēti. Gaismas izraisīto elektronu apakšsistēmas ierosinājumu sabrukšana par fononiem un termiski aktivētu metastabilu stāvokļu veidošanās ir izpētes priekšmets.

#### 1.1.1. $Sb_xSe_{1-x}$ sistēma

Kristāliska selēna kušanas temperatūra ir 217 °C. Tā kausējumā atrodas garas polimēru ķēdītes un kausējums ir viskozs-  $\approx 30$  puazi.  $Sb_xSe_{1-x}$  līdzsvara fāžu diagramma [10] rāda, ka šajā sistēmā var pastāvēt trīs stabilas kristāliskas fāzes - Sb, Se un  $Sb_2Se_3$ . Visās šajās fāzēs struktūru nosaka kovalentās saites starp atomiem, kuru veidošanā piedalās p elektroni.  $Sb_xSe_{1-x}$  kristāliskā struktūra sastāv no lentveidīgām ķēdītēm, kuras paralēlas z asij un veido apmēram 45° ar x un y asīm [11, 12], sk. 1.1. zīm.  $Sb_xSe_{1-x}$  savienojumiem ir samērā stipra amorfizācijas tendence, t.i. tie ir stabili gan kristāliskā, gan amorfā stāvoklī pie samērā augstām (istabas) temperatūrām. Atomu tuvā kārtība amorfā un kristāliskā stāvoklī ir līdzīga, bet saišu garumi un leņķi amorfā stāvoklī nedaudz fluktuē [13]. Se-Se saites enerģētiski ir izturīgākas par Sb-Se un Sb-Sb saitēm. Palielinoties Sb īpatsvaram palielinās materiāla blīvums un strukturās cietība, un samazinās Se ķēdīšu ietekme [14, 15].

Nekristālisku  $Sb_2Se_3$  aizliegtās zonas platums ir par 0,3- 0,6eV lielāks par





1.1. zīm. Kristāliska  $Sb_2Se_3$  atomārā struktūra [11, 12]:

- a- telpisko struktūru veido lentveidīgas  $(Sb_4Se_6)_n$  ķēdītes. Ieēnotie atomi atrodas dziļumā, aiz priekšplāna plaknes;
- b- projekcija paralēli  $(Sb_4Se_6)_n$  ķēdītēm.

Vispārīgā gadījumā tiek uzskatīts, ka kristalizācijas aktivācijas enerģija ir proporcionāla saišu enerģijai.  $Sb_xSe_{1-x}$  sistēmā saišu enerģijas tiek vērtētas [7] Sb-Se (42,9 kcal/mol), Se-Se (44kcal/mol) un Sb-Sb (30,2 kcal/mol). Palielinot Sb īpatsvaru palielinās Sb-Sb saišu īpatsvars un pazeminās kristalizācijas temperatūra.

kristālisku paraugu aizliegtās zonas platumu (1,2eV) [16]. Darba [2] autori uzskata, ka  $Sb_2Se_3$ , līdzīgi citiem nesakārtotiem halkogenīdiem, ir tendence veidot piesātinātas saites.

Paaugstinātās temperatūrās amorfs  $Sb_xSe_{1-x}$  kristalizējas. Plānās šī sastāva kārtiņās, sastāviem  $0,50 \leq x \leq 0,65$  nav sastopama  $Sb_2Se_3$  un Sb kristāliskās fāzes, kuras rodas atdzesējot kausējumu, bet to vietā atklāta jauna metastabila fāze  $Sb_2Se$  [17] un konstatēts, ka tai ir īsi (<200ns) kristalizācijas laiki. Cita šī sastāva metastabilās kristāliskās fāzes modifikācija atklāta darbā [18]. Šāda metastabila fāžu veidošanās tiek izskaidrota ar atomu mazo kustīgumu amorfā vielā temperatūrās, kurās notiek pāreja uz kristālisko stāvokli. Iespējams, ka kristalizācijas tendences strauja palielināšanās no vienas, arī metastabilas, fāzes sastāvošai sistēmai ir vispārīga likumsakarība. Darbā [19] ir minēta metastabila fāze  $Sb_2Se_5$ , bet [12]-  $SbSe$ . Sistēmas  $Sb_xSe_{1-x}$  kristalizācijas tendencei vajadzētu palielināties palielinoties Sb īpatsvaram, jo Sb kristalizācijas tendence ir ievērojami lielāka par Se kristalizācijas tendenci [11].  $Sb_xSe_{1-x}$  līdzsvara stāvokļa diagramā pastāv trīs stabilas fāzes- Sb, Se un  $Sb_2Se_3$ .  $Sb_xSe_{1-x}$  sistēmā iespējama strauja kristalizācijas tendences maiņa un kristalizācijas laika maiņa metastabilo fāžu tuvumā. Kristalizācijas ilguma pētījumi In-Te sistēmā [20] rāda, ka kristalizācijas ātrums palielinās šaurā sastāva diapazonā.

Struktūras pārejas amorfs (a) ↔ kristālisks (c) iespējams ierosināt ar noteiktas intensitātes un garuma lāzera impulsu. Šādas pārejas sauc par fotoinducētajām fāžu pārejām. Eksistē vairāki modeļi, kuri sekmīgi izskaidro atsevišķas pāreju īpašības, bet neizskaidro visu pāreju procesu. Parasti optisko ierakstu skaidro ar fotoinducēto lokālo apgabalu silšanu, tomēr cits viedoklis skaidro, ka fotoinducētās fāžu pārejas ir optisks process. Termiskās un optiskās komponentes attiecības novērtējumi  $Sb_xSe_{1-x}$  sistēmā nav viennozīmīgi [21, 22].

Ļoti vienkāršots modelis [23] kvalitatīvi skaidro svarīgākās  $Sb_xSe_{1-x}$  fototermiskās īpašības ar ļoti stipru elektronu - fononu mijiedarbību, neapskatot atomu novietojumu. Gaismas sliekšņa intensitātes eksistenci var izskaidrot ar to, ka lai notiktu gaismas ierosinātā kristalizācija, uz vadītspējas zonu jāpārnes noteikts skaits ( $10^{20} - 10^{22} \text{cm}^{-3}$ ) elektronu. Šī modeļa trūkumi ir, ka Gibbsa brīvās enerģijas vietā tiek apskatīta sistēmas enerģija. Proti, netiek ņemts vērā fāžu pārejām būtiskais entropijas faktors. Ļoti svarīgi, ka termodinamiskais (enerģētiskais) izdevīgums vēl nenosaka, ka notiks fāžu pāreja laboratorijas laika mērogā. Iemesls, ir atomu kustīgums - „iesaldēšanās” mazāk izdevīgā konfigurācijas struktūrā. Turklāt amorfai vielai, atomu vidējās kārtības (trīs līdz piecas koordinācijas sfēras) robežās, ir raksturīgas samērā stipras lokālā sastāva un sakārtotības telpiskās fluktuācijas. Tāpēc jau temperatūrās  $T < T_{kr}$ , iespējamās lokālas struktūras izmaiņas, bet fāžu pāreja notiks dīgļu rašanās un augšanas veidā. No šī modeļa seko  $a \leftrightarrow c$  stāvokļu pārejas atgriezeniskums. Tas praktiski nav novērojams. Sistēmas kopējā enerģija pieaug, ja tiek absorbēta gaisma.

Gaismas kvanti amorfu halkogenīdu FSI procesos piedalās tieši (pārraujot starpatomu saites un izraisot lokālās struktūras pārkārtošanos) vai pastarpināti, caur režģa siltumsvārstībām – fotoierosinājumam relaksējoties bez gaismas kvantu izstarpēšanas. Ja gaismas intensitāte ir liela, tad abi efekti darbojas vienlaicīgi, bet FSI procesu noskaidrošanai būtu nepieciešams tos atdalīt, proti, noteikt gaismas iedarbību filmas sasilšanā. Viens no promocijas darbā uzdevumiem ir veikt šādus pētījumus.

### 1.1.2. $As_2S_3$

Sēram ir vairākas polimorfās modifikācijas. Kausējumā struktūra ir atkarīga no temperatūras. Pie kušanas temperatūras -  $114 \text{ }^\circ\text{C}$ , viskozitāte ir  $10^{-2}$  puazi. Struktūra galvenokārt sastāv no S8 gredzeniem. Karsējot viskozitāte pieaug un pie

180 °C sasniedzot maksimumu, pēc tam sāk dilt. Maksimumu skaidro ar maksimālu sēra molekulu polimerizāciju (ķēdītēs  $10^5$  -  $10^6$  atomi).

Piejaukumi ietekmē izkausētā sēra struktūru. Sēram savienojoties ar arsēnu iegūst homogēnus  $As_xS_{1-x}$  stiklus plašā sastāvu diapazonā. Plašais stiklošanās apgabals dod iespēju veidot stiklus ar dažādu struktūru, sastāvu un fizikāli - ķīmiskajām īpašībām.  $As_xS_{1-x}$  stikli ir optiski caurspīdīgi  $\lambda \geq 600\text{nm}$  un tam raksturīgas izteiktas fotoinducētas īpašības, ko nosaka starpzonu elektronu pāreja  $\lambda \leq 550$ -  $600\text{nm}$ .

As-S plānās kārtiņās novēro  $As_4S_4$  un  $S_n$  molekulas [24]. Gaismas ( $\lambda < 600\text{nm}$ ) iedarbībā amorfā  $As_2S_3$  kārtiņā notiek strukturālās izmaiņas - palielinās As-S saišu blīvums un notiek kārtiņas nomelnošanās. Viela nonāk metastabilā stāvoklī. Fotonomelnošanās maina  $As_2S_3$  tilpumu (līdz 2%). Pievadot  $As_2S_3$  enerģiju, piemēram, termiski atlaižot (karsējot), novēro fotonomelnošanās atgriezeniskumu un As-As un S-S saišu un  $As_4S_4$  kristaloīdu īpatsvara samazināšanos. Īpašību atgriezeniskumu skaidro ar to, ka pārgrupējas matricu veidojošie fragmenti. Izteikta hipotēze, ka režģa periods atgriezeniski mainās temperatūras ietekmē starp 100°K un istabas temperatūru [25].

Planārā viļņvada struktūrā vājinājums IS diapazonā ir ar kārtu 0.5 dB/cm [26]. Fotoinducētās laušanas koeficienta izmaiņas  $\Delta n \approx 10^{-2}$ . Filmā netiek novērota oksidācija.  $As_2S_3$  stikli tiek komerciāli iegūti sākot ar 20.gs. piecdesmitajiem gadiem. Sešdesmitajos gados tika iegūtas pirmās halkogenīdu optiskās šķiedras. Septiņdesmitajos gados šo materiālu izmanto militārajā jomā termisko attēlu iegūšanai. Astoņdesmito gadu vidū daudzmodu šķiedras spēj izturēt  $CO_2$  lāzera jaudas. Par perspektīvām uzskata  $As_2S_3$  optiskās īpašības infrasarkanajā spektra daļā.  $As_xS_{1-x}$  stikliem ir atstrādāta difrakcijas režģu - trīsdimensionālas hologrāfiskas struktūras ierakstīšanas metodika iedarbojoties ar gaismu.

## 1.2. Fototermisko procesu modelis

### 1.2.1. Optisko procesu raksturojums

Svarīgākie optiskie procesi amorfo halkogenīdu plānajās kārtiņās ir saistīti ar iespēju ierakstīt trīsdimensionālas hologrāfiskas struktūras vajadzīgā dziļumā. Gaisma izraisa struktūras izmaiņas materiālā. Attēlojot to grafiski koordinātu sistēmā pilnā enerģija - konfigurācijas koordināte, mainās potenciālo līkņu forma un, iespējams, arī konfigurācijas koordinātes parametri. Viela nonāk metastabilā stāvoklī (Tanakas modelis). Pievadot materiālam enerģiju, piemēram, paraugu termiski atlaidinot, fotonomelnošanās ir atgriezeniska. Efekts ir saistīts ar absorbcijas joslas malas fizikālajām īpašībām un ar krītošā fotona enerģiju.

Halkogenīdu stikliem ir pietiekoši zemas apstrādes (stiklošanās) temperatūras (aptuveni 150- 300°C) lai integrētu šos materiālus optoelektriskās iekārtās. Principā, režģus iespējams ierakstīt ar tiešām metodēm - tikai iedarbojoties uz materiālu ar gaismu. Halkogenīdu stikliem piemīt simtiem reižu augstāka optiskā nelinearitāte kā silīcijam. Taču materiālu augstais termiskās izplēšanas koeficients ir daudz lielāks par atbilstošo pamatņu termiskās izplēšanas koeficientu un iedarbojoties ar gaismu jāņem vērā mehānisku pārrāvumu iespējamība.

Svarīgākie optiskie procesi ir (1) hologrāfiskā režģa ieraksts, (2) slīpas krišanas gadījumā veidotā difrakcijas aina un krītošās gaismas saistība ar režģa periodu. Lai notiktu difrakcija ierakstāmajam režģa periodam  $\Lambda$  jābūt lielākam par  $\frac{\lambda}{2}$  [27, 28], (3) ievadītās gaismas viļņa pilna iekšējā atstarošanās parauga sistēmā.

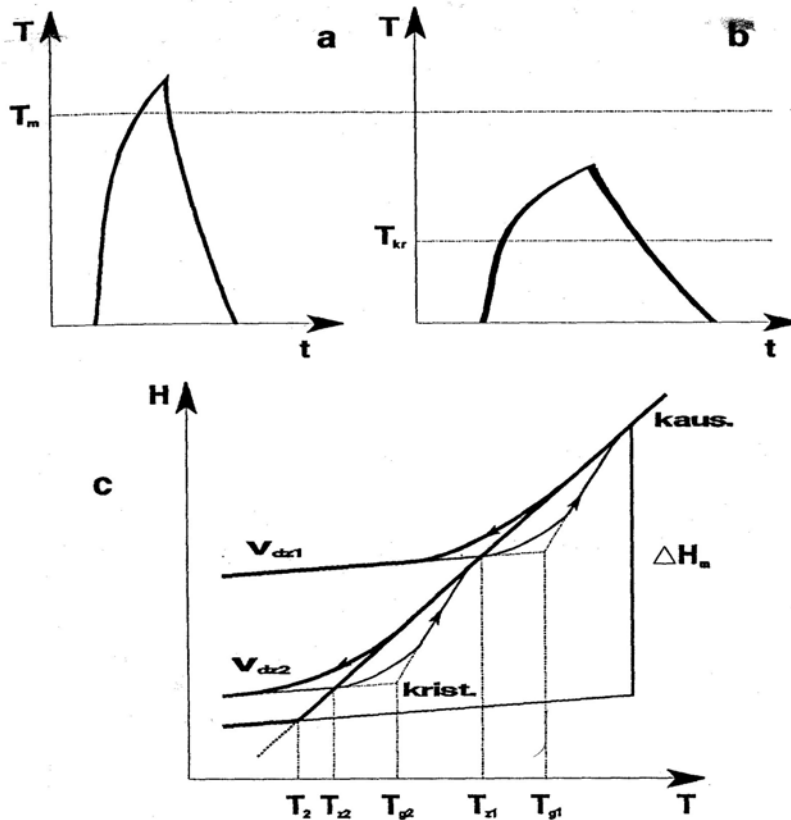
Darbā tiks izveidots modelis, kurš sasaista šos procesus un modelē staru gaitu.

### 1.2.2. Termisko procesu dinamika

Izmantojot izplēstu un tad fokusētu lāzera staru veic optisko ierakstu ar dažādu intensitāti. Stars, kura diametrs  $2\mu\text{m}$ , krīt uz plānu halkogenīda filmas ieraksta kārtiņu. Gaisma daļēji absorbējas filmā un tās ierosinātais apgabals lokāli sakarst. Ja apgabala temperatūra kļūst augstāka par kušanas temperatūru  $T_m$ , apgabals izkūst. Fotoamorfizācijas gadījumā, pēc impulsa beigām izkusušais apgabals tik ātri atdziest ( $10^8$  °K/sek), ka tas neapgūstot kaut cik ievērojami kristalizēties, amorfizējas, sk., 1.2.a. zīm. Šādi amorfi apgabali tiek ierakstīti polikristāliskajā kārtiņā. Amorfas fāzes optiskās īpašības (laušanas un absorbcijas koeficienti) atšķiras no kristāliskās fāzes īpašībām. Optiskā kontrasta dēļ ierakstīto informāciju var nolasīt.

Amorfo apgabalu var rekrystalizēt (optiski dzēst) sildot šo apgabalu zem  $T_m$  ar mazākas jaudas un garāku lāzera impulsu kā to, kas nepieciešams amorfizācijai, sk., 1.2.b. zīm. Paaugstinātā temperatūrā, pieaugot atomu kustīgumam, apgabals atgriežas termodinamiski stabilākajā kristāliskajā stāvoklī - tā optiskās īpašības kļūst vienādas polikristāliskās kārtiņas optiskajām īpašībām.

Amorfas cietas vielas var iegūt no šķidra agregātstāvokļa, ja izdodas „apspiest” kristālisko aizmetņu rašanos un to augšanas procesus. Turklāt kausējuma papildus brīvā enerģija daļēji saglabājas arī sacietējot. Tāpēc var teikt, ka notiek termodinamiski nelīdzsvarota sistēmas stāvokļa „iesaldēšanās”. Pietiekoši lēni atdziestējot kausējumu, sistēma pārdzesēšanas apgabalā atrodas metastabilā termodinamiskā līdzsvarā. Iekšējās enerģijas un entalpijas sadalījums pa sistēmas brīvības pakāpēm paspēj izsekot dzesēšanas ātrumam,  $v_{dz} = \frac{dT}{dt}$ . Mainoties temperatūrai mainās sarauto ķīmisko saišu tips un skaits, nesabrukušo struktūras



1.2. zīm. Fāžu pāreju amorfš↔kristālisks svarīgākie nosacījumi:

- a- fokusēts lāzera stars karsē nelielu ( $d \approx 2\mu\text{m}$ ) kristālisks apgabalu. Pēc kušanas temperatūras  $T_m$ , sasniegšanas apgabals izkūst. Pēc lāzera impulsa beigām izkausētais apgabals strauji atdziestot amorfizējas;
- b- amorfū apgabalu karsējot virs kristalizācijas temperatūras  $T_{kr}$  un zem kušanas temperatūras  $T_m$ , apgabals kristalizējas;
- c- process koordinātās temperatūra  $T$ , sistēmas iekšējā enerģija - entalpija  $H = H(S, p, V)$ , kur  $S$ - entropija,  $p$ - spiediens,  $V$ - tilpums. Pieņem, ka  $Vdp$  nemainās. Izkausētais apgabals var amorfizēties tikai tad, ja tā dzīšanas ātrums ir tik liels, ka tas nepagūst kristalizēties. Dzesējot ar ātrumu  $v_{dz1} > v_{dz2}$ , palielinās stiklošanās temperatūra  $T_{g1} > T_{g2}$ , kurā apgabals „iesaldējas”, proti, nonāk metastabilā termodinamiski nelīdzsvarotā stāvoklī, kuram raksturīgi ilgi relaksācijas laiki. Šī pāreja atspoguļojas entalpijas  $H$  atkarībā no temperatūras  $T$ : temperatūrai pazeminoties līdz vērtībai  $T_g$ , „iesaldējas” sistēmas translātīvās brīvības pakāpes. Temperatūrās  $T < T_g$  atkarību  $H(T)$  praktiski nosaka sistēmas svārstību brīvības pakāpes (līdzīgi kā kristālisks stāvoklim).

elementu izmēri, bīdes, svārstību un rotācijas kustība; samazinoties temperatūrai notiek struktūras relaksācija, kuras raksturīgie laiki pieaug pazeminoties temperatūrai. Laikā  $dt$  temperatūrai pazeminoties par  $dT$  sistēmā iestājas jauns līdzsvara stāvoklis pēc laika  $dt'$ ; ja laika intervāls  $dt$  ir mazāks par  $dt'$ , tad ir novērojama relaksācijas procesu aizkavēšanās. Kausējuma entalpijai aizkavētas relaksācijas gadījumā ir lielāka vērtība, nekā būtu sagaidāms termodinamiskā līdzsvara stāvoklī.

Pārdzesēts kausējums ir metastabils attiecībā pret kristālisku stāvokli, sk. 1.2.c. zīm. Jo lielāks ir dzesēšanas ātrums, jo lielāka ir temperatūra  $T_g$  pie kuras sākas materiāla „iesaldēšanās” (stiklošanās temperatūra). Ja pieņem, ka sistēma tiek dzesēta bezgalīgi lēni, tad tā visu laiku ir tuva termodinamiskajam līdzsvaram. Eksistē tāda temperatūras vērtība  $T=T_z$ , ka pie  $T < T_g$  struktūras raksturīgie relaksācijas laiki katastrofāli palielinās un sistēmas translātīvās brīvības pakāpes praktiski iesaldējas.  $T_2$ - hipotētiska temperatūra, zem kuras bezgalīgi lēni atdzesējot kausējumu, tā entalpija kļūs zemāka par kausējuma kristāla entalpiju ( $T_2$  vienmēr mazāka par reālo stiklošanās temperatūru  $T_g$ ). Par kritisko dzesēšanas ātrumu  $v_{dz\_krit}$  sauc minimālo dzesēšanas ātrumu, pie kura vēl notiek stikla veidošanās. Kritiskais dzesēšanas ātrums ir doto vielu raksturojošs parametrs, kurš saistīts ar tās svarīgu īpašību - amorfizācijas (jeb tai pretējo kristalizācijas) tendenci. Šī tendence ir atkarīga no vielu veidojošo atomu individuālajām un atomu veidoto saišu īpašībām (piem., saišu stipruma un tā atkarības no lokālās struktūras deformācijām), gan no lielāku atomu klāsteru topoloģijas [29].  $v_{dz\_krit}$  daba vēl nav pilnībā izprasta.

Termiskie procesi ir noteicošie fotoinducētajās struktūras pārejās. Tāpēc svarīgs ir jautājums par termisko procesu kinētiku. Lāzera staram iedarbojoties uz plānu pētāmā materiāla kārtiņu, tā sakarst. Fāžu pārejas procesus kārtiņā nosaka siltumvadīšanas mehānisms tanī un, termiskā plūsma no kārtiņas uz pamatni.



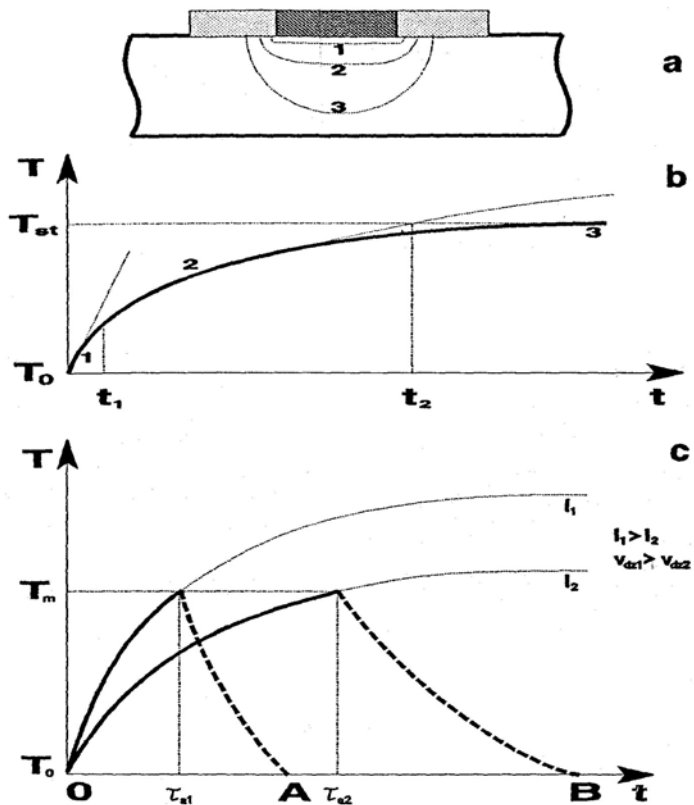
Darbos [30-32] analizēta vairākslāņu sistēmas temperatūras atkarība no laika termiskā modeļa ietvaros un nenotiekot fāžu pārejai. Ieraksta kārtiņas biezums ir  $h$ , bet pamatni uzskata par pusbezgalīgu. Pieņem, ka gaismas absorbcija notiek tikai kārtiņā un siltumvadīšanas koeficienti  $K_i$ , īpatnējās siltumietilpības  $c_i$  un blīvumi  $\rho_i$  ( $i=1,2$ ) attiecīgi kārtiņai un pamatnei nav atkarīgi no temperatūras  $T$ . Gaismas avots ir taisnstūrveida lāzera impulss, kura garums  $\tau$  un priekšējā fronte sākas pie  $t = 0$ . Fotoinducētās silšanas procesu analizē ievēdot stacionāru telpisku siltuma avotu  $q = \frac{I}{h}$ , kur  $I$  - filmas absorbētā intensitāte. Ieved otru, negatīvu avotu - siltuma noteci, kurš nobīdīts par  $\tau$  attiecībā pret siltuma avotu. Gan  $q$ , gan  $S$  novieto gaismas ierosinātajā kārtiņas daļā, atbilstoši absorbētās intensitātes profilam. Notecei priekšējā fronte sākas pie  $t = \tau$ , proti, pēc gaismas impulsa izslēgšanas. Pieņem, ka stars tiek fokusēts uz pamatnes un kārtiņas robežvirsmas punktā, kura rādiuss  $r$  un  $a$  – pamatnes temperatūrvadāmība. Neievērojot siltuma apmaiņu ar apkārtējo vidi un pieņemot, ka siltuma kontakti starp slāņiem ir ideāli, slāņa virsmas temperatūras izmaiņas kinētiku nosaka siltumvadīšanas vienādojumu sistēma ar robežnosacījumiem. To atrisina izmantojot Laplasa transformāciju metodi laikā. Atrisinājums sniegts darbā [30]. Siltumvadāmības vienādojuma atrisinājums, nosaka, ka papildus temperatūras lauks laikā  $\Delta T_a(t)$  ir vienāds ar avota  $q$  un notekas  $S$  lauku summāro ietekmi, arī laikā.

$$\Delta T_a(t) = \Delta T_q(t) + \Delta T_S(t - \tau) = \Delta T_q(t) - \Delta T_q(t - \tau) \quad (1.1)$$

Ierosinātā apgabala karšanai ir trīs raksturīgi posmi, sk. 1.3.a. un b. zīm:

1) ļoti īsiem lāzera impulsa garumiem  $\tau \ll t_1 \ll \frac{h^2}{a_2}$  ( $\approx 10-30$ ns), ( $a_2$  - pamatnes

temperatūrvadāmība) siltums praktiski nepagūst izplatīties pamatnē un kārtiņu var uzskatīt par termoizolētu un pieņemot, ka siltuma izplatīšanās ir maz atkarīga no



1.3. zīm. Kārtnas temperatūras atkarība no ierosinošā lāzera impulsa garuma:

- a- no sakarsētā kārtnas apgabala siltums izplatās pamatnē. Izotermu evolūcijai raksturīgas trīs stadijas:  
 1.- siltuma izplatšanās attālums pamatnē ir mazs salīdzinot ar kārtnas biezumu un ar 2.- ierosinātā apgabala diametru; 3.- temperatūras sadalījums pamatnē kļūst stacionārs. Stacionāra sadalījuma nosacījumi ir, ka viss siltums tiek nodots pamatnei,  $K_1$  ir maz atkarīgi no temperatūras, bet kārtnas biezums  $h \ll r \ll H$ , kur  $H$  – pamatnes biezums.
- b- šīs trīs stadijas nosaka kārtnas ierosinātā apgabala temperatūras  $T$  atkarību no laika: 1.-  $T$  lineāri atkarīga no  $t$ , 2.-  $T$  aptuveni proporcionāla  $\sqrt{t}$ , 3.- pie  $t > t_2$   $T$  tiecas uz kādu stacionāru temperatūras vērtību  $T_s$ ; Laiku kādā iestājas stacionārs laiks var novērtēt kā 1-3 $\mu$ s.
- c- palielinot intensitāti samazinās laiks, kas vajadzīgs, lai sasniegtu kušanas temperatūru  $T_m$  (arī jebkuru citu temperatūru). Siltuma noteces modelis parāda, ka laiks, kādā tiek sasniegta vajadzīgā temperatūra, ir tuvs raksturīgajam laikam, kurā notiek atdzišana līdz sākotnējai temperatūrai  $T_0$ . Tātad, ja  $I_1 > I_2$ , tad dzesēšanas ātrumi  $v_{dz1} > v_{dz2}$ .

temperatūras, bet lāzera stars ir vienīgais siltuma avots. Kārtnas temperatūra laikā pieaug lineāri:

$$\Delta T = T - T_0 \approx \frac{I\tau}{c_1\rho_1h_1} \quad (1.2)$$

2) temperatūras frontes izplatīšanās attālumam kļūstot salīdzināmam ar kārtnas biezumu, kārtni vairs nevar uzskatīt par termoizolētu. Kārtnas temperatūru nosaka galvenokārt viendimensionāla nestacionāra siltuma difūzija pamatnē:

$$\Delta T = \frac{I\tau}{c_1\rho_1h + \frac{\sqrt{\pi c_2\rho_2}\sqrt{a_2t}}{2}} \quad (1.3)$$

Šāda temperatūras atkarība  $\Delta T(t) \sim I\sqrt{t}$  ir spēkā līdz laika momentam  $\tau = t_2 \approx \frac{r^2}{a_2}$ . To var iztēloties kā vidējo temperatūru par kādu stars, pievadot kārtnas virsmas vienībai siltuma daudzumu  $I\tau$ , sasilda pamatni biezumā  $\sqrt{\alpha\tau}$ . Tātad, sasniedzot kušanas temperatūru, mainīgam impulsa garumam, būtu jāseko atkarībai  $I(t) \sim \sqrt{t}$ . Atbilstība šai atkarībai darbā tiks eksperimentāli pārbaudīta (salīdzināt ar 3.4. zīm. 77.lpp.). Kad temperatūras frontes izplatīšanās attālums kļūst salīdzināms ar ierosinātā apgabala izmēriem, šis viendimensionālais nestacionārais siltuma difūzijas modelis vairs nedarbosies.

3) laikiem  $\tau \gg t_2$  pamatnē, pieņem, ka viss siltums nonāk pamatnē un kārtnā iestājas stacionārs temperatūru lauks, bet kārtnas temperatūra tiecas uz kādu

$$T_{st} = \Delta T \approx \frac{Ir}{K_2} \quad (1.4)$$

Palielinot absorbēto intensitāti no  $I_1$  uz  $I_2$  tā, ka  $I_2 = 2I_1$ , piem., palielinot lāzera jaudu, arī temperatūras pieaugums uz parauga virsmas notiks ātrāk (1.3.c.

zīm.). Tātad, lai sasniegtu kādu temperatūru, būs vajadzīgs īsāks laiks  $t_2 < t_1$ . Temperatūra straujāk pieaugs pamatnēm ar mazākiem siltumvadītības koeficientiem.

Filmas virsmas temperatūras atkarību atdzīstot pēc ierosinotā impulsa beigām iegūst izmantojot siltuma noteces metodi [32]. Virsmas temperatūra pēc impulsa  $t$  beigām, laikā  $t > \tau$  ir silšanas uzdevuma vienādojuma (1.1) atrisinājums. Apraujot impulsu laikā  $\tau_{a1,2} < t_2$ , tad kad ir sasniegta kāda temperatūra (piem.,  $T_m$ ) parauga atdzišanas laiks ir tuvs parauga silšanas laikam līdz šai temperatūrai (piem.,  $T_m$ ), sk. 1.3.c. zīm. Ja impulsu aprauj tad, kad paraugā ir nostabilizējies stacionārs temperatūras lauks  $\tau \gg t_2$  dzišanas laiks ir salīdzināms ar raksturīgo uzsilšanas laiku līdz  $T_2$ : t.i. ar laiku  $t_2$ . Mainot  $I$  un  $\tau$  iespējams zināmās robežās regulēt dzišanas ātrumu.

Lāzera stara intensitātei starā ir Gausa sadalījums, tāpēc  $T$  straujāk pieaug ieraksta apgabala centrālajā daļā un izveidojas  $grad T$ . Termiskie procesi ieraksta apgabala centrā notiek visātrāk un  $T_m$  arī tiek sasniegta visātrāk un tas, pēc izkuššanas, var iztvaikot veidojoties ablatīvajam caurumam.

Iespējams arī otrs mehānisms ablatīvā cauruma veidošanā. Slāņa apgabalā, uz kuru krīt lāzera stars, izveidojas virsmas sprieguma  $\sigma$  gradients, kurš ir atkarīgs no temperatūras gradienta. Pietiekoši lieliem  $grad \sigma$  virsma var pārtrūkt un izveidojas ablatīvs caurums. Abi ablatīvo caurumu veidošanās mehānismi konkurē.

Dzišanas ātrumu iespējams palielināt mainot vairākslāņu sistēmas parametrus. Piemēram, nodrošinot tādus apstākļus, lai temperatūras gradients ir lielāks pretēji krītošajam lāzera staram [33].

Ļoti svarīgi ir kārtiņu siltuma kontakti [34]. Temperatūras augšana laikā ir stipri atkarīga no dielektriskajām kārtiņām, starp kurām atrodas ieraksta kārtiņa, bet dzišanas ātrumu stipri ietekmē atstarojošās kārtiņas (tādas parasti atrodas aiz dielektriskās kārtiņas otrpus krītošajam lāzera staram).

### 1.2.3. Kristalizācija nekristāliskā matricā

Amorfu materiālu kristalizācija ir divu pakāpju process: aizmetņu veidošanās un to augšana par kristāliem. Abos gadījumos Gibbsa brīvās enerģijas  $G$  samazināšanās ir procesa „virzošais spēks”. Amorfu kārtiņu kristalizācija ir atkarīga no atomu kustīguma: pietiekoši zemās temperatūrās amorfas vielas ir stabilas laboratorijas laiku mērogā. Fāžu pāreju  $a \rightarrow c$  raksturo procesa kinētika.

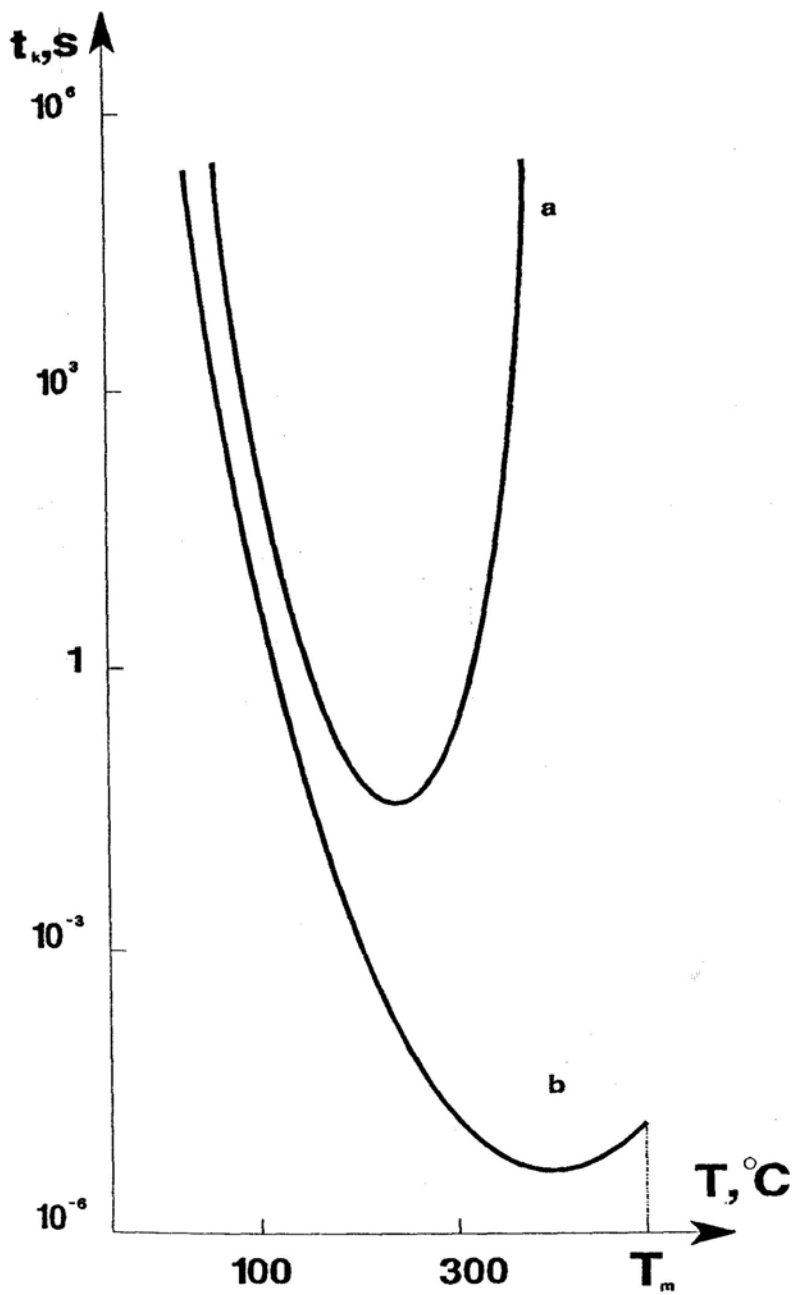
Pazeminoties  $T$ , sākot no kušanas temperatūras  $T_m$ , amorfā un kristāliskā stāvokļa Gibbsa brīvo enerģiju starpība palielinās:

$$G_{kr} - G_{am} \approx \Delta H_m - T\Delta S_m = \Delta H_m \left(1 - \frac{T}{T_m}\right), \quad (1.5)$$

kur  $\Delta H_m$  un  $\Delta S_m$  kušanas entalpija un entropija tilpuma vienībā, un pāreja  $a \rightarrow c$  kļūst termodinamiski izdevīgāka. No otras puses, temperatūrām, kuras zemākas par stiklošanās temperatūru, atomu translātīvās brīvības pakāpes „iesaldējas” un pāreja kristāliskā stāvoklī ir neiespējama. Šo abu faktoru mijiedarbība, turklāt ievērojot to, ka aizmetņu augšanas ātrums kļūst maksimāls kādā citā temperatūrā nekā kristālu aizmetņu rašanās, nosaka, ka kristalizācijas ilguma  $t_k$  atkarībai no temperatūras vajadzētu būt ekstrēmpunktam. Izskaitļojot laiku, lai kristalizētos 2/3 no  $1\mu\text{m}$  diametrā liela, amorfas  $\text{Te}$  kārtiņas apgabala, sk. 1.4. zīm.  $T_m$  tuvumā iegūts  $t_k$  minimums. Kristalizējušā tilpuma daļu laikā nosaka Avrami likums:

$$\ln \ln (1/(1-X)) = (n+1) \ln t + \ln(Fw_a U^n), \quad (1.6)$$

kur  $X$ - kristalizējusies tilpuma daļa,  $n=3$  atbilst sfēriskas formas kristālu augšanai,  $n=2$  plakaniskiem kristāliem,  $F$ - koeficients, kurš ievēro kristāla formu,  $t$ - laiks,  $U$ - kristālu augšanas ātrums dotajā temperatūrā. Aprēķinātie kristalizācijas laiki ir par vairākām kārtām lielāki nekā eksperimentāli noteiktie. To var izskaidrot tā, ka ātrumu noteicošais faktors ir amorfā apgabala aizaugšana no kristālisko robežu puses-  $t_k(T)$



1.4. zīm. Amorfa Te apgala ( $d=1\mu\text{m}$ ) modeļētā kristalizācijas ilguma atkarība no temperatūras:

- a- homogēna aizmetņu rašanās apgabalā un sekojoša trīsdimensionāla augšana;
- b- apgabals kristalizējas, kristāliem izaugot no apkārtējās kristāliskās kārtības robežām.

atbilst 1.4.b. zīm.  $Sb_xSe_{1-x}$  kristalītiem izdevīgi ir augt plānu disku un neregulāru plakānu veidojumu formā, jo kristalītus aptverošās vides deformācija ir minimāla. Darbā [7] norāda uz  $Sb_xSe_{1-x}$  un metālisko stiklu matricas transformācijas līdzību.

Pēc autoru [21] domām, stehiometriskos sastāvos nav nepieciešama difūzija, un fāžu pārejas notiek raksturīgajos laikos 20- 100ns, jo ātru kristalizāciju uztur gaismas mijiedarbības ar defektiem atbrīvotā enerģija (nav nepieciešama difūzija).

Eksperimentāli Te tika konstatēta atkarības  $t_k(I)$  vienmērīga dilšana palielinoties  $I$ , nenovērojot minimālo  $t_k$ .  $I$  proporcionāla temperatūrai. Novērots  $t_k$  minimums, kad  $t_k < 200$ ns (750Å biezs  $(In_{0,9}Ga_{0,1})_{0,5}Sb_{0,5}$  uz stikla pamatnes) [35].

Sastāvu kristalizācijas laiku iespējams piemeklēt. Piemēram, izvēlas materiālus ar līdzīgu struktūru amorfā un kristāliskā stāvoklī. Svarīga ir amorfā stāvokļa stabilitāte istabas temperatūrā, kušanas temperatūra  $T_m$ , kā arī fāžu optisko un elektrisko īpašību kontrasts [36]. Minimālo kristalizācijas laiku un amorfā stāvokļa stabilitāti istabas temperatūrā var palielināt pievienojot sastāvam citus elementus, piem., telūram pievienojot selēnu un antimonu [37]. Jāievēro, ka materiālos, kuros izdalās ļoti mazi ( $\approx 100$ Å) kristalīti kļūst svarīgi dimensionālie efekti. Šādu nelielu kristalītu kušanas temperatūra var būt ievērojami zemāka par makroskopisku monokristālu kušanas temperatūru [38]. Kristalizācijas ilgumu nosaka arī difūzijas mehānisms. Sastāviem no vienas fāzes,  $t_k$  jābūt īsākam, jo atomiem nav jādifundē lielos attālumos, lai veidotu vairāku fāžu kristāliskus graudus.

#### 1.2.4. Ar gaismas izplatīšanos viļņvadā saistītie jēdzieni

Uzskati par gaismas dabu turpina pilnveidoties, un tas joprojām ir viens no svarīgākajiem jautājumiem fizikā kopš angļu zinātnieks Ņūtons apmēram pirms 300 gadiem piedāvāja pirmo plašāk izvērsto gaismas teoriju- korpuskulāro gaismas teoriju

[27]. Korpuskulu teorija izskaidroja gaismas taisnvirziena izplatīšanos, gaismas atstarošanas un laušanu, t.sk. 1611.gadā atklāto Sneliusa laušanas leņķi, bet neizskaidroja interferenci, piem., Ņūtona gredzenu veidošanos. Kāda eksperimentā laikā, tuvinot izliektu lēcu prizmas atstarojošai plaknei, tika atklāts vairākus gaismas viļņu garumus ārpus plaknes izejoša gaisma- rimstošs elektromagnētiskais lauks un raksturoti daži ar šo lauku saistītie efekti [39]. 19.gs. šie lauki un to intensitātes eksponenciāla samazināšanās otrpus pilnas iekšējās atstarošanās plaknei tika izskaidrota, bet tā laika tehnoloģija vēl nespēja operēt ar viļņa garuma kārtai atbilstošo nepieciešamo precizitāti. 19.gs. beigās kļuva pieejami avoti centimetru viļņu diapazonā un sākās eksperimentāla rimstošo lauku izpēte (Bozē). Gadsimta laikā tehnoloģiskā precizitāte ir sasniegusi nanometru kārtas izšķirtspēju. Pētniecības tehniskās iespējas ir radījušas pētnieku interesi tanīs jomās, kurās var būt noderīga šo lauku izmantošana. Viena joma ir viļņvadu optiskie ķīmiskie sensori.

Attiecību starp krītošo staru, atstaroto staru un kritisko leņķi vai laužto staru ilustrē 1.5. zīm. un Sneliusa likums (1.5.b. zīm.):

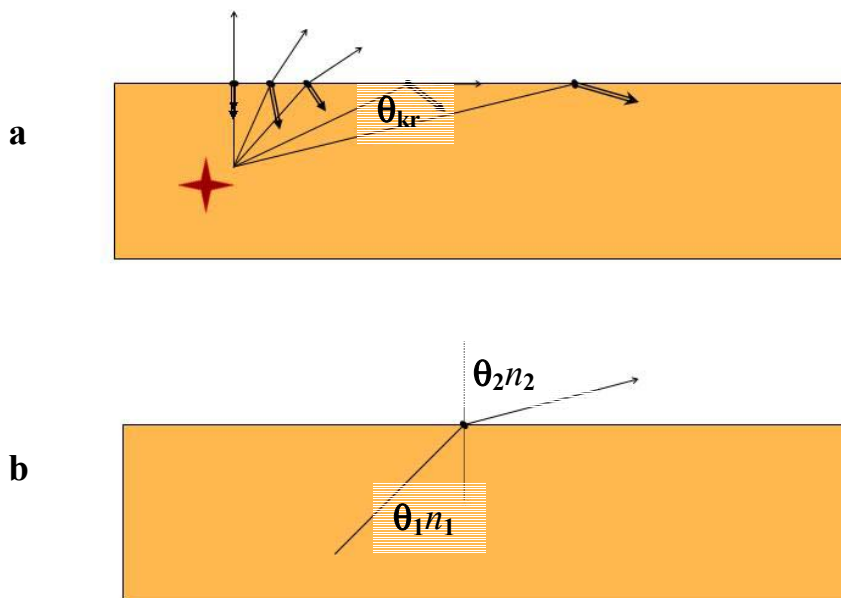
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.7)$$

Svarīga ir krītošā un iekšēji atstarotā staru summēšanās vielā, kurā šie stari izplatās viļņvadā. Šis likums saista attiecību starp krišanas un laušanas leņķiem atkarībā no slāņu laušanas koeficientiem, vai gaismas izplatīšanās ātrumiem šajās vidēs.

Lai vielā izplatītos vilnis, ir jāveidojas pastāvīgai viļņa fronteī, ko var raksturot ar modu un skaitliskās apertūras izplatīšanās nosacījumiem. Staru izplatīšanās viļņvadā attēlotā 1.6. zīm. Stars tiek ievadīts viļņvadā ar prizmas vai difrakcijas režģa palīdzību. Atstarojoties viļņvadā leņķim jāapmierina pilnīgas iekšējās atstarošanās

nosacījums,  $\sin \varphi > \frac{n_{\text{pam}}}{n}$  ( $\sin \varphi > \frac{1}{n}$  (filma-gaiss robežv.) apmierināsies automātiski).





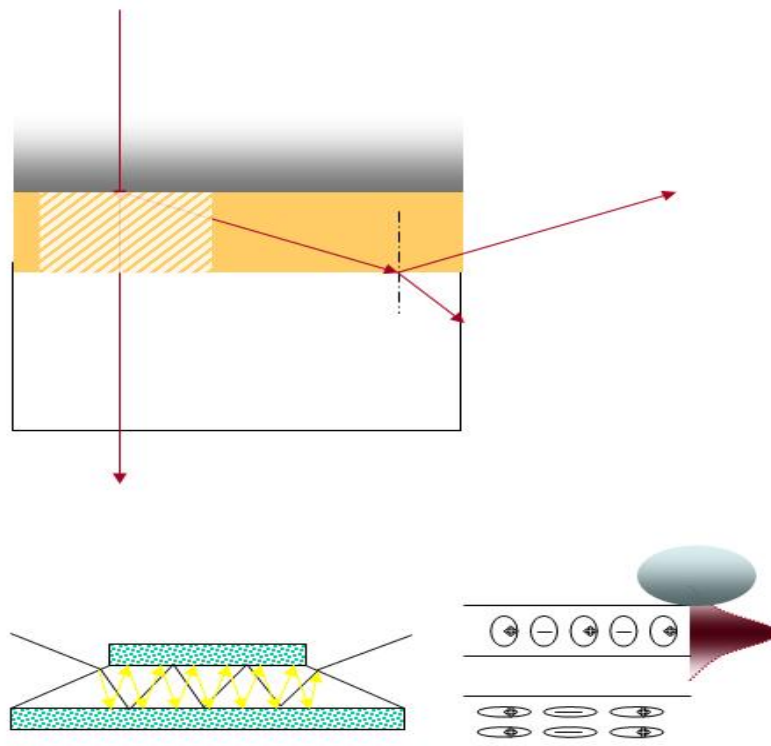
1.5. zīm. Gaismas atstarošanās un laušana.

a- sasniedzot noteiktu krišanas leņķa lielumu sāksies pilna iekšējā atstarošanās.

b- Sneliussa likums saista attiecību starp krišanas un laušanas leņķiem atkarībā slāņu laušanas koeficientiem, vai gaismas izplatīšanās ātrumiem šajās vidēs.  $n_1 > n_2$ .

$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$  jeb  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ . Sneliussa likums seko no Fermā īsāka laika principa,

kurš seko no gaismas viļņveida izplatīšanās.



1.6. zīm. Staru izplatīšanās viļņvadā un viļņvadu modu ierosināšanās nosacījumi.

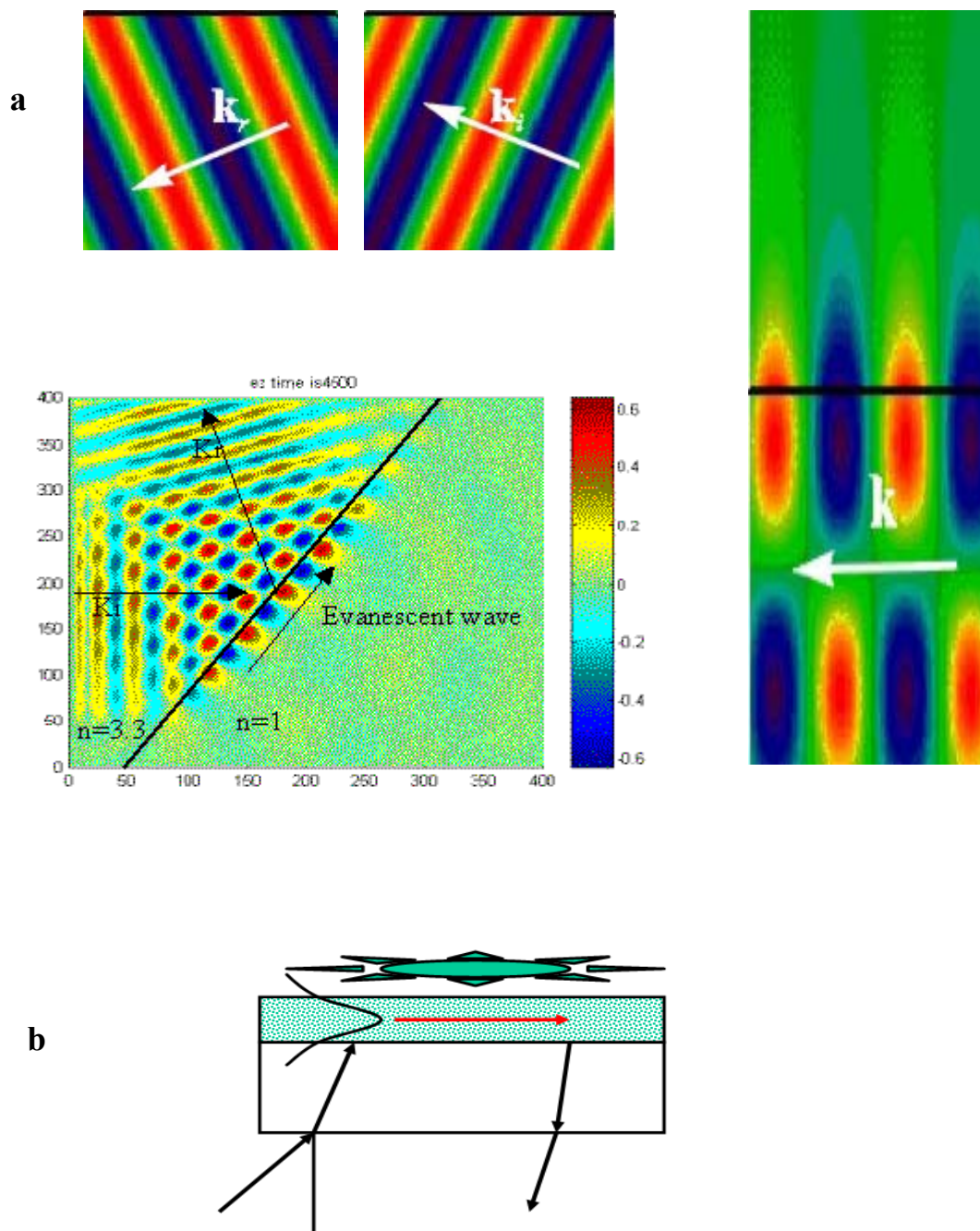
Staru ievada viļņvadā ar prizmas vai difrakcijas režģa palīdzību. Atstarojoties viļņvadā leņķim jāapmierina pilnīgas iekšējās atstarošanās nosacījums,  $\sin \varphi > \frac{n_{pam}}{n}$ .

Ja plakanā viļņvadā ielaiž plakanu viļni un tas sāk pilnīgi atstaroties no tā virsmām, tad rodas divas viļņu sistēmas- sākotnējā un atstarotā. Stabila lauka struktūra veidosies tad, kad visi atstarotie stari veidos koherentas viļņu frontes. Viļņvadā izplatās fundamentālā moda 0. Tai atbilst noteikts leņķis. Palielinot leņķi var izplatīties augstākas modas (1, 2 ...). Leņķim samazinoties, stabila moda izplatīties nevar.

Ja plakanā viļņvadā ielaiž plakanu vilni un tas sāk pilnīgi atstaroties no tā virsmām, tad rodas divas viļņu sistēmas - sākotnējā un atstarotā. Stabila lauka struktūra veidosies tad, kad visi atstarotie stari veidos koherentas viļņu frontes, t.i. staru fāžu starpības būs  $2\pi m$ , jeb  $d = \frac{m\lambda}{2n \sin \varphi}$  (modu ierosināšanās nosacījums, kur  $d$ - biezums,  $n$ - laušanas koeficients. Viļņvadā izplatās fundamentālā moda 0. Tai atbilst noteikts leņķis. Palielinot leņķi var izplatīties augstākas modas (1, 2, ...). Leņķim samazinoties stabila moda izplatīties nevar.

Tātad, pilnā iekšējā atstarošanās pret divu dielektriķu robežvirsmu atšķiras no refleksijas pret metālisku spoguļvirsmu. Pilnā iekšējā atstarošanās pret dielektriķa robežvirsmām var izraisīt krītošā starojuma laušanu, atstarošanos vai atstarotā viļņa fāzes nobīdi pret krītošo vilni. Refleksijas koeficientu nosaka Freneļa formulas un tas, līdzīgi viļņu fāzes izmaiņai, ir atkarīgs no abu vidu laušanas koeficienta un krišanas leņķa un krītošā viļņa polarizācijas. Turklāt, pilnas iekšējās atstarošanās pret divu dielektriķu robežvirsmu gadījumā krītošais starojums nedaudz „iespiežas” arī aiz robežvirsmas vidē ar mazāku laušanas koeficientu - Goosa-Henhena efekts [40,41]. Iespiešanās dziļums ir lielāks, jo tuvāk krišanas leņķis ir robežleņķim. Dziļums ir ar krītošā viļņa garuma kārtu. Teorētiski un eksperimentāli pierādīts, ka faktiski pilnīga iekšējā atstarošanās notiek nevis precīzi no dielektriķu robežvirsmas, bet gan no fiktīvas robežvirsmas, kas atrodas otrajā vidē. Novēro atstarotā stara novirzi telpā.

Rimstošie viļņi rodas viļņu frontēm iekšēji atstarojoties no robežslāņa starp krītošajam staram optiski caurlaidīgiem slāņiem. Datorsimulācija [42, 43] vizualizē rimstošā viļņa tipiskus attālumus un nosacījumus, sk., 1.7.a. zīm.  $\mathbf{K}_i$  ir krītošā stara viļņa vektors un  $\mathbf{K}_r$  atstarotā stara viļņa vektors. Rimstošais vilnis izplatās gar virsmu un viļņu garuma raksturīgajā attālumā samazinās normāles virzienā no virsmas. Tas



1.7. zīm. Rimstošā viļņa vizualizācija a) izmantojot datorsimulāciju, b) darbības principa ilustrācija.  $K_i$  ir krītošā stara viļņa vektors un  $K_r$  atstarotā stara viļņa vektors. Rimstošais vilnis izplatās gar virsmu un attālumā mazākā par viļņa garumu samazinās normāles virzienā no virsmas [42]. Stars attālumā, kurš ir ar izmantotā viļņa garuma kārtu, mijiedarbojas ar molekulām pie viļņvada-analīta skaldnes. Principā, šādi iespējams konstatēt arī šķidrā agregātstāvoklī esoša analīta koncentrācijas maiņu.

notiek tad, kad stara krišanas leņķis ir lielāks par kritisko leņķi. Rimstošā viļņa elektromagnētiskā lauka intensitāte eksponenciāli samazinās, palielinoties attālumam no robežslāņa. Ja materiāls ar zemāku laušanas koeficientu absorbē noteiktu viļņu garumu gaismu, tad viss stars tiks atbilstoši vājināts. Ja staru ievada nestrukturētā optiskā viļņvadā, kurš saskaras ar pētāmo vielu, piem., šķidrumu, tad stars vairākkārtīgi iekšēji atstarojas un mijiedarbojas ar pētāmo šķidrumu. Principā, šādi vajadzētu būt iespējamam noteikt viļņvadam tieši pieguļošā slāņa absorbcijas spektru. Atstarošanās spektroskopija izmanto gaismas viļņu spēju no virsmas atstarotam laukam “nest” informāciju par otrpus robežslāņa esošā materiāla absorbciju, nosacīti biezumā  $d_p$  (*depth of penetration*), kurā rimstošā viļņa amplitūda ir samazinājusies līdz  $1/e$ , jeb 37% salīdzinot ar vērtību robežvirsmā.  $d_p$  palielinās samazinoties krišanas leņķim  $\alpha$ , parauga laušanas koeficientam,  $n_2$  un palielinoties  $\lambda$ . To izsaka Harila v-m-s:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_1^2 \cdot \sin^2 \alpha - n_2^2}} \quad (1.8).$$

Attālums kādā viļņi iziet ārpus viļņvada (noteiks sensora mērīšanas attālumu) ir samērojams ar gaismas viļņa garumu. Notiekot pilnīgai iekšējai atstarošanai uz stikla un ūdens robežvirsmas (kritiskais leņķis  $\theta_{kr} = 61^\circ$ , 410nm), ūdenī rimstošā viļņa elektriskais lauks  $e=2,71$  reizes samazinās 260nm attālumā, bet gaismas intensitāte katru 130nm attālumā no robežvirsmas. Otrpus viļņvadā veidojas rimstošais vilnis. No darba viedokļa svarīgākā ir tieši šī viļņa īpašība spēt “iziet” ārpus viļņvada. Rimstošā lauka iespīšanās dziļumi dažādās konfigurācijās parādīti 1. tabulā. Tā kā gaismas intensitāte ir proporcionāla elektriskā lauka intensitātei, tad attālums kādā šāda sistēma “jūt” ir mazāks par krītošā gaismas viļņa garuma kārtu. Proti, runa iet par iespēju raksturot pierobežas apgabalam tuvāko slāni. 1.7.b. zīm. parādīts sensora darbības princips. Krītošais lāzera stars ar prizmas vai difrakcijas režģa palīdzību tiek

Viļņa garums, $\lambda$ , nm	Laušanas koeficients pirmajai robežvidei	Laušanas koeficients otrajai robežvidei	Kritiskais leņķis, grādi	Krišanas leņķis, grādi	$d_p$ , nm
1300	stikls:1,458	gaiss:1	43,3	45	825
1300	silīcijs:3,430	gaiss:1	16,9	45	94
633	stikls:1,458	gaiss:1	43,3	45	402
633	stikls:1,458	gaiss:1	43,3	85	96
633	stikls:1,458	ūdens:1,333	65,8	85	173
414	stikls:1,458	gaiss:1	46,3	85	63

1. tabula. Rimstošā lauka iespiešanās dziļumi dažādās konfigurācijās [44].

ievadīts gaismu vadošajā slānī. Gaisma pārvietojas pa slāni saskaņā ar iekšējās atstarošanās likumiem. Ar otras prizmas vai difrakcijas režģa palīdzību gaisma var atstāt sistēmu pirms absorbējas izkliedējoties vai atstāj viļņvadu pa tā skaldni. Gaismas rimstošais lauks iespiežas arī blakus esošajos robežslāņos. Molekulas mijiedarbojas ar elektromagnētisko lauku. Mainoties robežslāņa sastāvam novēro caur viļņvadu ejošā spektra izmaiņas un laušanas koeficienta izmaiņas. Tiek mērīts, vai nu, rezonances leņķis, konstantam viļņu garumam, vai arī noteiktam krišanas leņķim nosaka rezonanses  $\lambda$ . Robežslāņa biezums ir ar gaismas viļņa garuma kārtu.

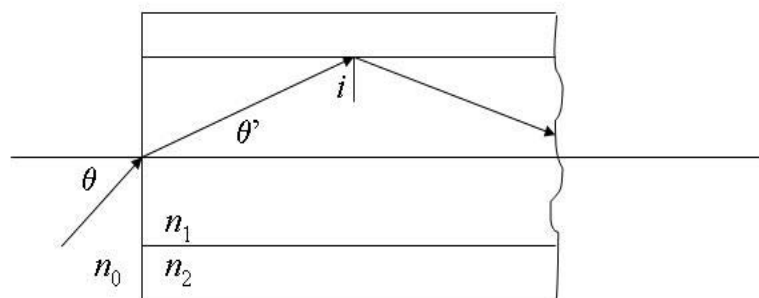
Palielinot izmantotā viļņa garuma uz garāko, infrasarkanu viļņu pusi, iespējams palielināt jūtīguma slāni līdz vairāku mikronu attālumam. Viens no šī darba uzdevumiem ir izveidot DOE - planāru viļņvadu un ievadīt viļņvadā infrasarkanu staru, nodrošināt pilnīgu iekšēju atstarošanos, un izvadīt staru no parauga.

Svarīgā ir skaitliskās aperatūras (turpmāk – NA) loma. Jebkuriem viļņiem, t.sk., gaismas viļņiem ir raksturīga difrakcija- gaismas novirzīšanās no taisnā izplatīšanās virziena. Gaismas difrakcija nosaka optisko aparātu izšķiršanas spēju  $\frac{1}{\Delta y}$ .  $\Delta y$ - izšķiršanas robeža, vismazākais attālums, kurā divus priekšmeta punktus vēl var redzēt atsevišķi. Izšķiršanas spēju var palielināt samazinot lietotās gaismas viļņu garumu,  $\lambda$  vai palielinot NA,  $n \sin u$ , kur  $u$ - apertūras leņķis [27].

1.8.zīm attēlota stikla šķiedra ar laušanas koeficientu  $n_1$ , kuru aptver apvalks- cits dielektriķis ar mazāku laušanas koeficientu  $n_2$ . Pilnas iekšējās atstarošanās dēļ šķiedrā izplatīsies stars, ja atstarosies no otra dielektriķa leņķī, kurš lielāks par kritisko leņķi,  $i_k$ . Krišanas leņķis,  $\theta$  ir lielākais krišanas leņķis, kurā stars tiks iekšēji atstarots,

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin \theta' = n_1 \cos i_k, \quad (1.9)$$

kur  $n_0$ - laušanas koeficients videi no kuras stars krīt.



1.8. zīm. Optisku viļņvadu veido stikla šķiedra ar laušanas koeficientu  $n_1$ , ko aptver apvalks- cits dielektriķis ar mazāku laušanas koeficientu  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ). Pilnas iekšējās atstarošanās dēļ šķiedrā izplatīsies gaismas stars, ja stars atstarosies no otra dielektriķa leņķī kurš lielāks par kritisko leņķi,  $i_k$ . Krišanas leņķis,  $\theta$  ir lielākais krišanas leņķis, kurā stars pēc nonākšanas viļņvadā vēl tiks iekšēji atstarots.



Kritisko leņķi,  $i_k$  aprēķina  $\sin i_k = \frac{n_2}{n_1}$ . Pārveidojot iegūstam

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \sqrt{2n_1(n_1 - n_2)}, \quad (1.10)$$

Viļņvada NA,  $n_0 \sin \theta$  būtu izprotama līdzīgi objektīva NA. Stara ievadīšana viļņvadā ir efektīva kad avota NA nepārsniedz viļņvada NA. Piemēram, kad  $n_1=1,5$  un  $n_1 - n_2 = 0,01$ , tad skaitliskā apertūra būs aptuveni 0,17. Ja  $n_0 = 1$ , tad apertūras leņķis būs aptuveni  $10^\circ$ . Viļņvadā nonāks gaisma, kura kritīs uz viļņvadu mazākā leņķī par  $10^\circ$ . Ja gaismas avots atradīsies ārpus šīs NA leņķa veidotā konusa, tad gaisma viļņvadā nenokļūs. Gaismas vadiem sakaru sistēmās NA ir 0,1- 0,2 un apgaismošanas sistēmās 0,4- 0,7. Piemēram, optiskai šķiedrai  $n_1=1,46$ , NA ir 0,002, vienmodas režīmā diametrs pie  $\lambda=0,85\mu\text{m}$  nedrīkst pārsniegt  $7\mu\text{m}$ , bet pie  $\lambda=1,35\mu\text{m}$ :  $10,6\mu\text{m}$ . Jāpiezīmē, ka apvalkā var veidoties un izplatīties arī t.s. noplūdes modas (pārsniedzot pieļaujamo stara ievadīšanas leņķi, gaismasvada ass izliekuma, lokāli defekti). Liela NA praksē nozīmē lielāku leņķi kādā iespējams ievadīt lielāku gaismas kūļa daļu.

Šveices Elektronikas un mikrotehnikas centra Noišatelē un Šveices Federālā Tehnoloģiju institūta Lazanjā darbā [44] izklāstīti rezultāti integrētu optisko čipu optimizēšanai bioķīmiskiem (sensori) un fizikāliem (laušanas koeficienta mērījumi) lietojumiem. Rimstošā lauka attālumi var būt no 100nm un pārsniegt 1000nm no viļņvada darba virsmas. Aprēķini rāda, ka svarīgi ir pielāgot rimstošo lauku praktiskiem uzdevumiem. Tā iegūst maksimālu jutīgumu un panāk lielāku signāla-trokšņa attiecību. Īpaši piemēroti ir materiāli ar augstu laušanas koeficientu. Halkogenīdu stikliem piemīt augsti laušanas koeficienti (1.1.nod.). Šveices grupa strādā ar sarkano gaismu. Darbs infrasarkanajā reģionā, tāds kādu iecerēts veikt šajā pētījumā, papildinātu jau veiktos pētījumus.

### 1.3. Saistītas tematikas apskats

#### 1.3.1. Lāzeru, viļņvadu un sensoru tehnoloģiju attīstība

1964.gada Nobela prēmija fizikā tika piešķirta profesoriem Taunam, Basovam un Prohorovam atzīmējot fundamentālo ieguldījumu lāzeru izveidē. Šī tehnoloģija ir svarīga pētniecības un praktisku lietojumu, t.sk. optisko ķīmisko sensoru attīstībai. Koncentrējot lāzera enerģiju intensitāte var sasniegt  $10^{+23}$  W/cm<sup>2</sup>. Ar lāzeriem iespējama strauja vielas dzesēšana un karsēšana. Lāzeri ir strauji attīstījušies, to cenas ir daudzkārt samazinājušās, bet pieejamība un lietojumu sfēra ļoti paplašinājusies.

Paralēli, no 20.gs. septiņdesmito gadu beigām, pilnveidojas optisko šķiedru tehnoloģija. Līdz tam sensori izmantoja nevis viļņvadu tehnoloģiju, bet dažādas indikatīvās krāsvielas (pH un skābekļa sensori [6]). Astoņdesmito gadu otrajā pusē parādās distributētā monitoringa jēdziens – mērījumi optiskās šķiedras garumā. Telekomunikāciju maģistrālajos tīklos šādi nosaka šķiedras diskontinuitātes vietu, vides jomā seko upju kvalitātei, bet naftas urbumos – metāna klātbūtni. Lai precīzāk identificētu analītu tiek lietoti divu viļņu garumi, t.sk. tuvajā infrasarkanajā spektra daļā (1,3μm). Citu vielu, tādu kā tolueni, ksilēni un nitrāti ūdenī, identifikācijai izmanto to absorbciju spektra ultravioletajā (turpmāk - UV) daļā (250- 300nm). Ir izveidoti mitruma, dažādu vielu, enzīmu darbības, miljono (ppm) un, pat, miljardo daļu (ppb) nosakošas gāzu monitoringa sistēmas un tiek attīstīti jauni lietojumi [45-48].

Gāzu koncentrāciju nosaka mērot noteikta viļņa garuma gaismas absorbciju un izmantojot Lamberta-Bēra likumu

$$I = I_0 e^{-klc}, \quad (1.11)$$

kur  $k$ - koeficients, kurš raksturo absorbējošās vielas molekulas, bet nav atkarīgs no koncentrācijas,  $c$ - koncentrācija,  $l$ - ceļa garums. Tiek izmantotas kādas noteiktai nosakāmajai vielai raksturīgas vibrācijas-rotācijas absorbcijas līnijas. Izmantojot

nosakāmās gāzes divu absorbcijas līniju intensitāšu attiecību ir iespējams noteikt gāzes temperatūru. Ar optiskām metodēm var noteikt gāzes spiedienu un koncentrāciju, un pat noteikt masas pārnesi (*mass flow*).

2- 15 $\mu$ m spektrālajā diapazonā ir liels skaits absorbcijas joslu, kas pieder dažādām vielām; metānam - 3,3 $\mu$ m, CO- 4,2 $\mu$ m, CO<sub>2</sub>- 4,6 $\mu$ m, NO<sub>x</sub>- 6,5 $\mu$ m, SO<sub>x</sub>- 7,3 $\mu$ m. Molekulu funkcionālās grupas absorbējot veido „pirkstu nospiedumus”. [49] minētas (OH) - 2,95 $\mu$ m; nearomātiskas (CH) - 3,4 $\mu$ m; (CHO) - 3,63 $\mu$ m; (COOH) - 3,82 $\mu$ m; (C $\equiv$ N) - 4,48 $\mu$ m; (CONH) - 5,96 $\mu$ m; (CH<sub>3</sub>COO) - 9,6 $\mu$ m; (nepiesātinātas saites) 10- 12 $\mu$ m; (CCl) - 13,4 $\mu$ m. Atmosfērā ir 3- 5 $\mu$ m optiskās caurlaidības josla.

Telekomunikācijas ir sasniegts izmaksu samazinājums darbam ar viļņu garumam līdz 1,55 $\mu$ m. Virs 1,55 $\mu$ m gaismas avoti, reģistrējošās ierīces un sensoru izveidošanas prakse kļūst daudz dārgāka. Molekulārā vibrāciju spektroskopija tiek plaši izmantota tuvajā [50] un vidējā IS spektra daļā [51]. Furjē eksperimentālās metodes ir perspektīvas. Tās plāno izmantot gan Eiropas Kosmosa Aģentūra (*ESA*), gan ASV *NASA* daudzkomponenšu gāzu monitoringa sistēmas izveidei ilgās kosmiskajās ekspedīcijās. Šāda sistēma spēj vienlaicīgi mērīt trīsdesmit dažādus analītus - gaisa piesārņojošās vielas. Tas tiek veikts ūdens tvaiku, oglekļa dioksīda un metāna klātbūtnē [52].

Visbiežāk, aptuveni 70% gadījumu, sensoriem izmanto daudzmodu optiskās šķiedras [6]. Pārējie risinājumi izmanto vienmodas šķiedras un lieto planāro viļņvadu tipa konstrukcijas. UV reģionā parasti izmanto kvarca šķiedras. No dažādām plastmasām ražo elastīgas šķiedras, kuras izmanto medicīnā. Tām ir liels leņķis kādā iespējams ievadīt salīdzinoši lielāku stara daļu, mazs svars, nelielas izmaksas, pieejamais laušanas koeficients 1,35– 1,6 (pārsvārā izmanto redzamajā spektra daļā). Infrasarkanajā spektra daļā jāizmanto šķiedras, kuras mazāk absorbē šajā diapazonā - piem., no fluorīdiem vai halkogenīdiem. 2. tabulā salīdzināti indikatīvi dati dažādām materiālu grupām.

Materiāls	Optiskās transimijas diapazons, [μm]	Vājinājums, [dB/km] @ [μm]	Skaitliskā apertūra, NA	Maksimālā darba temperatūra, [°C]
SiO <sub>2</sub>	0,35 – 1,4	0,4@ 1,32	0,16	300
SiO <sub>2</sub> mazs OH	0,35 – 2,5	12@ 0,82	0,16	300
Safīrs	0,5 – 3,0	2000@ 2,90	1,42	1800
Fluorīds	0,4 – 5,5	15@ 2,5	0,21	200
Halkogenīdi	1 – 12	250@ 6	0,4	150
Telūra halīdi	3 – 13	1000@ 9	-	250
Sudraba halīdi	4 – 18	500@ 11	0,5	300
Dobi viļņvadi (ar cauru vidu)	3 - 17	500-1000@ 10,6	0,05	500-1800

2. tabula. Atsevišķu infrasarkanā diapazona viļņvadu materiālu īpašības [6].

IS šķiedras mazākie zudumi ir  $0,01 - 4 \frac{dB}{m}$  un mainās no izmantotā viļņu garuma.

Halkogenīdiem ir liels laušanas koeficients - līdz 2,5. Ierobežojošs faktors ir halkogenīdu zemā stiklošanās temperatūra,  $T_g$  un tās noteiktais termiskās stabilitātes apgabals.

Svarīga loma ir šķiedru savienotājelementiem - konektoriem. Tiem jābūt ar pēc iespējas mazākiem zudumiem. Zudumus samazina salāgota savienojuma ģeometrija un skaitliskā apertūra, kā arī pasākumi atstarošanās zudumu samazināšanai. Konektorus var iedalīt trīs lielās klasēs: (i) pagaidu konektori (*demountable connectors*), (ii) savienojumi (*splices*), piem., optiski mikrometinājumi pastāvīgai šķiedru savienošanai ar mikronu kārtas precizitāti, (iii) uzmava - dalītājs (*couplers*), gaismas sadalīšanai starp šķiedrām.

Gaismas avotus pēc to spektrālā joslas platuma iedala: 1) monohromatiskos (lāzeri, lāzerdiodes- LD), 2) pseidohromatiskos (gaismu emitējošas diodes- LED), 3) nepārtraukta spektra avotus (kvēlspuldzes, loka lampas)- baltās gaismas avoti.

No UV līdz pat tuvajam IS diapazonam var lietot ksenona loka lampas. Izmaksu ziņā līdzīgas, bet tikai UV diapazonam piemērotas ir deitērija lampas. To darba mūžs ir īsāks par 2000 stundām. Lēta redzamā un tuvā IS gaismas alternatīva ir volframa halogēna lampas. Izmantojot šos gaismas avotus ir jālieto absorbcijas vai interferences filtri (tipisks spektrālās joslas platums, attiecīgi, 50nm un 1nm). Dažādi slēdži un modulātori tiek izmantoti lai palielinātu signāla-trokšņa attiecību. LED veidošanai izmanto III-V grupas savienojumus. To darba mūžs var pārsniegt 100 000 stundu. LED spektrālais diapazons ir 370- 1020nm un tipisks spektrālās joslas platums ir 20- 50nm. Superluminescējošajām LED diodēm joslas platums ir 5nm, tam ir mazi izmēri un cenas. Lāzerdiožu stars ir koherenents un monohromatisks to var modulēt ar strāvas palīdzību. Konstruktiju papildina ar monohromatismu uzlabojošiem optiskiem elementiem.

Monohromatisku gaismu dod arī citu tipu lāzeri - cietvielu, gāzu, jonu, krāsvielu. Šie avoti parasti ir dārgi. Lētāki ir pusvadītāju lāzeri. Sensoriem piemērots ir argona (Ar)

lāzers ar daudzām līnijām 275- 514nm diapazonā. Cits bieži izmantojams gāzes lāzers ir He-Ne (633nm). Populāri cietvielu lāzeri ir rubīna (694,3nm) un Nd:YAG (1064nm).

Katra optikas sensorā izmantotā fotodetektora uzdevums ir pārvērst informāciju par paraugu saturošo gaismu elektriskā signālā. Detektora izvēles kritēriji ir jutīgums, t.sk. spektrālā diapazona jutīgums, signāla - trokšņa attiecība, linearitāte un reakcijas laiks. Atsevišķu fotonu spēj fiksēt fotoelektronu pavairotāji (FEPi). FEPu jutīgumu nosaka fotokatoda materiāla izvēle. FEPi ir pieejami UV, redzamajam, tuvajam IS diapazonam. Tipisku FEPu lineārais darba diapazons ir līdz četrām kārtām un tie ir masīvi.

Citi, kvantu fotodektori izmanto pusvadītāju vadītspējas maiņu un izmaiņas spriegumā, tiem mijiedarbojoties ar gaismu. Vispopulārākā šī tipa kvantu iekārta ir fotodiode (turpmāk- FD). FD darbības princips izmanto to, ka p-n pārejā gaisma palielina caurumu un elektronu koncentrāciju, bet tas palielina gaismas intensitātei proporcionālu strāvas plūsmu. FD ir kompaktas ierīces, bet tām ir par trim kārtām lielāks trokšņu fons nekā FEPiem. Eksistē arī kaskādes (*avalanche*) FD, kuras cenšas apvienot gan FEPu, pusvadītāju FD priekšrocības. Fotodetektoru jutīgumu nosaka materiāls- silīcija FD „redz” 400- 1100nm, germānija 600- 1700nm, bet InGaAs 900- 1700nm. InGaAs FD izmanto telekomunikācijās, bet Ge FD ir plašs spektrālais diapazons.

IS diapazonu nosacīti var iedalīt tuvajā 780nm- 2,5 $\mu\text{m}$  (12800- 4000 $\text{cm}^{-1}$ ), vidējā 2,5- 25 $\mu\text{m}$  (4000- 400 $\text{cm}^{-1}$ ) un tālajā, virs 25 $\mu\text{m}$  (THz spektroskopija). Salīdzinoši zemo izmaksu dēļ tuvais infrasarkanais diapazons tiek izmantots visplašāk. Šis spektrālais diapazons, kā arī saistītie ierobežojumi, tādi kā platākas joslas, arī ir vislabāk izpētīts. Vidējais infrasarkanais diapazons ir perspektīvāks daudzu molekulu noteikšanai. Daudzu molekulu spektrālās joslas ir gan skaidri izteiktas, gan spēcīgas, bet selektivitāte un jutīgums šim spektrālajam dipazonam ir labāki. Praksē transmisijas mērījumiem ļoti

nozīmīgs ierobežojums šajā diapazonā ir spēcīga ūdens absorbcija - dažī desmiti mikroni (tuvajā IS - vairāki milimetri). Plaši izmantoti tehnoloģiski paņēmieni ir Novājinātās pilnīgas iekšējās atstarošanās metode (ATR - *Attenuated Total Reflection*) un Šķiedras rimstošā viļņu spektroskopija (FEWS - *Fibre Evanescent Wave Spectroscopy*). Tās ir līdzīgas darbā izmantotajai eksperimentālajai metodikai. Viļņvadi un sensori vidējā IS diapazonā kļūst ievērojami dārgāki. Šajā darbā tiek izmantots vidējam IS piemērots viļņvada materiāls -  $As_2S_3$ , bet eksperimentiem pieejamo avotu un detektoru pieejamības apsvērumu dēļ optiskie mērījumi noritēja sarkanajā un tuvajā IS spektra daļā.

Šo iekārtu raksturojums sniegts lai ilustrētu cik svarīga ir pēc iespējas plašāka spektrālā informācija par mērāmo analītu, jo daudzu analītu sensorus veido individuāli [53]. Ir sasniegts augsts jutīgums -  $0,3 \text{ pg/mm}^2$  [54]. Viļņvadu izveide  $As_2S_3$  ir pētīta [55]. Eksperimenti veikti redzamajā spektra diapazonā, 633nm un tos labi papildināti plānotie eksperimenti IS diapazonā.

ASV firma *Ocean Optics* savā 2007.gada katalogā kā konceptuālu jaunumu piedāvā tiešsaites, modulārus, optiskās šķiedras izmantojošas optisko ķīmisko sensoru sistēmas. Sensorus veido novietojot aktīvo materiālu optiskās šķiedras galā. Noteiktu ķīmisko analītu klātbūtnē mainās materiāla (transdūcera) optiskās īpašības. Šie transdūcera materiāli izmanto vai nu fluorescenci vai absorbciju. Tos izmanto gāzu un šķidrums monitoringam, un tiek minēta ierīču sekmīgā debija 2007.gadā.

Darbā [56] pētīta  $CO_2$  lāzera līniju izvēle lai noteiktu amonjaka koncentrāciju. Vides monitoringam lai mērītu metāna koncentrācijas sākot ar 50 miljona daļām līdz pat 100%, izmantoti optiskās šķiedras sensori un  $1,67\mu\text{m}$  metāna absorbcijas līnija [57]. Krāsu maiņa izmantota kā indikatīva metode lai noteiktu florūdeņraža mazas koncentrācijas [58]. Tiek izmantots salikts viļņvads (*composite optical waveguide*), kurš sastāv no viļņvada ar uzputinātu krāsvielas kārtiņu. Kārtiņa

atgriezeniski maina krāsu analīta klātbūtnē. Stara ievadīšana un izvadīšana izmantojot difrakcijas režģi (kā šajā darbā) tiek minēta kā veids lai palielinātu shēmas jutīgumu.

Benzola (un atvasinājumu- toluena, ksilola) un hlorinēto ogļūdeņražu noteikšanai ūdenī, IS diapazonā ASV tika patentēts halkogenīdu šķiedru sensors [59]. Sensors papildina izmantojot hidrofoba apvalka spēju atgrūst ūdeni un palielināt iekārtas jutīgumu hidrofoba analīta noteikšanai. Halkogenīdu šķiedru vājinājuma dēļ sensora aktīvais elements- šķiedra, var būt garāks par tipisko sensora garumu 5-20cm. Sensori darbojas skābā un organiskā vidē, tos nevar lietot stipri bāziskā vidē.

Darbā [60] autori analizē zudumus viļņvados un raksturo saistītos fizikālos apsvērumus lai šos zudumus samazinātu. Spirāles formas, liektu viļņvadu laušanas koeficienta izmaiņām darbā [61] piedāvā Nīderlandes Tventes Universitātes grupa.

Ar mērķi analizēt vielas ūdens vidē tiek piedāvātas inversās viļņvadu sistēmas [62]. Šīm viļņvadu sistēmām pamatnes laušanas koeficients ir mazāks par viļņvada laušanas koeficientu. Tas ļauj rimstošajam laukam dziļāk, mikronu dziļumā, iespiesties pētāmajā vidē. Iespēju mērīt šķidrumu nelielas laušanas koeficienta izmaiņas izmantojot polimērus saturošas optisku šķiedras demonstrē darba [63] autori.

### 1.3.2. Molekulārā spektroskopija

Molekulārā spektroskopija (infrasarkanā un Ramana) tiek plaši izmantotas gan zinātniskos, gan dažādos pielietojumos un komerciāliem mērķiem vielu identifikācijai, procesu kontrolei un kvalitātes nodrošināšanai [49, 50].

Infrasarkanā spektroskopija (turpmāk- IS\_sp) galvenokārt analizē starojuma absorbciju. Ramana spektroskopija analizē (turpmāk- R\_sp) izkliedētu starojumu. Abas metodes vienu otru papildina un strādā vienā spektrālajā diapazonā. Vispārējā gadījumā svārstībām, kuras saistītas ar lielām dipola momenta izmaiņām, tādām kā



asimetriski joniskās karbonila grupas ( $\nu\text{C}=\text{O}$ ) vai liektās ūdens molekulas valentās (*stretching*,  $\nu$ ) piemīt stipras infrasarkanās joslas un vājas Ramana joslas. To grupu svārstības, kuras saistītas ar polarizējamības izmaiņām, tādas kā simetriskas nepiesātinātas ( $\nu\text{C}=\text{C}$ ), piemīt stipras Ramana joslas un vājas atbilstošās IS joslas. Divatomu molekulas kā  $\text{N}_2$  un  $\text{O}_2$  ir IS neaktīvas, bet spektriem ir Ramana joslas.

Atšķirības starp abām metodēm ir sekojošas- IS\_sp tiek mainīts krītošais viļņu garums (tātad, frekvence) un reģistrēts molekulu saišu svārstību absorbētais fotonu enerģijas spektrs. R\_sp molekulas tiek ierosinātas ar monohromātisku staru. Reģistrē molekulas izkliedētās gaismas spektru- ierosinošās gaismas frekvenci un par molekulu svārstību frekvenci nobīdītas joslas. Joslu stiprums un forma ir atkarīgas no molekulu fizikālā un ķīmiskā stāvokļa, parauga sagatavošanas, un eksperimentālās iekārtas.

Molekulārā spektroskopija izmanto gan frekvenci  $\nu$  (herci), gan viļņu garumu  $\lambda$  (garuma vienības, parasti  $\mu\text{m}$ ), bieži izmanto viļņu skaitli  $k=2\pi/\lambda$  (izsaka apgrieztos centimetros,  $\text{cm}^{-1}$ ) un reizēm izmanto fotonu enerģijas  $E$ , (izsaka elektronvoltu, eV vienībās). Biežāk tiek izmantots spektra reģions 1-  $15\mu\text{m}$  ( $10000-600\text{cm}^{-1}$ ).

Katrai ķīmisko savienojumu grupai atbilst savs spektrālais diapazons - svārstību spektrālā ansambļa veidots „pirkstu nospiedumu” (*fingerprint*) joslas, kuru var izmantot identifikācijai. Parasti šis reģions atrodas aptuveni 5-  $15\mu\text{m}$ . Eksistē virkne vides aizsardzībā aktuālu vielu- eļļas, etanols, fenols, amīdi, amīni, fenoli, aromātiski ogļūdeņraži, merkaptāns, u.c. kuras absorbē tuvējā IS diapazonā, 2,5-  $4\mu\text{m}$ .

Tātad var secināt, ka sensoru attīstība notiek ļoti strauji. Taču pastāv risināmas problēmas lai varētu izmantot materiālus ar augstāku laušanas koeficientu, īpaši IS diapazonā, t.sk. izmantojot planārus viļņvadus. Šādi risinājumi, kurus plānots veidot, ļautu paplašināt iespējas variēt un uzlabot integrēto optisko sensoru īpašības.  $\text{As}_2\text{S}_3$  ( $n=2,45$ ) šajā ziņā varētu būt piemērots filmas materiāls. Tam piemīt laba

optiska caurlaidība tālajā sarkanajā un IS diapazonā. Stara ievadīšana un izvadīšana izmantojot difrakcijas režģi ir iespējams veids palielināt shēmas jutīgumu. Promocijas darbā par svarīgu atzīts uzdevums turpināt darbus ģeometrisku apsvērumu analīzē  $As_2S_3$  viļņvadam gan redzamajā, gan infrasarkanajā spektra daļā. Eksperimentiem pieejamo gaismas avotu un detektoru komplekts noteiks vēlamo parauga sistēmas viļņvada biezumu un iespējami detektējamo vielu kopumu. Katrai detektējamai vielai viļņvada biezuma maiņas izmaiņas būs saistītas ar likumsakarību noskaidrošanu diskrēto pārvietojošos modu ierosināšanai un konkrētam viļņa garumam, lai viļņvadā izplatošos gaismas viļņi sākotnējiem un atstarotiem stariem veidotu koherentu viļņu fronti. Difraktīvu optisku elementu veidošanā nepieciešams halkogenīdu kārtiņā ierakstīt difrakcijas režģus, un veikt redzamās un infrasarkanās gaismas ievadu un izvadu minētajā kārtiņā.

## 2. OBJEKTI UN EKSPERIMENTA METODIKA

### 2.1. Mērījumu objektu izvēle un raksturojums

Eksperimentālo objektu izvēli noteica fāžu diagrammu un fāžu pāreju pētījumu analīze virknē bināru halkogenīdu sistēmu. Halkogenīdu stikliem ir zemas apstrādes - stiklošanās temperatūras, aptuveni 500 °K. Materiālu termiskās izplēšanās koeficients ir daudz lielāks par pamatņu termiskās izplēšanās koeficientu.

Eksperimentāliem fāžu pāreju reversivitātes un kinētisko likumsakarību pētījumiem tika izvēlēta bināra  $Sb_xSe_{1-x}$  sistēma. Izvēlēto sastāvu noteica zinātniski pieņēmumi, lai kādā no sistēmām varētu būtu iespējams iegūt vairākus simtus nanosekunžu īsus kristalizācijas laikus. Apsvērumi bija kvalitatīvi, piemēram - ka kristalizācijas tendence palielinās minēto metastabilo fāžu veidojošo sastāvu tuvumā.

Lai pētītu termisko ietekmi viens un tas pats sastāvs tika termiski uzputināts uz divām veidu pamatnēm (stikla un PMMA), ar vairākas reizes atšķirīgu siltumvadāmību.  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņas ir aptuveni 200nm biezas. Uzputinot tika iegūtas nekristāliskas kārtiņas. Darbā tika pētītas fotoinducētās fāžu pāreju kinētika ( $a \leftrightarrow c$ )  $Sb_xSe_{1-x}$  sistēmā.

Praktiskās izmantošanas pielietojuma pārbaudei - darbam DOE veidošanā un infrasarkanajā spektra reģionā, un prototipa ierīces izveidošanai tika izvēlēta stehiometriskā  $As_2S_3$  sistēma - plāna kārtiņa.

$As_2S_3$  sistēmas plānas kārtiņas ieguva līdzīgi  $Sb_xSe_{1-x}$ , materiālu uzputinot uz stikla pamatnes. Kārtiņas biezums ir aptuveni 5 $\mu$ m.  $As_2S_3$  kārtiņā tika ierakstīts difrakcijas režģis - trīsdimensionāla hologrāfiska struktūra. Tika pētīts lāzera stara ievads, izplatīšanās un izvads no kārtiņās.

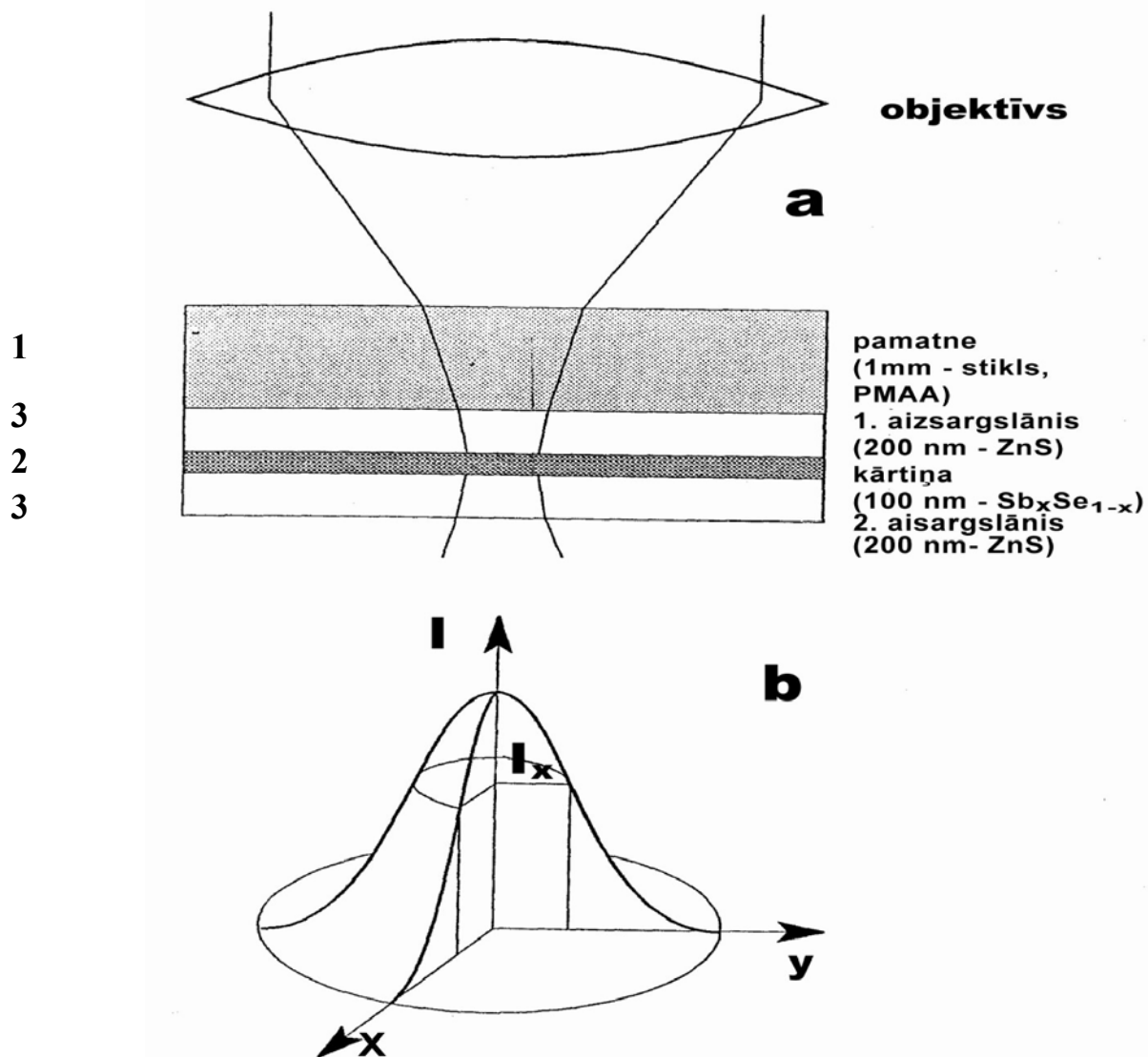
Nekristālisku matricu iespējams iegūt ne tikai putinot, bet arī strauji dzesējot kausējumu - „iesaldējot”. Vispārīgākā gadījumā kristāliskas fāzes veidošanās

likumsakarības strauji dzesētā, nekristāliskā matricā papildina radušos fāžu mehānisko īpašību izpēti legēšanas ietekmes noskaidrošanai. Metālisku stiklu matricai piemīt liela kristalizācijas tendence. Metālisko stiklu paraugi salīdzinājumā ar halkogenīdu stiklu paraugiem ir optiski necaurļaidīgi un tiem ir augstākas kristalizācijas temperatūras. Šādi tika iegūts dzelzs matricas kompozītmateriāls, kuru legēja pievienojot borīdus veidojošus pārejas metālus- Mo, Nb, vai V. Paraugus termiski apstrādāja un pētīja matricas mehānisko īpašību atkarību no sastāva un termiskās apstrādes vēstures.

#### 2.1.1. $Sb_xSe_{1-x}$ plānu kārtiņu sistēma

$Sb_xSe_{1-x}$  sastāva paraugus ieguva attiecīgo Sb un Se sastāvu kausējot vakuumētā aizlodētā kvarca ampulā, un dzesējot ampulu ūdenī, lai izvairītos no kausējuma segregācijas. Iegūto sastāvu sasmalcināja un  $10^{-6}$  toru vakuumā termiski uzputināja no Sb un Se avotiem uz tīrītām stikla (NaOH- destilēts  $H_2O$ - K bihromāts-ultraskaņa+ dest.  $H_2O$ - žāvēšana 100C), un PMMA (spirts- žāvēšana) pamatnēm. Rotējošus paraugus pārmaiņus eksponēja katram avotam un caurmēra biezuma palielināšanās bija 20Å. Uzputinātās kārtiņas sastāvu noteica izmantojot Ožē spektroskopijas metodi. Sastāvu  $Sb_xSe_{1-x}$ , kam  $x=0,50$  (SbSe) vienlaicīgi uzputināja gan uz stikla, gan PMMA pamatnēm. To darīja, lai novērtētu pamatnes ietekmi uz fotokristalizācijas kinētiku. Visus sastāvus uzputināja uz stikla un vienlaicīgi uz Si pamatnēm. Paraugus kam 35nm bieža  $Sb_xSe_{1-x}$  filma tika uzputināta bez ZnS aizsargslāņiem izmantoja fotokristalizācijas kinētikas, optiskā kontrasta un amorfizācijas sliekšņa mērījumiem.

Tika izmantoti arī vairākslāņu paraugi.  $Sb_xSe_{1-x}$  parauga sastāva  $x=0,75$ , šķērsriezums ir parādīts 2.1.a. zīm. Slāņu biezumi mērīti ar interferences



2.1. zīm. Fotoinducēto fāžu pāreju eksperimentālā realizācija  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņā.

- a- lāzera stara gaita paraugā. Paraugs sastāv no stikla vai PMMA pamatnes (1), uz kuras termiski uzputināta  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņa (2) starp diviem ZnS aizsargslāņiem (3). Objektīvs fokusē staru uz  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņas.
- b- lāzera stara intensitātei ir Gausa sadalījums. Lāzera stara intensitāte  $I(x,y)$  pārsniedz attiecīgās fāžu pārejas ( $a \rightarrow c$ ,  $c \rightarrow a$ ) ierosināšanai nepieciešamo minimālo intensitāti  $I_x$  stara centrālajā daļā.

mikroskopu. Abpus  $Sb_xSe_{1-x}$  slānim (100nm) uzputināts ZnS dielektriķa slānis. Amorfizācijas mērījumiem (salīdzināt ar 3.5. zīm., 79.lpp.) tika izmantoti paraugi ar ZnS aizsargslāņiem. Šī slāņa biezumu (200nm) izvēlas tā, lai samazinātu atstarošanu un tādējādi palielinātu absorbēto intensitāti un ieraksta vides gaismas jūtīgumu, bet kopējā daudzslāņu sistēmas optiskā caurlaidība būtu optimāla (izmantotajā mēriekārtā  $\approx 20\%$  pie  $\lambda=647,1\text{nm}$ ). ZnS slāņi kalpo arī kā termiskās un mehāniskās barjeras, kas aizkavē caurumu veidošanos  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņās. Pamatne ir  $>1\text{mm}$  bieza, lai putekļi un virsmas bojājumi būtu ārpus objektīva fokusa dziļuma. Slāņu biezumu putināšanas kontrolē pēc interferences modulētās optiskās caurlaidības ( $\lambda=632\text{nm}$ ).

Lāzera stara intensitātes Gausa sadalījuma dēļ (2.1.b. zīm.) optiskās izmaiņas vairāk notiek centrālajā stara daļā. Ieraksta apgabala efektīvais diametrs ir  $2,4\mu\text{m}$ . To mērīja ar atstarotās gaismas mikroskopu *Neophot 2* pēc fotoamorfizētā apgabala diametra kārtiņā. Optiskās caurlaidības spektrus mērija ar spektrometru *SPECORD*.

Kristāliskus paraugus iegūst, termokristalizējot amorfos paraugus krāsnī Ar atmosfērā ar fiksētu ātrumu  $3,5\text{ }^\circ\text{K}/\text{min}$ , sākot ar istabas temperatūru. Vienlaicīgi parauga optisko caurlaidību kontrolē ar monohromātisku ( $\lambda=647,1\text{nm}$ ) staru. Straujas optiskās caurlaidības samazināšanās sākums atbilst kristalizācijas sākumam, bet atbilstošā temperatūra ir kristalizācijas temperatūra  $T_k$  dotajam sastāvam.

Kristāliskus punktus amorfā filmā un amorfus kristāliskā filmā ierakstīja ar noteikta garuma un jaudas impulsu. Amorfu un kristālisku punktu optiskās caurlaidības,  $T_{am}$  un  $T_{kr}$  ir atšķirīgas. Tiek definēts eksperimentāls mērāms lielums-optiskais kontrasts  $C=(T_{am} - T_{kr})/ T_{am}$ . Katram sastāvam ir raksturīgs sava kontrasta atkarība no intensitātes  $C(I)$ . Tāpēc iespējams eksperimentāli noteikt maksimālo sastāva kontrastu noteiktam intensitāšu intervālam  $C_0$ . Līdz ar to iedarbojoties ar lāzeru uz amorfu paraugu un novērojot optiskās caurlaidības kritumu kļūst iespējams

ievest eksperimentāli salīdzināmu parametru- kristalizācijas laiku  $t_k$ , ar to saprotot laiku kādā amorfs parauga optiskais kontrasts sasniegs noteiktu, eksperimentāli ērti nosakāmu daļu no  $C_0$ . Līdzīgi, izkausēta parauga optiskā caurlaidība  $T_{mlt}$  ir atšķirīga (mazāka par) no amorfā parauga optiskās caurlaidības  $T_{am}$ . Tika izveidota oriģināla, divu lāzeru pulsu eksperimentāla metode amorfizācijas kinētikas mērījumiem halkogenīdu plānās kārtiņās. Pirmā pulsa iedarbība tika kontrolēta ar otru, testa pulsu, kuru veidoja un attālumu starp abiem pulsiem mainīja ar elektronikas palīdzību.

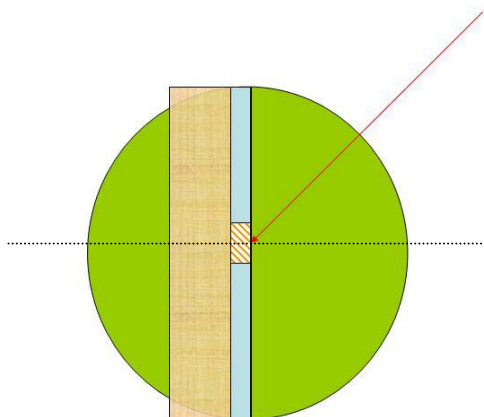
### 2.1.2. $As_2S_3$ plānu kārtiņu paraugi

Darbam ar optisko ierakstu  $As_2S_3$  5 $\mu$ m plānās kārtiņās, kuras uzputinātas uz stikla pamatnēm uzdevums tika stādīts eksperimentāli pārbaudīt cik efektīva ir sarkanās un infrasarkanās gaismas ievadīšana un izvadīšana caur hologrāfiski ierakstītiem Brega difrakcijas režģiem. Papildus darba uzdevums bija sagatavot rekomendācijas darbam IS spektrālajā diapazonā.  $As_2S_3$  ir optiski caurspīdīgs spektra apgabalā, kurā atrodas daudzu molekulu raksturīgās svārstību frekvences [64].

$As_2S_3$  sastāva paraugu materiālu sintēze, kārtiņu uzputināšana, pamatnes sagatavošana ir līdzīgas  $Sb_xSe_{1-x}$  sastāvu paraugiem (sk. 2.1.1. nodaļu). Slāņu biezumu kontrolēja pēc interferences modulētās optiskās caurlaidības ( $\lambda = 632\text{nm}$ ). Izmantotajiem paraugiem bija trīsdesmit pieci maksimumi. Tas aptuveni atbilst 5 $\mu$ m bieziem paraugiem.  $As_2S_3$  plānas kārtiņas ģeometrija parādīta 2.2. zīm. Netika izmantoti aizsargslāņi starp plānu kārtiņu un pamatni vai kārtiņu un gaisu.

$As_2S_3$  kārtiņā ierakstīja difrakcijas režģi - trīsdimensionālu hologrāfiska struktūri. Pētīja lāzera stara ievadu, izplatīšanos un izvadu no kārtiņas.

**a**



**b**



2.2. zīm.  $\text{As}_2\text{S}_3$  plānas kārtiņas ģeometrija

a- shēma. Lāzera stars krīt uz paraugā ierakstītu difrakcijas režģi. Paraugs, parauga turētājs un lāzera stars savstarpēji novietoti tā, lai rotējot paraugu būtu iespējams mainīt leņķi kādu veido krītošais lāzera stars un parauga normāle.

b- eksperimentālās shēmas fotogrāfija.



### 2.1.3. Metālisku stiklu matrica

Metāli parasti neveido stiklus. Līdzīgi halogēnam telūram (1.1.nodaļa) atsevišķos gadījumos, strauji dzesējot, metāliskus sastāvus ir iespējams pārvērst stiklveida stāvoklī. Šajos materiālos nav stiprās, kovalentās saites.

Bora savienojumi tiek izmantoti lai uzlabotu dzelzs matricas īpašības un veidotu kompozītmateriālu, kuram piemīt augsta mehāniska noturība, un teicama termiskā stabilitāte. Borīdu mehāniska iekļaušana dzelzs matricā ievieš piemaisījumus un nevēlamas blakus parādības kā nehomogenitāte. Tas var izraisīt gala produktu īpašību nestabilitāti. Izmantojot pieredzi metastabilu/stabilu fāžu veidošanā amorfos savienojumos (Fe-Cr-*TM*-B, kur *TM*- pārejas metāli) paraugi tika veidoti tā, lai borīdi veidotos jau matricā, un gala produktam būtu vēlamās mehāniskās īpašības. Izmantotā metode bija amorfu sakausējumu kristalizācija. Darba mērķis bija izpētīt dažādu mikrostruktūru ietekmi uz vēlamajām mehāniskajām īpašībām.

Fe<sub>70</sub>Cr<sub>20</sub>B<sub>10</sub> matricai tika pievienoti *TM*- Nb, V, Mo. Šie materiāli tika izvēlēti, jo tiek uzskatīts, ka šie metāli ir labi borīdu veidotāji un, kā matricas materiālu veidos plastisko (*ductile*) bcc  $\alpha$ -Fe ferītu. Tas ļautu izvairīties no fcc  $\gamma$ -Fe austenīta fāzes un sekojošas martensīta matricas veidošanās. *TM* paraugi bija komerciāli, augstas tīrības (četri devītnieki) metāla stienīši (*rods*). Fe<sub>70</sub>Cr<sub>20</sub>B<sub>10</sub> piegādāja Surejas (*Surrey*) Universitāte. Paraugi tika nosvērti tā lai tie veidotu trīs dažādas koncentrācijas (2, 4, un 8 atom%). Kopējais parauga svars (matrica un *TM*) bija 10g. Paraugus notīrīja, ievietoja stikla ampulā. Inertas gāzes Ar klātbūtnē stikla ampulas atsūknēja, sasniedzot augstu vakuumu 10<sup>-6</sup> tori, un izkausēja apmēram 1500 °C.

Izkausētos paraugus dzesēja ar 10<sup>5</sup> °K/sek ātrumu. Dzesēšanas metode bija kausējuma dzesēšana uz rotējošas ripas (*melt-spinning*). Eksperimentālie paraugi bija 5- 50cm gari, aptuveni 5mm plati un milimetra daļas biezās lentas (*ribbons*).

## 2.2. Mēriekārtu uzbūve un mērījumu metodika

Eksperimentu veikšanai galvenokārt tika izmantotas divu veidu iekārtas:

- iekārtu fototermisko inducēto fāžu pāreju ( $a \leftrightarrow c$ ) laika atkarības (kinētikas) pētīšanai atkarībā no stara intensitātes (2.2.1. nodaļa)
- iekārtu difraktīvu optisko elementu veidošanai un izveidotās planārās viļņvadu iekārtas izpētei (2.2.2. nodaļa).

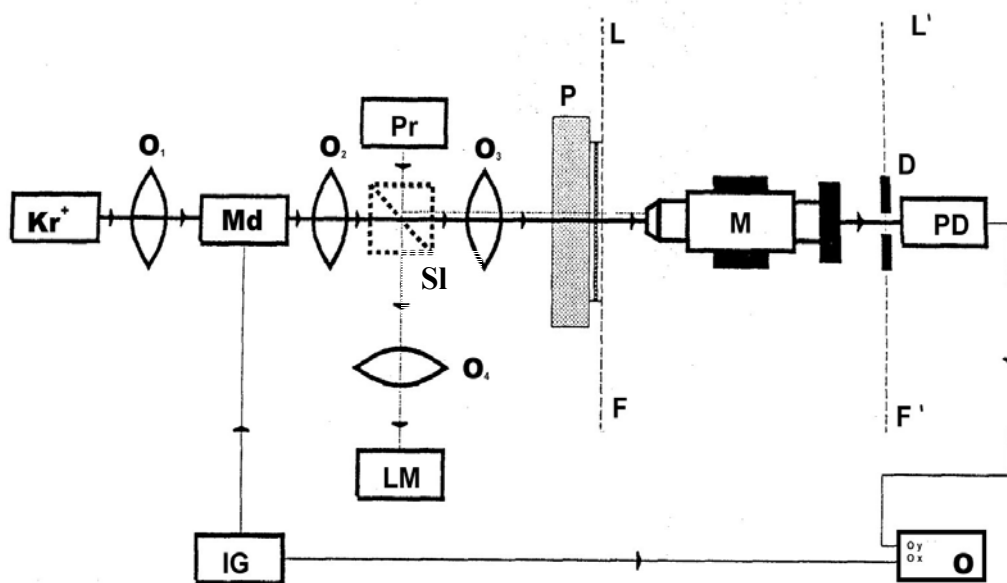
### 2.2.1. $Sb_xSe_{1-x}$ plānu kārtiņu sistēmas eksperimentāla izpēte.

Eksperimentos ar  $Sb_xSe_{1-x}$  plānām kārtiņām par starojuma avotu tiek izmantots kriptonu lāzers  $Kr^+$  ( $\lambda=647,1\text{nm}$ ). Kriptonu lāzera stars ar objektīvu palīdzību tiek izplēsts un tad fokusēts uz pētāmo  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņu. Lāzera staru iespējams safokusēt aplītī ar efektīvo diametru  $d= 2,4\mu\text{m}$ . Krītošā stara jauda uz parauga virsmas var sasniegt 30mW. Visos eksperimentos krītošā lāzera stara jauda  $P_{\text{krit}}$  tika pārrēķināta uz parauga absorbēto intensitāti  $I$  pēc formulas:

$$I = 4 \frac{P_{\text{abs}}}{\pi d^2} = 4 \frac{P_{\text{krit}}(1-T-R)}{\pi d^2}, \quad (2.1)$$

kur  $P_{\text{abs}}$ - absorbētā jauda kārtiņā,  $T$ - transmisijas,  $R$ - atstarošanās koeficients.  $d$  mērīja kā fotoamorfizētā apgabala diametru. Aprēķinos to visur pieņēma par  $2,4\mu\text{m}$ . Tā kā  $d$  nedaudz mainījās, tad izrēķinātajam  $I$  ir apmēram 5% kļūda.

Lāzera stara fokusēšanas un mēriekārtas shēma redzama 2.3. zīm. Objektīvs fokusē no  $Kr^+$  nākošo staru uz akustoptisko modulātoru Md (ML-201-2). Modulātorā palaišanas moments, izmantojot augstfrekvences impulsu ģeneratoru IG ir sinhronizēts ar atmiņas oscilogrāfa O x ass izvērsi. Akustoptiskais modulātors veido no nepārtraukta lāzera stara taisnstūrveida impulsu ar plašās robežās (50ns-1s) regulējamu garumu  $t$ . Impulsu frontes augšanas un dilšanas laiks ir  $\approx 25\text{ns}$ . Šis laiks ir



2.3. zīm. Mēriekārtas shēma.

Kriptona lāzera  $Kr^+$  stars ar objektīvu  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$  palīdzību tiek fokusēts paraugā  $P$  uz pētāmo  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņu. Notiekot kārtiņas ierosinātā apgabala fāžu pārejai (amorfš→kristālšks), mainās tā optiskās īpašības. Kristāliskai fāzei ir raksturīga mazāka optiskā caurlaidība salīdzinājumā ar nekristāliskas fāzes optisko caurlaidību. Tāpēc fotoinducēto fāžu maiņu laikā ir iespējams fiksēt ar fotodiodes  $PD$  un atmiņas oscilogrāfā  $O$  palīdzību. Diafragma  $D$  izgriež ieraksta apgabalam caurizgājušā stara centrālo daļu.

$Md$ - modulātors no nepārtraukta lāzera stara izdala taisnstūrveida impulsu;  $IG$ - impulsu ģenerātors regulē impulsu garumu un oscilogrāfā  $x$  ass izvērši;  $M$ - mikroskopā vizuāli kontrolē lāzera stara fokusēšanos plāknē  $LF$ ;  $Pr$ - prožektors (mikroskopa atbalsta stars);  $LM$ - jaudas mērītājs;  $SI$ - slēdzis.

atkarīgs no lāzera stara fokusējuma modulātorā.

Objektīvs O2 izpleš modulēto lāzera staru tā, lai tas aizpildītu visu objektīva O3 apertūru. To dara, lai maksimāli samazinātu stara difrakcijas noteikto izkliedēšanos. Stara safokusēšana nosaka lāzera gaismas punkta efektīvo diametru uz diska. Difrakcijas dēļ šis diametrs nevar būt mazāks par  $\frac{\lambda}{2 \cdot NA}$ , kur  $NA$ - objektīva O3 skaitliskās apertūras lielums ( $NA=0,65$ ), tātad  $d_{\min}=0,5\mu\text{m}$ . O3 nodrošina lāzera stara fokusēšanos uz parauga virsmas kārtiņas F plaknē. Pārslēdzot slēdzi S1 var izmērīt lāzera stara jaudu ar kalorimetrisko jaudas mērītāju LM (*Carl Zeiss* LM2). Vienlaicīgi prožektora Pr (OH24) stars tiek izmantots parauga vizuālai kontrolei mikroskopā M.

Lāzera stara fokusējumu filmas plaknē kontrolē ar mikroskopu tā, lai mikroskopa plaknē atrastos gan punktveida lāzera stara attēls, gan parauga tās virsmas attēls uz kuras lāzera staru fokusē. *Carl Zeiss* mikroskopam ir mikrometriskā skrūve un galvenokārt tāpēc ir iespējama tik precīza fokusēšanās kontrole. Kad lāzera stars ir safokusēts uz parauga virsmas FL plaknē, pārvietojot objektīvu O4 un izņemot mikroskopa okulāru, tā attēlu safokusē uz diafragmas D, kuras diametrs ir 0,5mm.

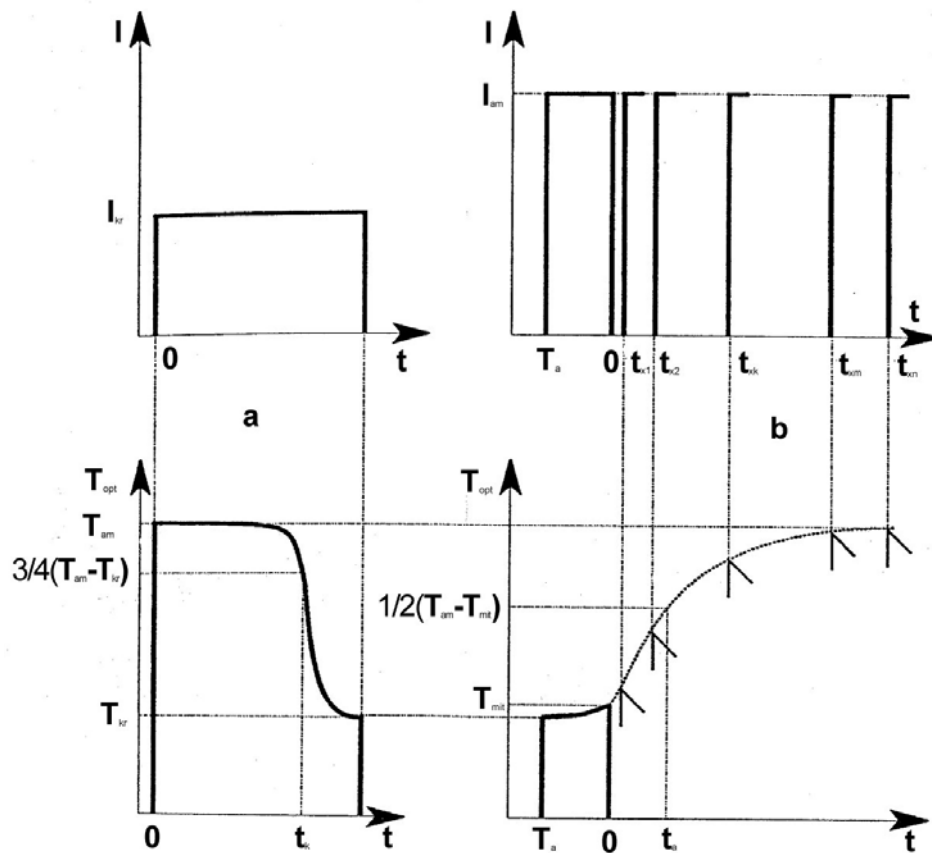
Fokusētā lāzera stara ietekmē, atkarībā no tā intensitātes  $I$  un iedarbības ilguma  $t$  notiek kārtiņas apgabala, uz kuru krīt safokusētais lāzera stars, struktūras izmaiņas: ablatīvo caurumu veidošanās, fotoamorfizācija, fotokristalizācija. Šīs izmaiņas reģistrē fotodiode PD, uz kuru nokļūst tikai caurejošā stara centrālā daļa, ko izgriež diafragma. Fotodiodes reģistrētais signāls tiek padots uz oscilogrāfa y ieeju.

IG palaiž impulsu, nosaka tā garumu, kā arī aizzīmē starp modulātoru un oscilogrāfa x ieeju. Kristalizācijas laiku  $t_k(I)$  mēra uz amorfu kārtiņu iedarbojoties ar impulsu, kura garumu  $\tau$  var mainīt. Kad ieraksta apgabals kristalizējas, tad mainās tā optiskā caurlaidība. To fiksē fotodiode PD. Uz oscilogrāfa O redzama  $T_{\text{opt}}(t, I)$  no kuras mēra kristalizācijas laiku. Par kristalizācijas laiku  $t_k$  uzskatīja laiku, kurā amorfā

ieraksta apgabala optiskā caurlaidība mainījās par 25%, no amorfas un kristāliskas kārtiņas optisko caurlaidību starpības, sk. 2.4.a. zīm.

Amorfizācija notiek pēc ierosinošā impulsa izslēgšanas, kad lāzera impulsa izkausētais apgabals tiek dzesēts tik ātri, lai tas nepagūtu kristalizēties. Lai noteiktu amorfizācijas laiku  $t_a$ , uz paraugu tiek raidīts divu vienādas jaudas impulsu pāris. Impulsa garumi pāri ir  $\tau_a$ , bet atstarpe starp impulsiem ir  $t_x$ , un to var mainīt. Paraugam caurizgājušā otra impulsa (testimpulsa) sākuma amplitūda raksturo pirmā impulsa laikā radītās ieraksta apgabala izmaiņas pēc laika  $t_x$ . Izkausētā ieraksta apgabala dzišana sāksies uzreiz pēc pirmā impulsa ar garumu  $t > \tau_a$  beigām. Ieraksta apgabala optiskās īpašības laikā  $t_x > 0$  mainās no izkausētai vielai atbilstošām uz tādām, kuras raksturīgas iesaldētam stāvoklim. Jo vairāk atdziest ieraksta apgabals (lielāks  $t_x$ ), jo skaidrāk izteiktas apgabala amorfās īpašības un apgabala  $T_{opt}$  tiecas uz amorfas kārtiņas  $T_{opt}$ . Katru impulsa pāri „šaujot” jaunā vietā un mainot  $t_x$  izzīmēja testimpulsa sākumam atbilstošo optisko caurlaidību dažādiem  $t_x$ . Kad  $t_x$  kļuva pietiekoši liels testimpulsa sākumam atbilstošā optiskā caurlaidība vairs nepalielinājās. Par amorfizācijas laiku  $t_a$  pieņēma laiku, kurā ieraksta apgabala optiskā caurlaidība mainījās par pusi no amorfa un izkusuša apgabalu starpības, sk. 2.4.b. zīm.

Amorfizācijas procesa sliekšņa intensitāti  $I_s$ , noteica pēc kristāliskā apgabala optiskās caurlaidības izmaiņas- pirms impulsa ar garumu  $t$  un pēc tā, kad ieraksta apgabals jau atdzisis un amorfizējies, tā lai šī starpība sasniegtu 5%. Ar šādu metodiku var pētīt paraugus, kuru optiskā caurlaidība amorfā un kristāliskā stāvoklī atšķiras vismaz par 8% un kuri absorbē pietiekoši daudz krītošās intensitātes.



2.4. zīm. Fotoinducēto fāžu pāreju kinētikas mērīšanas metodika.

- a- par intensitātei  $I_{kr}$  atbilstošo *kristalizācijas* laiku  $t_k$  tika pieņemts laiks, kurā amorfā apgabala optiskā caurlaidība  $T_{opt}$  samazinās par  $1/4$  no amorfā un kristāliskā apgabala optisko caurlaidību starpības;
- b- impulss ar garumu  $\tau_a$  un intensitāti  $I_{am}$ ,  $I_{am} > I_{kr}$  izkausē ieraksta apgabalu. Pēc impulsa beigām izkausētais apgabals atdziest un amorfizējas. *Amorfizācijas* laiks  $t_a$  tika mērīts kā laiks, kurā ieraksta apgabala  $T_{opt}$  pēc ierosinošā impulsa beigām sasniedz pusi no pilnas amorfizācijas  $T_{am}$  un izkausētā apgabala  $T_{mlt}$  starpības.  $T_{opt}$  pēc amorfizējošā impulsa beigām mēra iedarbojoties uz paraugu ar impulsa pāri (impulsa garums  $\tau_a$ ), mainot nobīdi  $t_x$  starptiem.

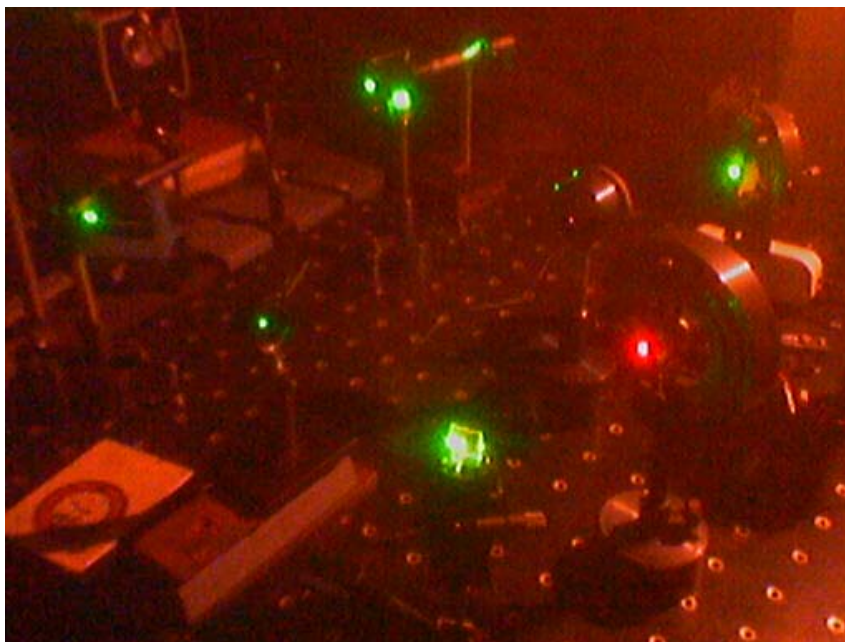
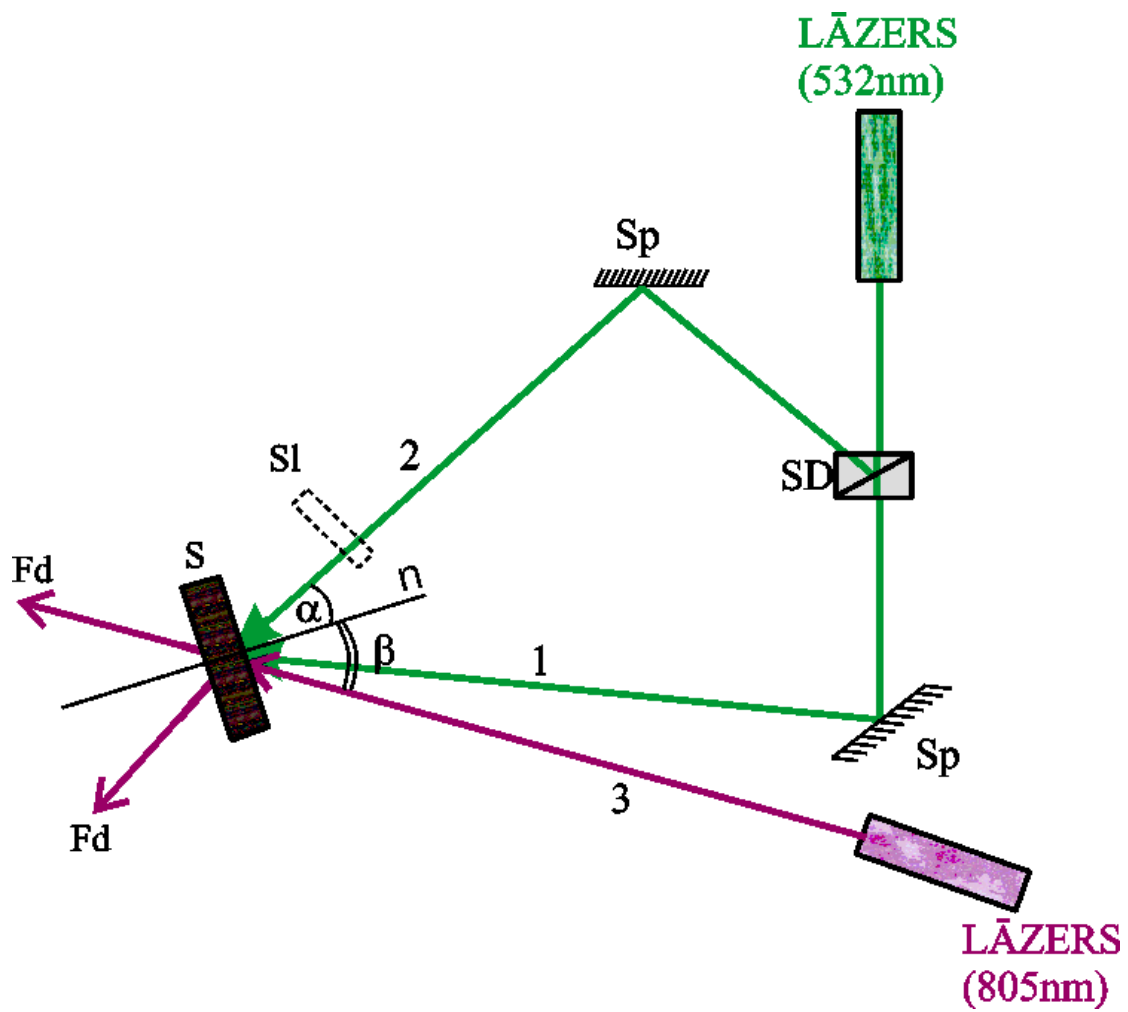
### 2.2.2. $As_2S_3$ plānu kārtiņu pētījumi

Darbam ar optisko ierakstu  $As_2S_3$  5 $\mu$ m plānās kārtiņās, kuras uzputinātas uz stikla pamatnēm bija sekojoši eksperimentāli un ar tiem saistīti soļi:

- 1) hologrāfiskais Brega režģa ieraksts  $As_2S_3$  un eksperimentāls Brega režģu ieraksts ar dažādiem difrakcijas režģa parametriem  $\Lambda$ ,
- 2) atstarotās, caurizejošo, difragēto gaismas staru leņķisko atkarību redzamajai sarkanajai un tuvajai infrasarkanajai gaismai eksperimentāla noteikšana,
- 3) aprēķinu veikšana optimālajam stara ievada leņķim  $As_2S_3$  paraugā,
- 4) eksperimentu veikšana, lai praktiski ievadītu lāzera staru  $As_2S_3$  paraugā redzamajā sarkanajā un tuvajā infrasarkanajā spektra diapazonā. Tehnisko ierobežojumu un iespēju, difrakcijas efektivitātes un modu nosacījumu novērtēšana.
- 5) sagatavot rekomendācijas optiska, ķīmisko vielu sensora un viļņvadu sistēmas izveides modelim.

Eksperimentāli soļi ir 1, 2, 4. Turpmāk tiks izklāstīti mēriekārtas uzbūve un mērījumu metodika katram no tiem atsevišķi.

Hologrāfiskam Brega režģa ierakstam  $As_2S_3$  un eksperimenti dažādu difrakcijas režģa parametra  $\Lambda$  iegūšanai tika sagatavota optiska shēma, kura attēlota 2.5. zīm. Darbības pamatā ir kvalitatīvs, jaudīgs, koherents lāzers *VERDI V-6*, stara dalīšana un sekojoša savietošana uz parauga virsmas hologrāfiskā Brega režģa ieraksta punktā. Lāzera viļņa garumam jābūt tādai ko jūt ieraksta materiāls. Verdi lāzera viļņa garums ir 532nm. Šajā iekārtā Ar<sup>+</sup> lāzera stars (532nm) krīt uz stara dalītāju. Stari atstarojas no spoguļiem un tiek simetriski savietoti punktā uz parauga virsmas. Tiek ierakstīts hologrāfisks difrakcijas režģis. Ierakstu kontrolē ar otru lāzeru (635nm vai 808nm) mērot difrakcijas efektivitāti no ierakstāmā režģa. Kad sasniegta maksimālā difrakcijas efektivitāte ieraksts tiek apturēts.



2.5. zīm. Blokskhēma un optiskās shēmas fotogrāfija hologrāfiskam Brega režģa ierakstam  $As_2S_3$ . Tika ierakstīti difrakcijas režģi ar dažādiem difrakcijas režģa parametriem  $\Lambda$ .



Otra lāzera (kurš tiek izmantots kontrolei) viļņa garums atbilst viļņa garumam, kurš tika izmantots prototipa ierīcē - planārā gaismas vadā, kurā integrēts gaismas ievada mezgls, planārs viļņvads un gaismas izvada mezgls. Darbā tika izmantota simetriska ieraksta shēma - abi lāzera daļītie stari krīt uz parauga punktu vienādos leņķos pret parauga normāli.

Optiskā ieraksta optimālais ilgums tika noteikts eksperimentāli uz ierakstāmo punktu vēršot citu, turpmākos režģa ievada - izvada eksperimentos izmantojamo lāzeru. Tika noteikts laika periods kad tiek sasniegta maksimālā difrakcijas efektivitāte. Šī otra lāzera stars (jauda, viļņa garums) nedrīkst ietekmēt ierakstāmo punktu. Eksperimentos šim nolūkam tika izmantotas LED un LD ar 635nm un 808nm viļņu garumiem, un atbilstošajām izejas jaudām 1,5mW un 115mW. Visas jaudas tika mērītas ar *Nova II Ophir* jaudas mērītāju. Jaudas mērītājs ir aprīkots iespēju reģistrēt jaudu laika atkarību. Izmantotais jaudas mērītājs piemērots darbam redzamajā un tuvajā infrasarkanā spektra daļā [350- 1100nm].

Lai praktiski ievadītu lāzera staru  $As_2S_3$  paraugā redzamajā sarkanajā un tuvajā infrasarkanajā spektra diapazonā, kā arī novērtētu tehniskos ierobežojumus un iespējas, difrakcijas efektivitāti, modu nosacījumus tika veidota cita shēma. Te jāpiezīmē, ka pirms šī eksperimenta tika izveidota shēma ar He-Ne lāzeru un goniometru. Gaismas avota nepietiekošā stabilitāte, mazā infrasarkanā signāls/troksnis attiecība kvantitatīviem mērījumiem, signāla salīdzinoši mazā jauda, neapmierinošā vizuālā kontroles kvalitāte, kā arī kopējais augstais sistēmas trokšņu līmenis, ko tikai daļēji izdevās samazināt pusgadu ilgos eksperimentos, pierādīja nepieciešamību veidot citu shēmu. Šim nolūkam tika iegādāts un uzstādīts cits gaismas avots, IS LD (*Picotronic GmbH*, 808nm, 115mW), mikrorotējamais, translācijas galdiņš ar nepieciešamo grāda daļu un soļa izšķiršanas precizitāti

(*Standa*). Tika nolemts veikt darbu tanī IS spektrālajā diapazonā, kuram ir pieejamas komerciālas vizuālās kontroles un reģistrēšanas iekārtas, tādas kā IS lādiņsaistes matrica. Lai noteiktu atstaroto, caurizejošo, difragēto gaismas staru leņķisko atkarību redzamajai sarkanajai un tuvajai infrasarkanajai gaismai izmantota shēma, kura ir līdzīga 2.5. zīm. attēlotajai. Shēma tika papildināta ar jaudas mērītājiem atstarotās, caurizgājušās un difragētās gaismas vienlaicīgai jaudas mērīšanai.

Šī pati shēma ar nelielām modifikācijām, tādām kā parauga stāvokļa maiņa, mikrotējamā galdiņa tehnisko iespēju labāka izmantošana, gaismas avotu pārvietošana, vizuāla reģistrēšana tika izmantota, lai praktiski ievadītu un izvadītu lāzera staru  $As_2S_3$  paraugā redzamajā sarkanajā un tuvajā infrasarkanajā spektra diapazonā, kā arī novērtētu tehniskos ierobežojumus un iespējas, difrakcijas efektivitāti, modu nosacījumus.

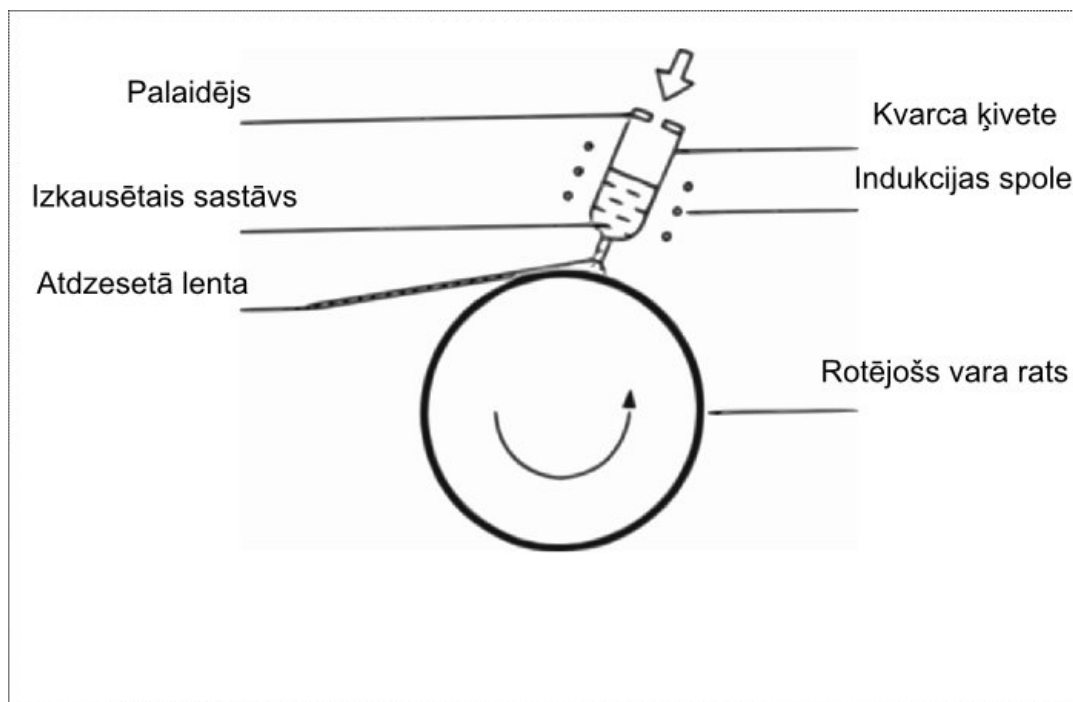
### 2.2.3. Metālisku stiklu matricas īpašību analīze

Izkausēti metālisko stikli, līdzīgi kā halkogenīds telūrs, pāriet stiklveida stāvoklī tikai strauji dzesējot. Tas atšķiras piemēram, no šķidrā agregātstāvoklī esoša selēna, kurā ir kovalentās –Se-Se- un kurš salīdzinoši viegli pāriet stiklveida stāvoklī.

Strauji dzesēta Fe<sub>70</sub>Cr<sub>20</sub>B<sub>10</sub> matricai tika pievienoti pārejas metāli, *TM* (Nb, V, Mo). Izmantojot kausējuma dzesēšanu uz metāla ripas (*melt-spinning*) tika iegūti metāla stiklu paraugi, sk. 2.6. zīm.

Iegūtie paraugi plānu lenšu formā tika pētīti ar diferenciālskanējošo kalorimetriju (*DSC- differential scanning calorimetry*) un diferenciāltermisko analīzi (*DTA- differential thermal analysis*). *DSC* tika izmantots 550- 650 °C temperatūru diapazonā. *DTA* tika izmantots darba temperatūrās lielākās par 700 °C.

Tika izmantotas dažādas atlaidināšanas (*annealing*) temperatūras, lai noteiktu atlaidināšanas temperatūras ietekmi uz mehāniskajām īpašībām, radušās kristāliskās stabilās un metastabilās fāzes un kristalizācijas procesa dinamiku un mehāniku. Šie paraugi tika sagatavoti Vikersa (*Vicker*) cietības mērījumiem. Visi paraugu sastāvi tika arī divas stundas karsēti 1000 °C temperatūrā. Fāzes tika analizētas ar transmisijas elektronu mikroskopu (TEM), rentgenstaru difraktometriju un enerģijas dispersīvo rentgenstaru mikroanalīzi (*EDX- energy dispersive X-ray microanalysis*).



2.6. zīm. Metālisku stiklu nekristāliskā matricā paraugu iegūšana ar kausējuma dzesēšanu uz rotējošās ripas (*melt-spinning*) straujas dzesēšanas tehnoloģiju. Tiek sasniegts  $10^5$  °K/s dzesēšanas ātrums.

### 3.REZULTĀTI UN DISKUSIJA

#### 3.1. Fototermisko un fāžu pāreju īpašību pētījumi $Sb_xSe_{1-x}$ sistēmā.

##### 3.1.1. Amorfu $Sb_xSe_{1-x}$ kārtiņu kristalizācija.

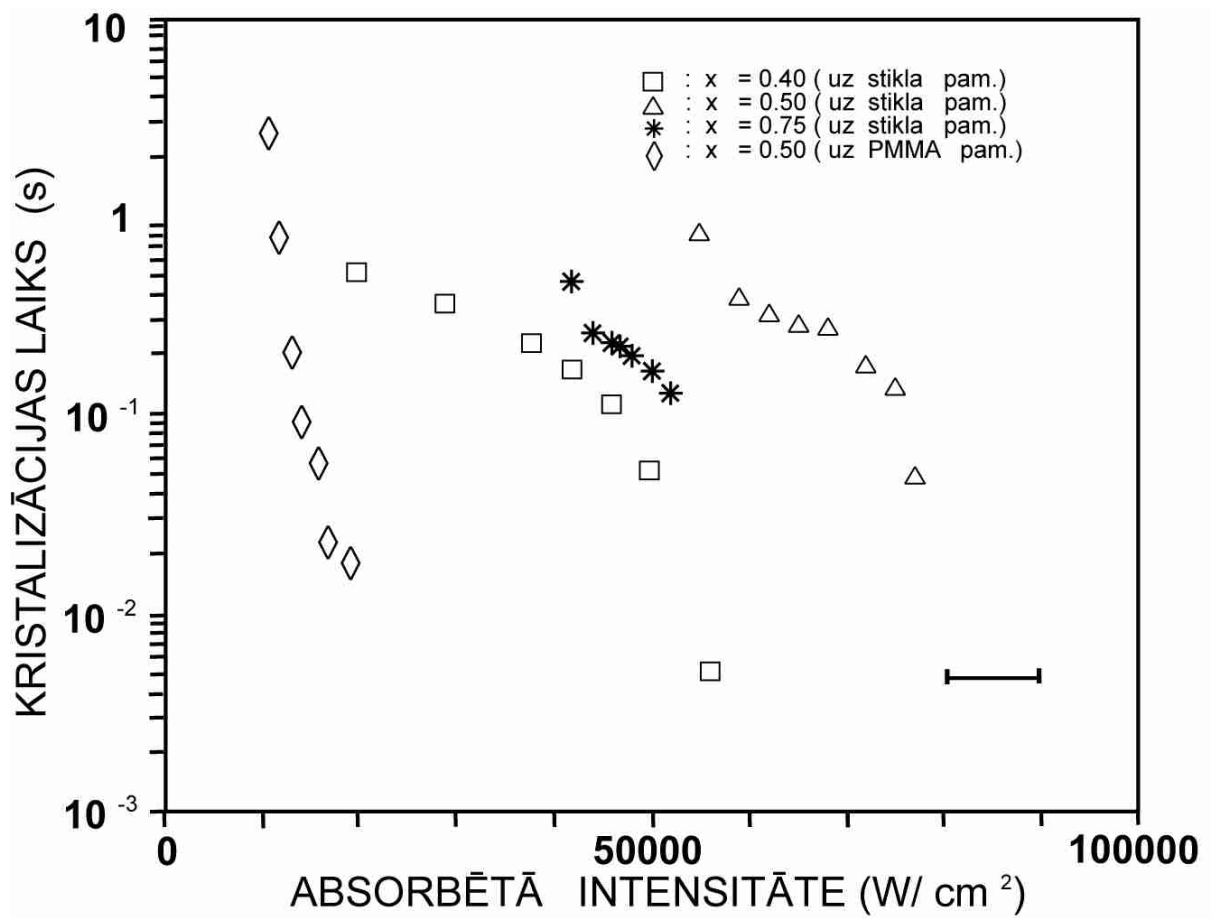
Rentgenstaru difrakcijas mērījumi parāda, ka svaigi putinātas  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņas ir amorfas. Karsējot amorfus paraugus novēro, ka pie noteiktas temperatūras  $T_k$  notiek kārtiņas pāreja polikristāliskā stāvoklī, ko pavada parauga optiskās caurlaidības

samazināšanās  $\frac{\Delta T_{opt}}{T_{am}} \approx 0,5$ . Polikristālisko stāvokli konstatē ar polarizācijas

mikroskopa palīdzību un rentgenstaru difrakcijas mērījumiem. Pēdējie parāda, ka difrakcijas izplūdušas joslas svaigi putinātu, amorfu kārtiņu rentgenogrammās nomaina asu difrakcijas līniju sērijas, kuras atbilst kristāliskām fāzēm. Karsējot ar ātrumu  $3,5^\circ\text{K}/\text{min}$ , tika izmērītas paraugu kristalizācijas temperatūras:  $x=0,40$ ;  $T_{kr}=467^\circ\text{K}$ ;  $x=0,50$ ;  $T_{kr}=483^\circ\text{K}$ ;  $x=0,75$ ;  $T_{kr}=490^\circ\text{K}$ .

Kristalizēto kārtiņu fāžu analīze parāda, ka sastāvā  $x=0,40$  ir viena kristāliska fāze  $Sb_2Se_3$ . Sastāvā  $x=0,50$  dominē kristāliska fāze  $Sb_2Se$ : sešas difrakcijas līnijas, kas atbilst starpplakšņu attālumiem 2,95; 2,75; 2,36; 2,18; 2,07; 1,80Å atbilst vienai no  $Sb_2Se$  kristāliskajām modifikācijām [17].  $ZnS$  visās kārtiņās atrodas polikristāliskā stāvoklī. Paraugs  $x=0,75$  ir rentgenamorfs. Tomēr visiem paraugiem vienā un tajā pašā temperatūru rajonā ( $200^\circ\text{C}$ ) tika novērota raksturīga lēcienveida optiskās caurlaidības samazināšanās un sastāviem  $x=0,40$   $x=0,50$  polarizācijas mikroskopā parādās raksturīga polikristāliska aina. Tāpēc var pieņemt, ka  $x=0,75$  tomēr kristalizējas, bet kristalīti šajā paraugā nav lielāki par 100Å.

Sastāviem  $x=0,40$ ,  $x=0,75$  uz stikla pamatnēm un sastāvam  $x=0,50$  gan uz stikla, gan PMMA pamatnēm tika izmērīti fotokristalizācijas ilguma atkarība no absorbētās gaismas intensitātes kārtiņā, sk., 3.1. zīm. Sastāvam  $x=0,50$ , intensitātes,



3.1. zīm. Amorfu  $Sb_xSe_{1-x}$  fotokristalizācijas laika atkarība no absorbētās gaismas intensitātes ( $\lambda=647,1\text{nm}$ ). Sastāvs  $x=0,50$  uzputināts gan uz stikla, gan PMMA pamatnes. Šim sastāvam intensitāšu, kurām kristalizācijas laiki ir vienādi, attiecība tuva pamatņu siltumvadāmību attiecībai ( $\approx 3,5$ ).

kas atbilst noteiktam kristalizācijas ilgumam atšķiras apmēram piecas reizes stikla un PMMA pamatnēm. Šo atšķirību var izskaidrot ar to, ka ieraksta apgabala temperatūra  $\Delta T$  ir apgriezti proporcionāla pamatnes siltumvadāmībai  $K_2$  (1.2.2. nodaļa). Ņemot vērā, ka  $K_{\text{stikla}} = 3,5 K_{\text{PMMA}}$  var secināt, ka fotokristalizācijai ir termisks raksturs.

Salīdzinot uz stikla pamatnēm uzputināto sastāvu  $x=0,40; 0,50; 0,75$  kristalizācijas laika atkarību no intensitātes var konstatēt, ka  $t_k(I)$  nedaudz atšķiras. Atšķirības var izskaidrot pieņemot, ka 1) atšķiras sastāvu kristalizācijas tendence un kristalizācijas temperatūra; 2) atšķiras dažādu sastāvu siltumfizikālie parametri, kuri ietekmē ieraksta apgabala temperatūru.

Ievērosim, ka novērotie kristalizācijas laiki atbilst situācijai, kad paraugā iestājas stacionārs temperatūras lauks un kārtiņas temperatūru praktiski var uzskatīt par konstantu. Tā kā maksimālie fotokristalizācijas laiki  $t_k \approx 1\text{s}$  ir samērojami ar parauga kristalizācijas laikiem krāsni, tad ierosinātā apgabala temperatūrai šiem tk vajadzētu būt tuvai kristalizācijas temperatūrai  $T_k$ . Saskaņā ar termisko modeli (1.2.2. nod.) ierosinātā apgabala temperatūru šai gadījumā var aprēķināt kā

$$T \approx T_0 + \frac{Ir}{K_2} \approx 800^\circ K \quad (3.1)$$

Šādi aprēķināta temperatūra divreiz pārsniedz krāsni izmērītās kristalizācijas temperatūras. Mazāku atšķirību varētu izskaidrot ar lāzera stara intensitātes Gausa sadalījumu (stara efektīvo rādiusu  $r_0$  nav iespējams mērīt ar tiešām metodēm), bet netieši iegūtā  $r_0$  vērtība neizskaidro tik lielu atšķirību. Šo neatbilstību vēl var izskaidrot, ievērojot kārtiņas siltumvadāmības ietekmi.

Izmantojot elektrostatisko analogiju metodi un elektrisko attēlu metodi [65] stacionāra temperatūras lauka gadījumā izrēķināta kārtiņas ierosinātā apgabala centra temperatūras pieauguma atkarība no kārtiņas biezuma  $h$ , lāzera stara rādiusa  $r$  dažādām kārtiņas un pamatnes siltumvadāmību attiecībām  $\frac{K_1}{K_2}$  pēc šādas formulas:

$$\Delta T = \frac{Ir}{K_2} \cdot \frac{K_2}{K_1} \cdot f(K_1, K_2, h, r), \quad (3.2)$$

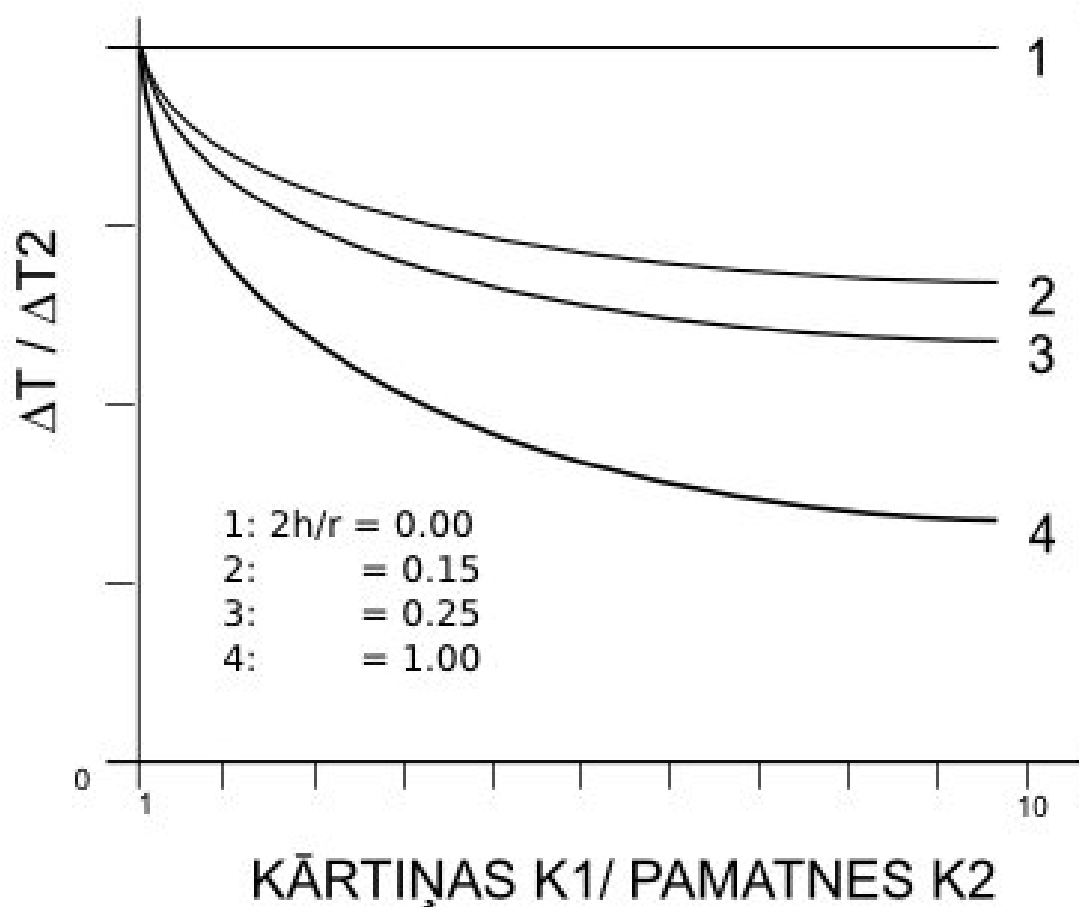
$$\Delta T_2 = \frac{Ir}{K_2}, \quad (3.3)$$

kur  $\Delta T_2$ - kārtiņas centrālās daļas temperatūra neievērojot kārtiņas siltumvadāmību.

$\frac{\Delta T}{\Delta T_2}$  atkarība no  $\frac{K_1}{K_2}$  dažādām attiecībām  $2\frac{h}{r}$  parādīta 3.2. zīm. [66]. Kristalizācijas temperatūra krāsni  $T_{kr}$  un pēc formulas (3.1) aprēķinātās fotokristalizācijas temperatūras atšķirību var izskaidrot pieņemot, ka  $Sb_xSe_{1-x}$  siltumvadāmība ir vairākas reizes lielāka par stikla siltumvadāmību.

Formulas (3.2) iegūšana pamatojas uz elektrostatisko analogiju metodi. Tā balstās uz stacionāra siltuma vadīšanas vienādojuma  $\Delta T = \frac{q(r)}{K_2}$  identiskumu ar analogu vienādojumu elektrostatikā:  $\Delta \varphi = \frac{4\pi\rho(r)}{\varepsilon}$  ( $\varphi$ - elektriskais potenciāls,  $\rho$ - brīvo lādiņu blīvums,  $\varepsilon$ - vides dielektriskā caurlaidība). Lai pareizi aprakstītu robežnosacījumus izmanto elektrisko attēlu metodi. Pēc elektrostatikas uzdevuma atrisināšanas var iegūt meklēto temperatūru sadalījumu.





3.2. zīm. Dažādām kārtiņas biezuma  $h$  un ierosinātā apgabala rādiusa  $r$  attiecībām izskaitļota kārtiņas centra temperatūras pieaugums  $\Delta T$ . Tā normēta pret kārtiņas centra temperatūras pieaugumu  $\Delta T_2$ , kuru aprēķinot netiek ņemts vērā, ka kārtiņas siltumvadāmība  $K_1$  atšķiras no pamatnes siltumvadāmības  $K_2$ . Redzams, ka kārtiņas siltumvadāmība jūtami ietekmē termisko procesu.

Ieraksta apgabala temperatūra proporcionāla apgabalā absorbētajai intensitātei. Palielinot intensitāti, kristalizācijas ilgums samazinās, taču pie kādas noteiktas intensitātes apgabals vairs nekristalizējas, bet tajā parādās ablatīvs caurums. Attiecīgais minimālais kristalizācijas laiks atbilst ieraksta apgabala temperatūrai, kas tuva kušanas temperatūrai  $T_m$ .

Stehiometriskajam, no vienas  $Sb_2Se_3$  fāzes sastāvošajam,  $x=0,40$  ir visīsākais minimālais kristalizācijas laiks pētīto  $Sb_xSe_{1-x}$  sastāvu rindā- 5ms. Sastāva  $x=0,50$  minimālais kristalizācijas laiks ir  $\approx 20$ ms paraugiem gan uz stikla, gan PMMA pamatnēm (vienāda temperatūra). Darbā [18] sastāvam  $x=2/3$  norādīti daudzkārt īsāki fotokristalizācijas laiki ( $\approx 200$ ns) veidojoties metastabilajai kristāliskajai fāzei  $Sb_2Se$ . Arī šoreiz veidojas  $Sb_2Se$ , taču cita tās modifikācija. Iespējams, ka „ātrā fāze” var veidoties tikai ļoti šaurā sastāvu diapazonā.

Sastāva  $x=0,75$  minimālais kristalizācijas laiks ir visilgākais- 0,1s. Zināms, ka kušanas temperatūra samazinās samazinoties kristālītu izmēriem [38, 67], kuri  $x=0,75$  gadījumā ir mazāki par  $100\text{Å}$ . Iespējams, ka zemākas  $T_m$  dēļ, minimālais kristalizācijas ilgums ir mazāks nekā sastāviem  $x=0,40; 0,50$  kuros aug salīdzinoši lieli ( $>0,5\mu\text{m}$ ) kristālīti. Jāpiezīmē, ka visu sastāvu minimālie kristalizācijas laiki  $t_k \gg 200$ ns (tas ir garākais fāžu pārejas laiks, kurš vēl apmierina reversīvās optiskās ieraksta vides prasības). Perspektīvi būtu pētījumi ar mazāku sastāva maiņas soli.

### 3.1.2. Fāžu pāreju $a \leftrightarrow c$ reversivitāte un $Sb_xSe_{1-x}$ kārtiņu fotoamorfizācija.

Iedarbojoties ar fokusētu lāzera stara impulsu uz plānu kristālisku  $Sb_xSe_{1-x}$  kārtiņu, tika novērots, ka impulsa garumam  $\tau$  atbilst absorbētās gaismas intensitāte  $I_s$  kārtiņā (slišķņa intensitāte), sākot ar kuru kristāliskajā ieraksta apgabalā parādās amorfās fāzes pēdas. Palielinot  $I$  virs slišķņa intensitātes, ieraksta apgabali pēc

impulsa beigām, amorfizējas. Par to liecina 1) apgabalu  $T_{opt}$  pieaugums līdz vērtībai, kura tuva svaigi putinātas kārtiņas  $T_{opt}$ ; 2) polikristāliskās struktūras izžušana ieraksta apgabalā (novērojumi polarizācijas mikroskopā); 3) iespēja šo apgabalu rekristalizēt.

3.3.a. zīm. parādīta parauga  $x=0,50$  mikrofotogrāfija. Kristāliskajā kārtiņā redzama ar lāzera staru ierakstītā amorfo apgabalu rinda, kurā to sērijas atdala ablatīvie caurumi. Uzskatāmības labad ar lāzera staru ievilkta ablatīvas svītras.

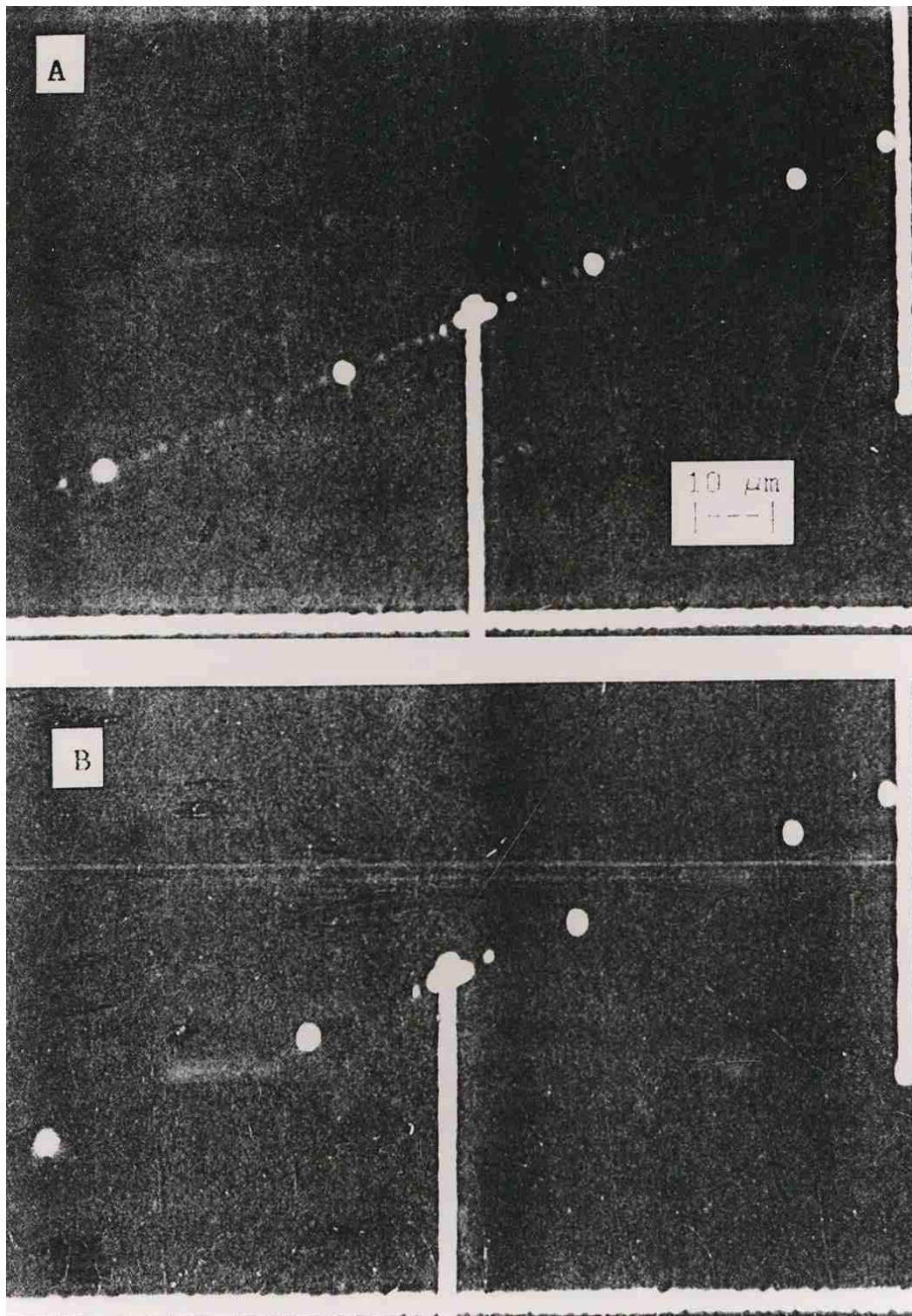
Atkārtoti iedarbojoties ar noteikta garuma un intensitātes lāzera staru uz kādu no kristāliskās pamatnes amorfajiem apgabaliem, to iespējams rekristalizēt. Apgabala optiskā caurlaidība  $T_{opt}$  kļūst vienāda ar pārējās kristāliskās kārtiņas  $T_{opt}$  un tas vairs nav izšķirams no fona. Citiem vārdiem sakot, izdzēsts viens bits iepriekš ierakstītās informācijas. Kristālisko pamatni ar amorfajiem apgabaliem sildot virs kristalizācijas temperatūras, rekristalizējas visi amorfie apgabali, t.i. visa ierakstītā informācija tiek izdzēsta, sk. 3.3.b. zīm. Rekristalizētos apgabalus tāpat kā visu pārējo kristālisko kārtiņu iespējams atkal amorfizēt. Šāda fotoinducēto fāžu pāreju  $a \leftrightarrow c$  reversivitāte novērota visiem pētītajiem  $Sb_xSe_{1-x}$  sastāviem.

Amorfizācijas procesa sliekšņa intensitāte  $I_s$  atbilst ieraksta apgabala uzkausēšanai līdz kušanas temperatūrai  $T_m$  un nelielas tā daļas izkausēšanai, kura amorfizējas pēc impulsa beigām (1.2.2. nod.). Mainot ierosinošā impulsa garumu  $\tau$ , intervālā  $0,4\mu s \leq \tau \leq 70\mu s$  (3.4. zīm) tika uzņemta sakarība  $I_s(\tau)$ .  $\tau \leq 5\mu s$  augot  $\tau$ ,  $I(\tau)$  dilst lēnāk kā  $\frac{1}{\sqrt{\tau}}$ . Vērtība  $\tau=5\mu s$  ir tuva raksturīgajam laikam  $t_2$ , kas atdala divus

raksturīgus kārtiņas temperatūras režīmus,  $t_2 \approx \frac{r^2}{a} \approx 3\mu s$  (1.3.zīm.). Kad  $\tau < t_2$ ,

kārtiņas temperatūru izsaka formula (1.4). Pieņemot, ka amorfizējošā impulsa beigās

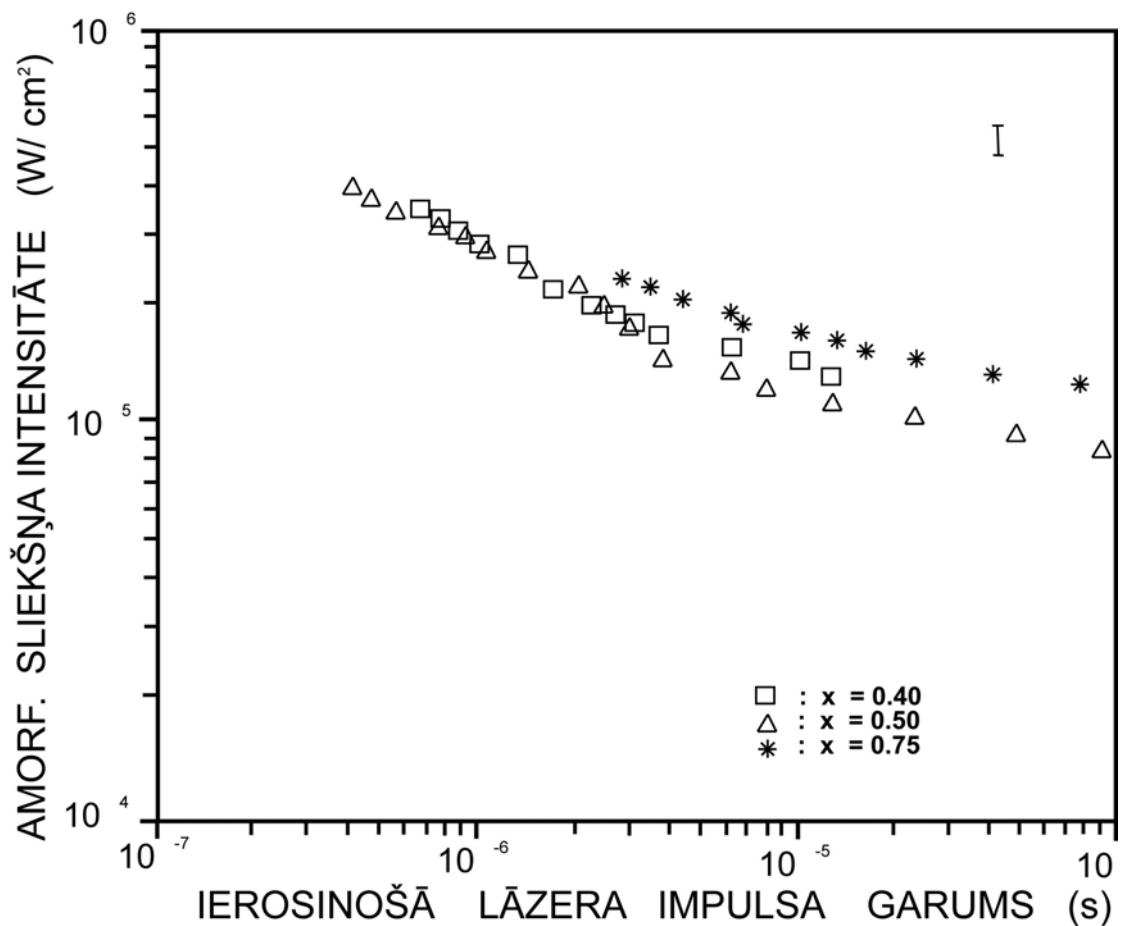
vienmēr tiek sasniegta  $T_m$ , tad  $\Delta T \approx const$  un, tātad  $I_s \sqrt{\tau} \approx const$ .



3.3. zīm. Optiskā fāžu maiņas ieraksta  $a \leftrightarrow c$  reversivitāte  $Sb_xSe_{1-x}$  plānā kārtiņā:

- a- kristāliskā kārtiņā ierakstīta amorfu apgabalu un ablātīvu caurumu rinda;
- b- karsējot paraugu, amorfie apgabali rekristalizējas. Amorfos apgabalus iespējams rekristalizēt ar noteiktas intensitātes un garuma lāzera impulsu.

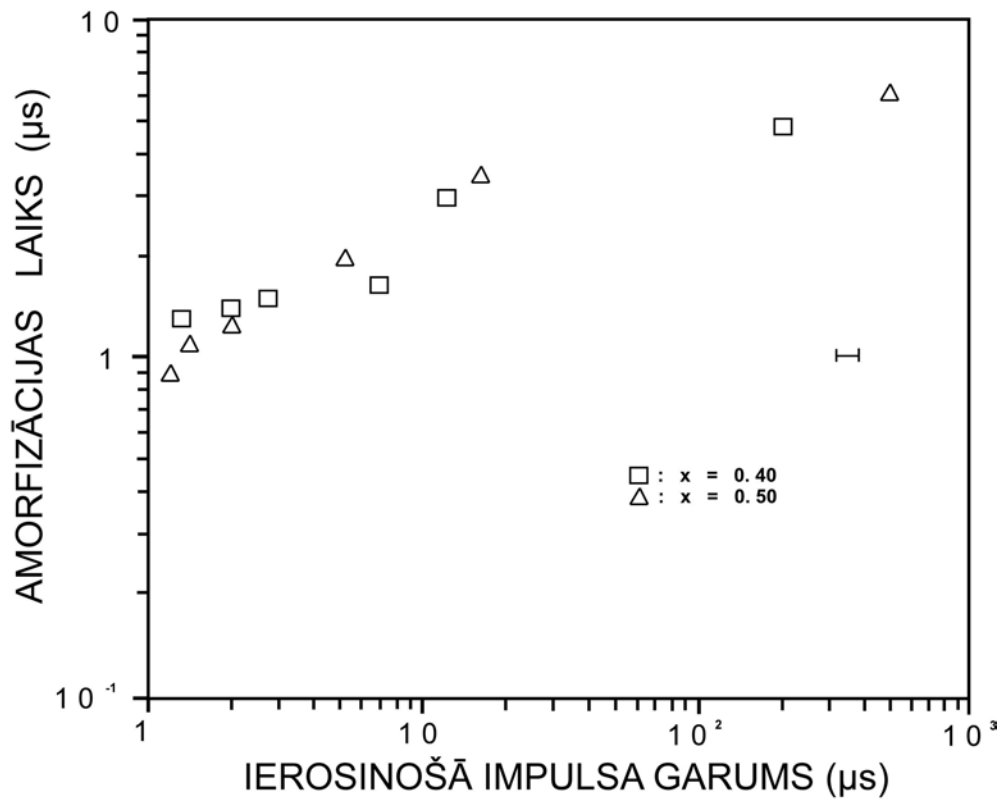
Katrs amorfs punkts un ablātīvs caurums tiek ierakstīts „jaunā vietā”, nedaudz pārbīdot paraugu.



3.4. zīm. Minimālās absorbētās intensitātes amorfizācijas procesam (amorfizācijas sliekšņa intensitātes) atkarība no ierosinošā lāzera ( $\lambda=647,1\text{nm}$ ) garuma  $\tau$ . Visiem sastāviem, kamēr  $\tau < 5\mu\text{s}$ ,  $I \sim \frac{1}{\sqrt{\tau}}$ , tas ir, kārtiņas temperatūru nosaka nestacionāra siltuma difūzija pamatnē. Ja  $\tau > 5\mu\text{s}$ , kārtiņas temperatūra tiecas uz stacionāru vērtību. Tas izskaidro novirzes no likuma  $I \sim \frac{1}{\sqrt{\tau}}$  šim  $\tau$  intervālam.

Tas ir saskaņā ar rezultātiem  $I_s(\tau)$ , kad  $\tau < 5\mu\text{s}$ . Impulsa garumiem  $\tau \gg t_2$  paraugā nostabilizējas stacionārs temperatūras lauks un ieraksta apgabala temperatūra tiecas uz stacionāru vērtību  $T_{st}$  (formula (1.4)). Pieņemot, ka  $T_{st} = T_m$ , sliekšņa intensitāte  $I_s$  nav atkarīga no  $\tau$  un vienāda ar  $I_s \approx \frac{(T_m - T_0)K_2}{r}$ . Atkarība  $I_s(\tau)$ , kad  $\tau > 5\mu\text{s}$ , liecina, ka līdz  $\tau \approx 70\mu\text{s}$  vēl neiestājas pilnīgi stacionārs temperatūras lauks, jo palielinoties  $\tau$ , intensitāte  $I$  turpina lēni dilt.

Laiku  $t_a$ , kurā izkausētais ieraksta apgabals pēc impulsa beigām pāriet amorfā stāvoklī, mērija ar divu impulsu metodi sastāviem  $x=0,40$  un  $x=0,50$ . Amorfizācijas laika  $t_a$  atkarība no amorfizējošā impulsa garuma  $\tau_a$  parādīta 3.5. zīm. Amorfizējošā impulsa garumam atbilstošo intensitāti izvēlējās tā, lai amorfizētos maksimāla ieraksta apgabala daļa (nosaka pēc ierakstītā apgabala  $T_{opt}$ ). Palielinot amorfizējošā impulsa garumu, amorfizācijas laiks  $t_a$  pieaug un pietiekoši lieliem  $\tau_a (>100\mu\text{s})$  tas tiecas uz vērtību  $7\mu\text{s}$ , jo palielinoties amorfizējošā impulsa garumam, samazinās izkausētā ieraksta apgabala atdzišanas ātrums pēc amorfizējošā impulsa beigām; tātad palielinās amorfizācijas laiks. Tomēr šī atdzišanas ātruma samazināšanās ir ierobežota: ja  $\tau_a$  ir daudz lielāks par laiku  $t_2$ , kurā paraugā iestājas stacionārs temperatūras lauks, atdzišanas ātrums tiecas uz konstantu vērtību. Šai vērtībai atbilstošais izkausētā apgabala atdzišanas laiks ir salīdzināms ar  $t_2 = 3\mu\text{s}$ ; tāpēc amorfizāciju iespējams realizēt ar salīdzinoši daudz garākiem impulsiem. Dotajai ieraksta ģeometrijai nav iespējams iegūt garākus dzesēšanas laikus. Ja parauga minimālais kristalizācijas laiks lielāks par  $t_2$  (šoreiz  $t_k > 1\text{ms}$ ), stara izkausētais ieraksta apgabals pēc impulsa beigām vienmēr amorfizēsies. Tas arī tika novērots [66].



3.5. zīm. Ieraksta apgabala amorfizācijas laika atkarība no ierosinošā lāzera impulsa garuma. Palielinot ierosinošā impulsa garumu samazinās izkusušā apgabala dzesēšanas ātrums (salīdzināt ar 1.3. zīm. 26.lpp.) un pieaug laiks, kurā apgabals amorfizējas. Gariem impulsiem amorfizācijas laiks pieaug lēnāk un šķietami tiecas uz kādu konstantu vērtību  $t_a \approx 7\mu s$ .

Otrs impulss ar savu sākuma fronti tikai mēra pirmā impulsa darbības laikā radušos iedarbību. Katrs punkts tiek mērīts „jaunā vietā”, nedaudz pārbīdot paraugu. (salīdzināt ar 3.3. zīm. 76.lpp.).

## 3.2. Optiskie pētījumi As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>

3.2.1. Hologrāfiskais Brega režģa ieraksts As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ar dažādiem difrakcijas režģa parametriem,  $\Lambda$

Difrakcijas režģa ierakstu (3.6.zīm.) As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> veica ar zaļo 532nm *Verdi* V-6 lāzeru simetriskā ieraksta shēmā. Hologrāfiskā režģa ieraksts tiek pārtraukts difrakcijas efektivitātei sasniedzot maksimumu. Tipiski ieraksta parametri: jauda uz parauga 15mW, ieraksta laiks- 2min, stara rādiuss r- 1,5mm.

Hologrāfiski As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> tika ierakstīti difrakcijas režģi ar periodiem: 425, 520, 600, 700, 1000 un 8000nm. Mazākais režģa periods ko iespējams ierakstīt ir lielāks par  $\lambda/2$ . Dažāda perioda režģu ierakstu panāk mainot lāzera stara krišanas leņķi ( $\Lambda > 8\mu\text{m}$ , kad  $\alpha < 2^\circ$ ).

Šiem lāzera stariem slīpas krišanas konfigurācijā tika izmērīta ierakstīto hologrāfisko režģu difrakcijas efektivitāte, kura viļņu garumiem 635nm un 805nm sasniedza atbilstoši 15% un 14%. Šādas difrakcijas efektivitātes ir pietiekami lielas, lai pētītu iespējas veidot lietojumus planāriem gaismas vadiem uz nekristālisku As-S kārtiņu bāzes.

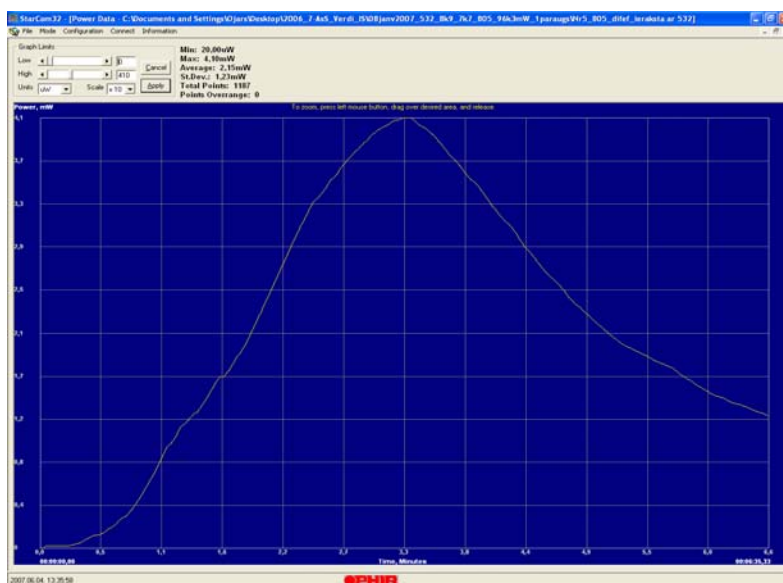
Difrakcijas režģa periods ir atkarīgs no ieraksta ģeometrijas (ieraksta ar  $\lambda=532\text{nm}$ ).

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}, \quad (3.4)$$

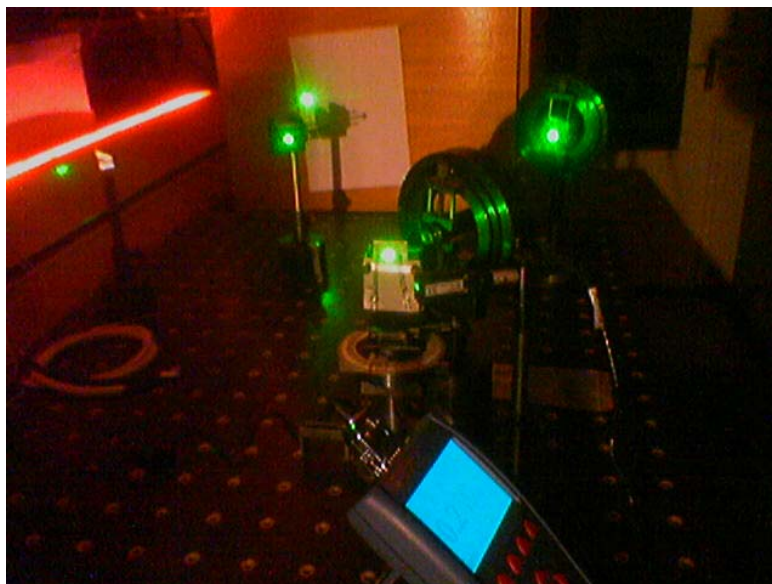
kur  $\alpha$ - ierakstošā stara krišanas leņķis pret parauga normāli, sk., 3.7. zīm. Tika aprēķināts ierakstītā režģa perioda atkarību no leņķiem, simetriska ieraksta apstākļos.



ε

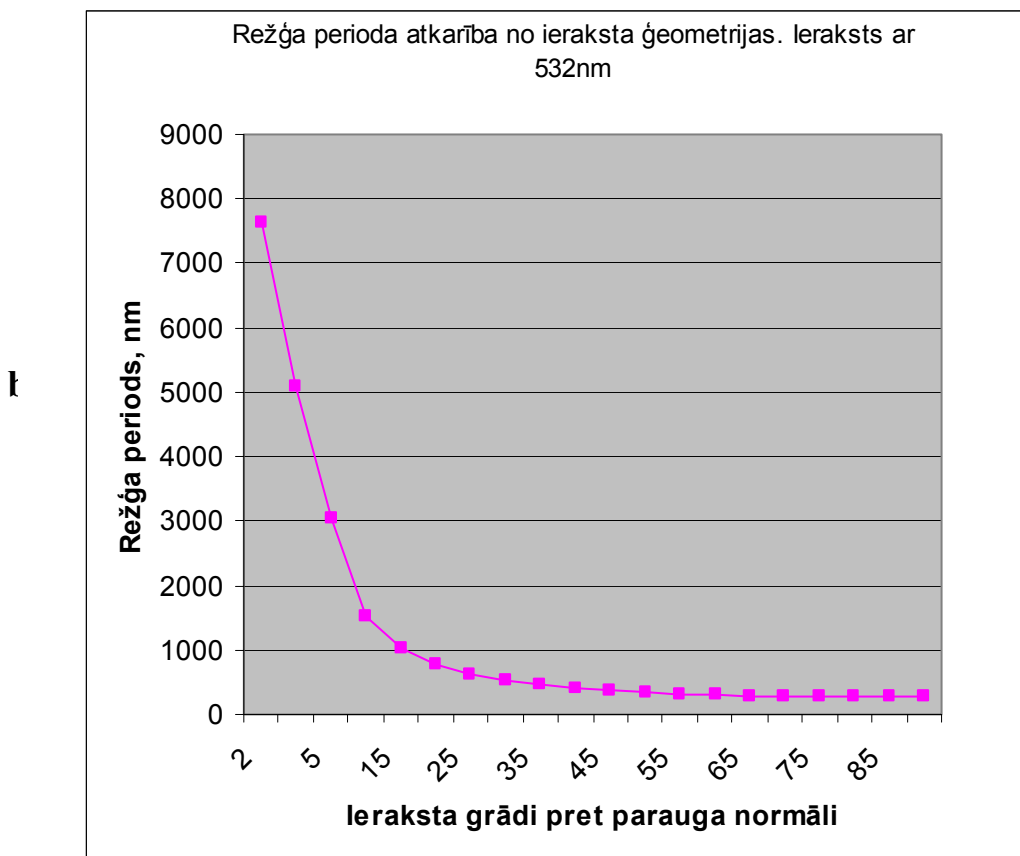
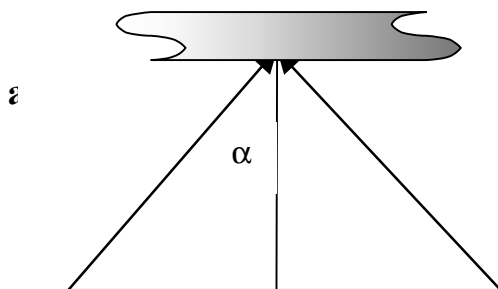


ε



3.6. zīm. Difrakcijas režģa ieraksts.

- a- Difrakcijas maksimuma atkarība no laika mērot ar vēlāk izmantojamo viļņu garumu 637nm vai 808nm. Visi ieraksti tiek veikti ar 532nm Verdi lāzeru. Ieraksts tiek pārtraukts difrakcijas efektivitātei sasniedzot maksimumu. Tipisks ieraksta laiks ir vairākas minūtes garš.
- b- Hologrāfiskā difrakcijas režģa eksperimentāls ieraksts.



3.7. zīm. Režģa perioda atkarība no ieraksta ģeometrijas.

a- ieraksta ģeometrijas shēma,

b- aprēķinātā režģa perioda atkarība no ieraksta ģeometrijas ierakstam ar 532nm. Režģa periods  $\Lambda$  būs lielāks par  $\lambda/2$ . Kad  $\alpha < 3^\circ$ , tad  $\Lambda > 10\lambda$ . Rakstot ar 532nm praksē ierakstāmāmie  $\Lambda$  būs no aptuveni 300nm līdz pat lielāki par 8 $\mu$ m, kad leņķis  $\alpha < 2^\circ$ .

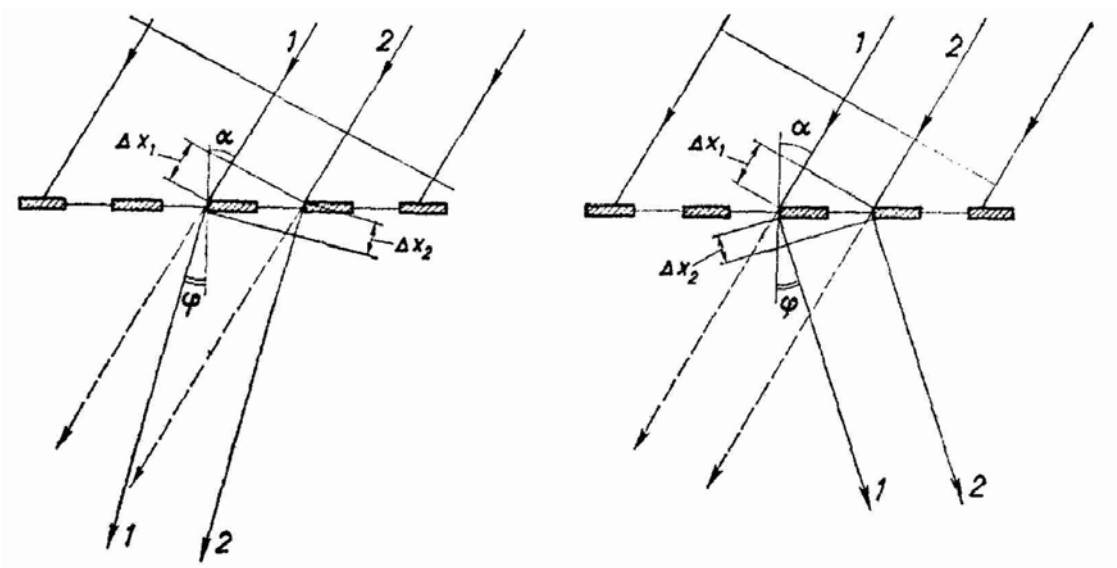
Slīpas staru krišanas gadījumā uz difrakcijas režģi, gājumu diference attiecīgajiem stariem no blakusesošajām spraugām ir citāda. Difrakcijas režģa galvenā formula, staru slīpas krišanas gadījumā [27] ir:

$$d (\sin\varphi \pm \sin\alpha) = m\lambda, \quad (3.5)$$

sk. 3.8. zīm.

Slīpas krišanas gadījumā difrakcijas ainu var novērot tikai tad, ja režģa periods  $\Lambda$  ir lielāks par  $\lambda/2$ . Šī sakarība praksē ir svarīga. Tā nozīmē, ka piemēram, ja vēlamies strādāt ar krītošo  $\lambda=16\mu\text{m}$  IS gaismu, tad  $\Lambda$  jābūt lielākam par  $8\mu\text{m}$ . Izveidotā eksperimentālā shēma atļauj ierakstīt difrakcijas režģus darbam ar IS staru difrakcijas ainas veidošanos (diapazona robežas salīdzināt ar 3.7.b.zīm.).

Tika izvirzīts uzdevums aprēķināt ar 532nm ierakstīto difrakcijas režģu periodu saistību ar nolasošo staru ģeometriju tuvajā IS diapazonā. Aprēķins tika veikts laboratorijā pieejamajiem lāzeru avotiem 1150nm un 1500nm. Tika aprēķināts ar 532nm ierakstītā difrakcijas režģa periodam  $\Lambda$  atbilstošais IS stara Brega leņķis. Rezultāts parādīts 3. tabulā. Kā jau sagaidāms, pieaugot izmantojamajam viļņa garumam strauji pieaug Brega leņķis. Iegūtais rezultāts parāda, ka šī tipa iekārtai ir svarīgi iepriekš zināt plānojamo IS staru viļņu garumu  $\lambda$  darba diapazonu, lai varētu izvēlēties un ierakstīt tādu difrakcijas režģa periodu  $\Lambda$ , ar kuru iespējams sekmīgs darbs.



3.8. zīm. Staru kūlis krīt slīpi uz difrakcijas režģi. Difrakcijas režģa galvenā formulā (3.5), ja leņķi  $\varphi$  un  $\alpha$  atrodas vienā pusē normālē, lietojama plusa zīme, ja dažādās tad mīnusa zīme. Slīpas krišanas gadījumā difrakcijas ainu var novērot tikai tad, ja režģa periods  $\Lambda$  ir lielāks par  $\lambda/2$  [27]. Šis ir svarīgi praksē, jo nozīmē, ka piemēram krītot  $\lambda=16\mu\text{m}$  IS gaismai, režģa periodam  $\Lambda$  jābūt lielākam par  $8\mu\text{m}$ . Izveidotā eksperimentālā shēma atļāva ierakstīt šādus difrakcijas režģus darbam ar IS staru difrakcijas ainas veidošanos.

Ieraksta leņķis [grādi, $\alpha$ ] (532nm)	Režģa periods $\Lambda$ (532nm)	Breģa leņķa sinuss, 1150nm $\sin \alpha_{1150nm}$	Breģa leņķis 1150nm $\alpha_{1150nm}$	Breģa leņķa sinuss, 1500nm $\sin \alpha_{1500nm}$	Breģa leņķis 1500nm $\alpha_{1500nm}$
5	3052	0,19	10,9	0,25	14,2
10	1532	0,38	22,0	0,49	29,3
15	1028	0,56	34,0	0,73	46,9
20	778	0,74	47,7	0,96	74,7
25	629	0,91	66,0	1,19	#NUM!
30	532	1,08	#NUM!		
35	464	1,24			
40	414	1,39			
45	376	1,53			
50	347	1,66			
55	325	1,77			
60	307	1,87			
65	293	1,96			
70	283	2,03			
75	275	2,09			
80	270	2,13			
85	267	2,15			
90	266	2,16			

3. tabula. Aprēķināta sakarība starp ieraksta leņķi ( $\lambda=532nm$ ), režģa periodu un nolasošā IS (1150nm un 1500nm) lāzera viļņa garumu, un atbilstošo Breģa leņķi. Pieaugot izmantojamajam viļņa garumam strauji pieaug Breģa leņķis.

Praktiskie apsvērumi stara ievadīšanai plānā  $\text{As}_2\text{S}_3$  kārtiņā seko no difrakcijas režģa galvenās formulas. Perpendikulāri krītoša stara pirmais difrakcijas maksimuma leņķis būs  $90^\circ$ , kad  $\Lambda$  būs vienāds ar  $\lambda$ . Taču jāievēro, ka stars iekšēji neatstarosies filmā. Lai difragētais stars pilnībā iekšēji atstarotos tam uz robežvirsmas ar optiski mazāk blīvu vidi ir jākrīt leņķī, kas ir lielāks par robežleņķi. Robežleņķi nosaka,

$$\sin \alpha = \frac{n_{stikls}}{n_{filma}} \quad (3.6)$$

un pieņemot  $n_{stiklam} = 1,5$  un  $n_{\text{As}_2\text{S}_3}$  kārtiņai = 2,45,  $\alpha = 37,8^\circ$ . Atbilstošais  $\alpha$  filmas un gaisa ( $n=1$ ) robežvirsmā ir  $\alpha = 24,1^\circ$ . Tādēļ, lai notiktu pilna iekšējā atstarošānās un izplatīšanās  $\text{As}_2\text{S}_3$  kārtiņas filmā staram jākrīt uz robežvirsmām leņķī, kurš lielāks par  $37,8^\circ$ . Šie apsvērumi noteiks

- 1) cik reizes stars atstarosies filmas garuma vienībā,
- 2) stara ievada ģeometriskos apsvērumus.

Stara atstarošānās filmas garuma vienībā būs tieši atkarīga no filmas biezuma. Piemēram, 1cm garai un  $10\mu\text{m}$  biezai filmai maksimālais, ģeometriskos apsvērumu noteiktais atstaroto reižu skaits būs 387 vai mazāks. Te jāņem vērā stara viļņu daba un modu nosacījumi, lai veidotos stabila lauka struktūra, sk., 1.6. zīm. Ja plakanā viļņvadā ielaiž plakanu vilni un tas sāk pilnīgi atstaroties no tā virsmām, tad rodas divas viļņu sistēmas- sākotnējā un atstarotā. Stabila lauka struktūra veidosies tad, kad visi atstarotie stari veidos koherentas viļņu frontes, t.i. staru fāžu starpības būs  $2\pi m$ , jeb  $d = \frac{m\lambda}{2n \sin \varphi}$  (modu ierosināšanās nosacījums, kur  $d$ - biezums,  $n$ - laušanas koeficients. Viļņvadā izplatās fundamentālā moda 0. Tai atbilst noteikts leņķis. Palielinot leņķi var izplatīties augstākas modas (1, 2, ...). Samazinot leņķi, stabila

moda izplatīties vairs nevar. Pastāv filmas biezums, par kuru mazākā modas izplatīties nevar. Biezos paraugos var izplatīties augstākas modas- palielināsies krišanas leņķis, samazināsies atstarošanās reižu skaits un izšķirtspēja.

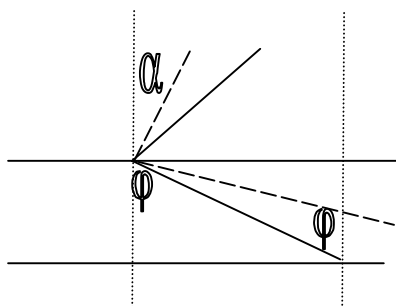
Lai optimizētu ģeometriskos apsvērumus un faktisko atstarojumu skaitu, zinot vēlamo darba viļņa garumu, jau iepriekš jāprojektē un jāuzputina vēlamais parauga biezums. Piemēram, darbam ar  $\lambda=15\mu\text{m}$ , filmas biezums nedrīkst būt mazāks par aptuveni  $3\mu\text{m}$ , turklāt, jāievēro materiāla dispersijas līkne- eksperimentāli noteikta laušanas koeficienta atkarība no darba viļņa garuma.

Laboratorijā eksperimentāli pieejamās stara vizualizēšanas iekārtas un avoti, pagaidām aprobežojas ar tuvu IS diapazonu. Tā kā nav noteikts kāds konkrēts darba viļņa garums sensora izveidei, tad netika īpaši putināti paraugi ar noteiktu biezumu. Tomēr, tika veikts novērtējums no kura var secināt, ka ja gaismas viļņa garums būtu  $30\mu\text{m}$ , robežleņķis  $37,8^\circ$ ,  $n=2,45$ , tad stars var izplatīties ja parauga biezums būtu  $10\mu\text{m}$ . Samazinot darba viļņa garumam, attiecīgi būtu jāsamazina filmas biezums, teiksim gaisma, kurai viļņa garums ir  $1,5\mu\text{m}$  avotam optimālais filmas biezums (kad  $n=2,45$ ) būtu  $0,5\mu\text{m}$ .

Stara ievada ģeometriskos apsvērumus nosaka difrakcijas režģa galvenā formula (3.2). Lai strādājot ar dažādiem avotiem nebūtu nepieciešams ikreiz pārveidot optisko shēmu, tika izveidots analītisks modelis. To izmantoja, lai pirms eksperimenta aprēķinātu visērtāko eksperimenta ģeometriju avotu viļņu garumiem un ierakstāmo difrakcijas režģa periodu.  $\text{As}_2\text{S}_3$  kārtiņai tika aprēķināta sakarība starp krišanas leņķi, difrakcijas režģa periodu  $\Lambda$  un pilnas iekšējās atstarošanās leņķi. Aprēķinus veica kritiskajam leņķim  $37,8^\circ$  un dažādām  $\frac{\lambda}{\Lambda}$  attiecībām (tipiski  $\frac{\lambda}{\Lambda} < 2$ ). Paraugs  $\Lambda=425\text{nm}$ ,  $\lambda=635\text{nm}$  un  $\lambda=808\text{nm}$ ,  $m=1$  parādīts 4. tab.

$\lambda =$	635 nm		$\lambda =$	808 nm
$\Lambda =$	460 nm		$\Lambda =$	460 nm
$\lambda/\Lambda =$	<b>1,38</b>		$\lambda/\Lambda =$	<b>1,76</b>
Leņķis, $\alpha$	$\sin \alpha$	$\sin \varphi <$	Leņķis, $\varphi <$	
25	0,423	0,958	25	0,423
30	<b>0,500</b>	0,880	30	0,500
35	<b>0,574</b>	0,807	35	0,574
<b>40</b>	<b>0,643</b>	0,738	<b>40</b>	<b>0,643</b>
45	0,707	0,673	45	0,707
50	0,766	0,614	50	0,766
55	0,819	0,561	55	0,819
60	0,866	0,514	60	0,866
65	0,906	0,474	65	0,906
70	0,940	0,441	70	0,940
75	0,966	0,415	75	0,966
80	0,985	0,396	80	0,985
85	0,996	0,384	85	0,996
90	1,000	0,380	90	1,000

Izmantotie apzīmējumi.  $\alpha$  – krišanas leņķis,  $\varphi$  – atstarošanās leņķis viļņvadā. Zemāk slīpas krišanas gadījums, kad  $\alpha$  un  $\varphi$  ir vienā pusē normālei.



4. tabula. Darbā izveidotais praktisks, analītisks modelis skaitļu tabulu programmatūrā. Modelis tika izmantots, lai pirms eksperimenta aprēķinātu visērtāko vēlamu ieraksta ģeometriju (leņķi, t.sk. pilnas iekšējās atstarošanās leņķi un ierakstāmā režģa periodu  $\Lambda$ ) noteiktiem viļņu garumiem. Aprēķinu paraugs  $\Lambda=425\text{nm}$ ,  $\lambda=635\text{nm}$  un  $\lambda=808\text{nm}$ ,  $m=1$ . Redzams, ka lai varētu notikt pilna iekšējā atstarošanās abiem eksperimentāli izmantoto viļņu garumu stariem (635nm un 808nm), tad uz difrakcijas režģi staram jākrīt, eksperimentāli ērtā  $40^\circ$  leņķi, un jaieraksta režģis ar režģa periodu  $\Lambda=460\text{nm}$ .

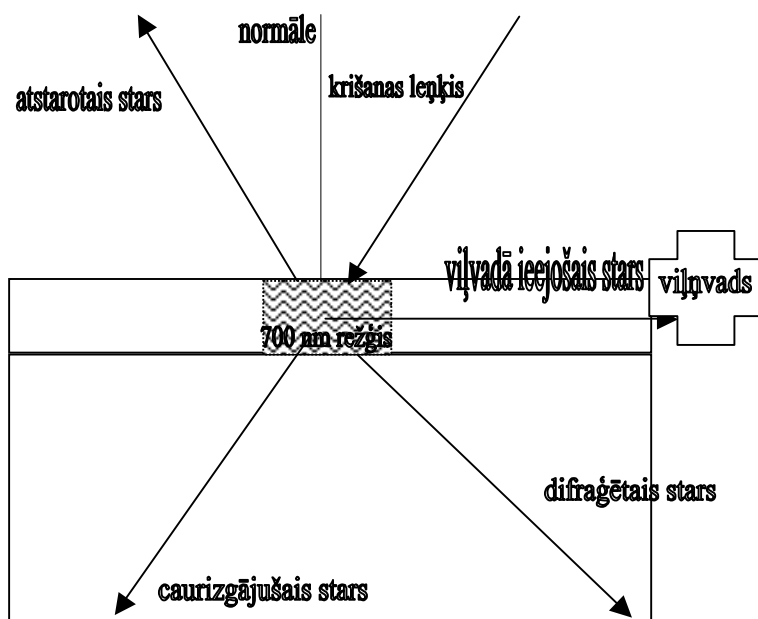


3.2.2. Atstarotā, caurizejošā, un difragēto gaismas staru leņķisko atkarība redzamajai sarkanajai un tuvajai infrasarkanajai gaismai

Pēc difrakcijas režģa ieraksta, caur to, redzamos un infrasarkanos lāzera starus ievada  $As_2S_3$  kārtiņā. Noteiktiem krišanas leņķiem viļņvadā tika novērota izveidojusies stabila modu struktūra. Viļņvada izejā nonākušo jaudu mērīja ar jaudas mērītāju. Redzamā un infrasarkanā lāzera viļņvada izejā nonākušo attēlu reģistrēja ar lādiņsaistes (CCD) attēlu reģistrēšanas iekārtu. Lai pārlicinātos, ka izmantojot eksperimentālo shēmu (3.9. zīm.) notiek difrakcija caur režģi, nevis, piemēram, difūza gaismas izkliede, tika izveidotas divas eksperimentālas modifikācijas. Krišanas leņķis tika mainīts tā lai tas krīt uz paraugu no kreisās puses normālei (turpmāk, „kreisais stars”) un tā, ka tas krīt no labās puses normālei „labais stars” (lūdzu salīdzināt ar 3.8. zīm.). Darba uzdevums ir analizēt difrakcijas efektivitāti filmai pievienotajā viļņvadā „labajam staram”. Daudzdzīslu viļņvads tiks pievienots mehāniski un tā izejā bija iespējams mērīt jaudas. 3.10. zīm. redzama darba iekārtas fotogrāfiju strādājot ar sarkano gaismu (viļņvada izejā sarkanā gaisma) un IS gaismu- viļņvada izejā IS gaismas fotogrāfija. Tika veiktas četras eksperimentālo mērījumu sērijas- (1) kreisais stars, 635nm, 1,5mW; (2) kreisais stars, 808nm, 115mW; (3) labais stars, 635nm, 1,3mW; (4) labais stars, 808nm, 115mW.

Uz difrakcijas režģi krītošais lāzera stars nonāk kārtiņā un viļņvadā, kā arī daļēji iziet cauri parauga sistēmai, daļēji atstarojas, un daļēji difragē. Diviem krītošās gaismas viļņa garumiem (635 un 808nm) eksperimentāli tika mainīts krītošās gaismas un režģa normāles leņķis un noteiktas saistīto staru jaudu atkarības.

Viļņvadā nonākošās jaudas ir nelielas. To maksimumiem piemīt šaura, pāris grādu plata leņķiskā atkarība. Jāatzīmē liels atstarotās gaismas īpatsvars. Atstarošanās mehānisma detalizēta izpētē ir darba turpinājuma praktisks uzdevums.

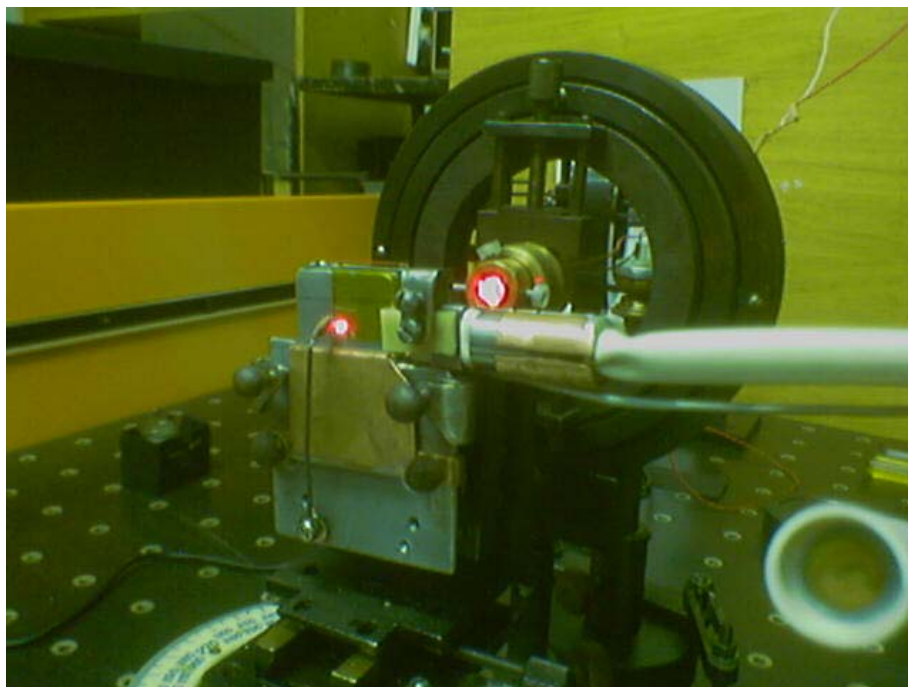


3.9. zīm. Shēma lai pārbaudītu stara ievadīšanu difragējot (nevis, piemēram, difūzi izkliedējoties)  $As_2S_3$  filmā. Difrakcijas režģis ierakstīts iepriekš. Lūdzu salīdzināt ar 3.8.zīm.

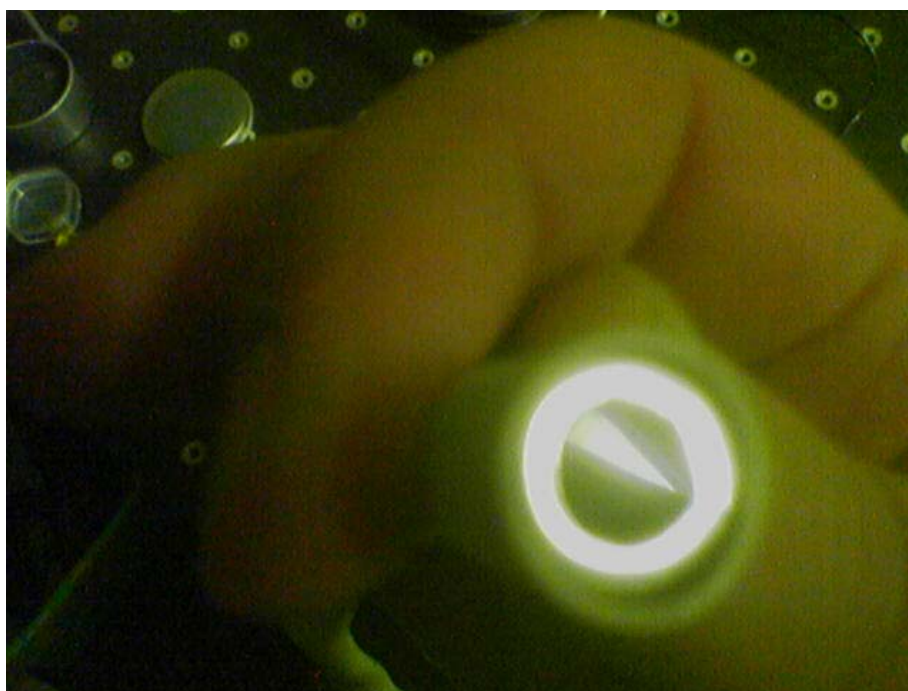
Lietotie apzīmējumi; „kreisais stars”- krīt uz paraugu no kreisās puses normālei, „labais stars”- krīt uz paraugu no labās puses normālei. Ārējais viļnvads tiek piestiprināts „labajā” pusē.

Darba uzdevums- ievadīt viļnvadā staru un noteikt difrakcijas efektivitāti filmā pievienotajā viļnvadā.

ε



ι



3.10. zīm. Fotogrāfijā redzama iekārta, kuras shēma attēlota 3.9. zīm. Iekārtu izmantoja difrakcijas efektivitātes leņķiskās atkarības reģistrēšanai.

- a- Difrāģē sarkanā gaisma. Daudzdzīslu viļņvads tiek mehāniski piespiests pie parauga skaldnes.
- b- Difrāģē IS gaisma. Daudzdzīslu viļņvads piespiests pie parauga skaldnes.

Eksperimentāli,  $As_2S_3$  filmā stara slīpas krišanas konfigurācijā caur iepriekš ierakstītu hologrāfisku režģi ( $\Lambda=700\text{nm}$ ) tika ievadīti gan  $635\text{nm}$ , gan  $805\text{nm}$  lāzeru stari. Tie caur filmu nokļūst viļņvadā un izejā tiek mērītas staru jaudas.

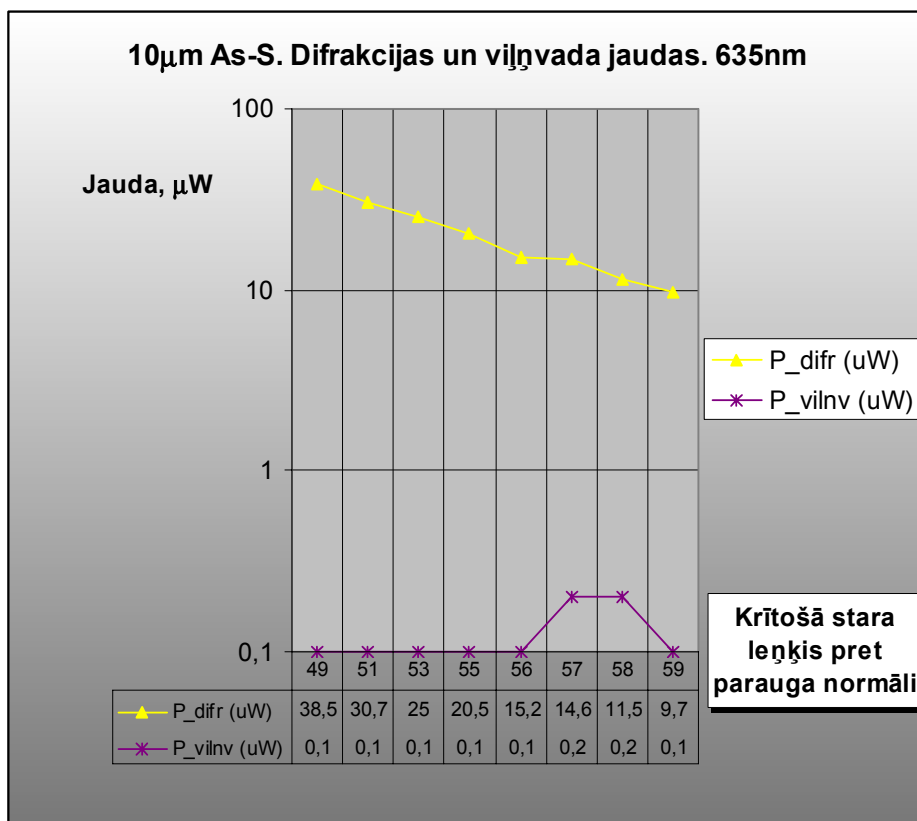
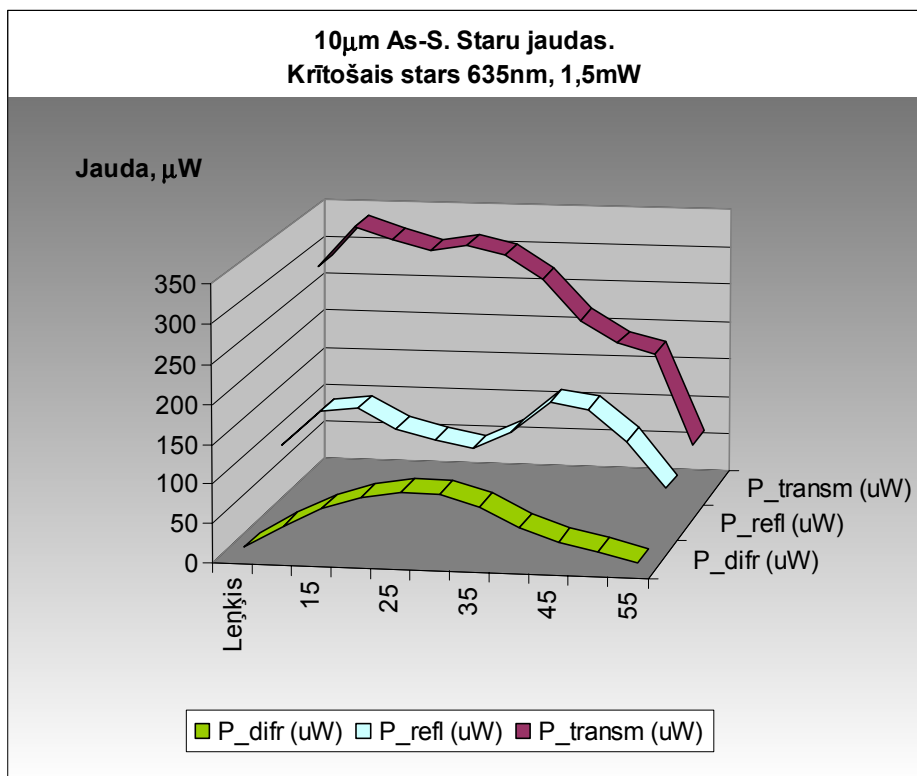
3.11. zīm. parādīts rezultātu kopsavilkumu eksperimentālajai sērijai- kreisais stars,  $635\text{nm}$ . 5.tabula parāda rezultātu kopsavilkumu eksperimentālajai sērijai- kreisais stars,  $808\text{nm}$ . 6. tabula parāda rezultātu kopsavilkumu eksperimentālajai sērijai- labais stars,  $635\text{nm}$ . 7. tabula un 3.12. zīm. parāda rezultātu kopsavilkumu eksperimentālajai sērijai- labais stars,  $808\text{nm}$ .

Svarīgākais secinājums ir, ka viļņvada izejā liels signāls novērojams atbilstoši vairākus grādus platam krītošo staru leņķa diapazonam. Izveidotās eksperimentālās iekārtas iespēju robežās (precizitāte  $1$  grāds) tika izmērīta no viļņvada izejošās lielākās jaudas efektivitātes atkarība no krišanas leņķa. Gaismas ievadīšana ir efektīvāka lielākajam izmantotajam viļņa garumam. Difrakcijas efektivitāte sarkanajai un IS ( $808\text{nm}$ ) gaismai attiecīgi ir  $6\%$  un  $9\%$ .

Otrs svarīgs secinājums ir nepieciešamība samazināt salīdzinoši lielos atstarošanās zudumus. Visās sērijās ir novērojams salīdzinoša liela atstarotās komponentes īpatsvars. Tāpēc lai veidotu sensorus ar līdzīgu ģeometrisku konstrukciju būs nepieciešams veikt pasākumus atstarojumu zudumu samazināšanai.

Interesants novērojums ir transmisijas samazināšanās mērot lielos leņķos. To var izskaidrot ar eksperimentālās iekārtas uzbūvi. Lielos leņķis stars sāk slīdēt gar lodziņa uz paraugu malu un palielinās zudumi. Cauri izejošajai gaismas daudzumam samazinoties, šīs parauga turētāja „ēnas” dēļ, samazināsies transmisija un faktiski šis ierobežojums nosaka eksperimentālās shēmas lietojumu lielāko leņķu rajonā.

Tāpēc vēlams veidot jaunu shēmu kur parauga manuālas rotācijas vietā tiktu lietots mikrorotējams galdiņš.



3.11. zīm. Difrakcijas  $As_2S_3$  kārtiņā un pievienotā viļņvada izejas jaudu eksperimentālās sērijas „kreisais stars, 635nm” grafiskais kopsavilkums.

Leņķis, grādi	P_transm ( $\mu$ W)	P_difr ( $\mu$ W)	P_refl ( $\mu$ W)	P_vilnv ( $\mu$ W)	Difr. ef, %
25	53000	0	30000	1,6	
30	45000	1900	17000	1,6	
35	53500	7900	13000	1,5	
40	58000	10200	10300	2,1	8,87
45	56000	8100	13000	2,8	
50	46500	5000	18500	3,4	
55	36000	3300	25000	6,5	
60	29500	2300	16500	12	
62,5	22500	1000	5300	11,7	
45	56000	8100	13000	2,8	
50	46500	5000	18500	3,4	
52,5					
55	36000	3300	25000	6,5	
57,5	34000	2300	21000	8	
60	29500	2300	16500	12	
62,5	22500	1000	5300	11,7	

5. tabula. Difrakcija  $As_2S_3$  kārtiņā un pievienotā viļņvadas izejas jaudu eksperimentālās sērijas „kreisais stars, 808nm” eksperimentu datu kopsavilkums.

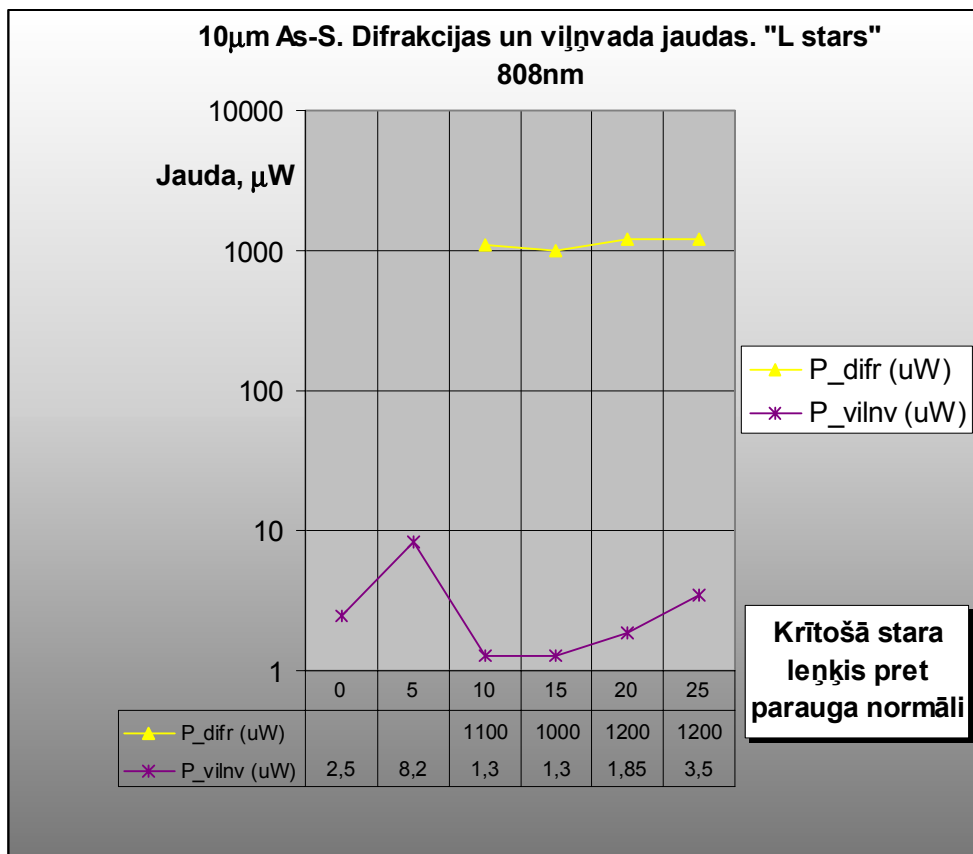
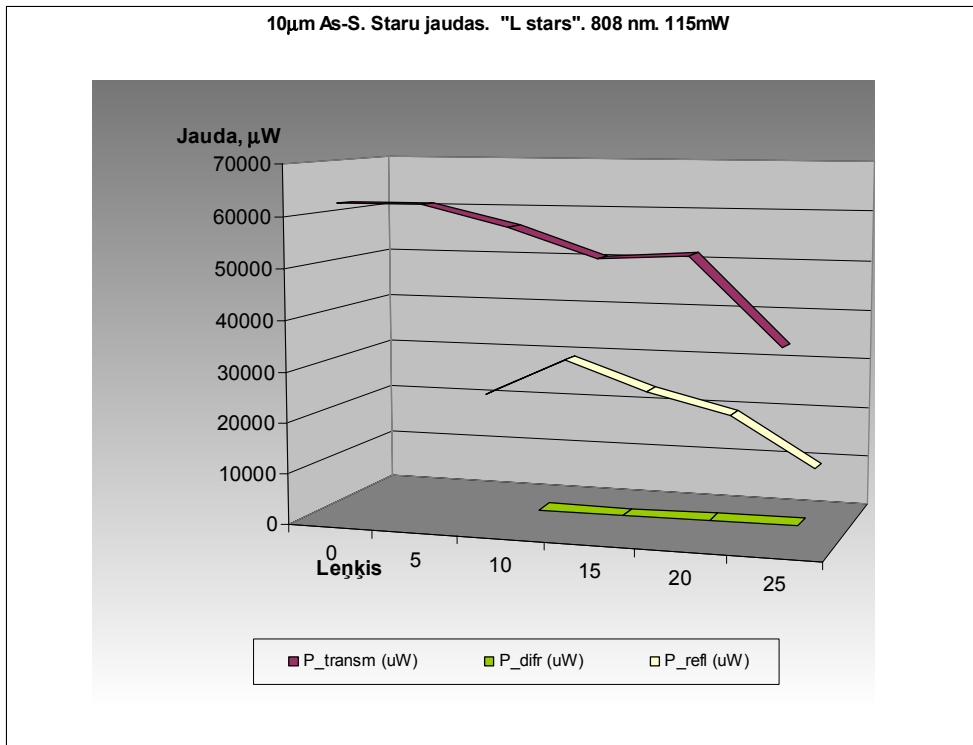
Leņķis, grādi	P_transm ( $\mu$ W)	P_difr ( $\mu$ W)	P_refl ( $\mu$ W)	P_vilnv ( $\mu$ W)	Difr. ef, %	Piezīmes
0	350	21,5				
5	317	25	91			pat pie 8° max P_vilnv < 0,1 $\mu$ W
10	279	28	120			
15	265	34	110			
20	263	49	92			
25	265	38,5	87			
30	254	22,5	94			
35	228	21	108			
40	146	13,5	119			
45	67	7	106			sāk aizsegt staru
9	245	21	102			
8	254	18	94			
7	260	13	96			
6	257	14	75			

6. tabula. Difrakcija  $As_2S_3$  kārtiņā un pievienotā viļņvadas izejas jaudu eksperimentālās sērijas „labais stars, 635nm” eksperimentu datu kopsavilkums.

Leņķis, grādi	P_transm ( $\mu$ W)	P_difr ( $\mu$ W)	P_refl ( $\mu$ W)	P_vilnv ( $\mu$ W)	Difr. ef, %	Piezīmes
0	62500			2,5		
5	62500		21000	8,2		max pie 4,5° 14,1 $\mu$ W
10	58500	1100	29000	1,3		
15	53000	1000	23000	1,3		
20	54000	1200	19000	1,85		
25	37600	1200	9000	3,5		varbūt otrs max?

7. tabula. Difrakcija  $As_2S_3$  kārtiņā un pievienotā viļņvadas izejas jaudu eksperimentālās sērijas „labais stars, 808nm” eksperimentu datu kopsavilkums.





3.12. zīm. Difrakcija  $As_2S_3$  kārtiņā un pievienotā viļņvada izejas jaudu eksperimentālās sērijas „labais stars, 808nm” eksperimentu datu kopsavilkums. Eksperimentāli leņķi iespējams noteikt ar pusgrāda precizitāti. Līdz ar to maksimuma vērtība pie aptuveni  $4,5^\circ$  netiek attēlota grafikā, bet tikai atzīmēta tekstā.

### 3.2.3. Stara ievads un izvads

Lai ievadītu un izvadītu lāzera staru paraugs tika ievietots mikrorotējamā galdīnā. Tas ievērojami atviegloja turpmāko eksperimentu veikšanu. 3.13.a. zīm. redzams reģistrēts lāzera stars, kurš caur difrakcijas režģi nonāk viļņvadā, veido stabilu stacionāru lauku (atstarotie stari veido koherentas viļņu frontes) un izplatās filmā sasniedzot parauga sānu skaldni. 3.13.b. zīm. redzams infrasarkans lāzera stars, kurš caur difrakcijas režģi nonāk viļņvadā, veido stacionāru lauku un pa citu difrakcijas režģi atstāj viļņvadu.

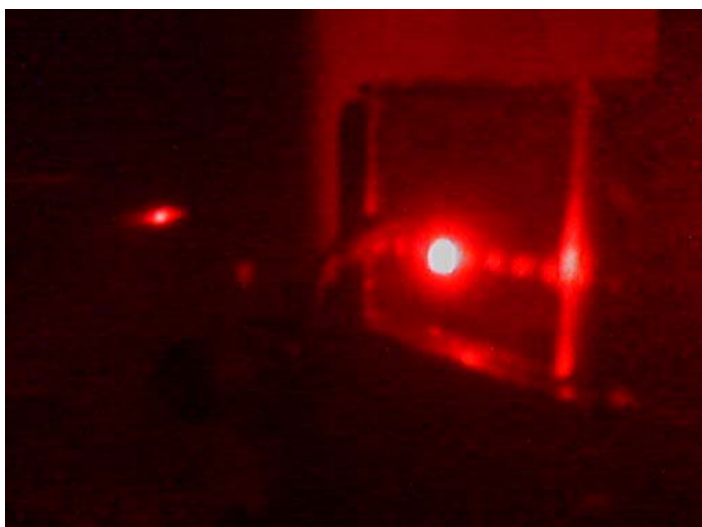
Viļņa garumam atbilstošā attālumā no viļņvada virsmas jābūt rimstošam elektromagnētiskam laukam. To var izmantot sensoru lietojumos, tādu analīžu noteikšanai, kuri absorbē infrasarkanajā spektra daļā.

Stara ievads reducējās uz labākā krišanas leņķa atrašanu vairāku grādu leņķiskajā intervālā un optimāla režģa perioda ierakstu. Kad šie, galvenie divi nosacījumi tika apmierināti, tad varēja novērot raksturīgo attēlu, kurš sarkanajai gaismai parādīts 3.13.a. zīm.

Tika veikti daudzi eksperimenti lai praktiski ievadītu lāzera staru  $As_2S_3$  paraugā redzamajā sarkanajā un tuvajā infrasarkanajā spektra diapazonā. Galvenais secinājums ir, ka viļņvadā pat bez īpašu uzlabojošo slāņu ieviešanas iespējams ievadīt salīdzinoši lielu gaismas daudzumu.

Tika pārbaudīta iespējamība uzlabot optisko kontaktu ar imersijas šķidrums palīdzību. Gala rezultātā par labāko tika atzīts cieša mehāniska kontakta izveidošana un mikroskrūves izmantošana laba, optiskā kontakta izveidošanai. Ārpus laboratorijas grūtības varētu sagādāt nepieciešamība nodrošināt teicamu viļņvada un skaldnes optisko kontaktu.

ε



κ



3.13. zīm. Fotografijas raksturo staru ievadi un izvadi  $As_2S_3$  filmās

Viļņvadā plakans stars atstarojas no tā virsmām. Stabila struktūra veidosies tad, kad visi atstarotie stari veidos koherentas viļņu frontes.

a- stara izvadīšana no  $As_2S_3$  parauga caur sānu skaldni

b- stara izvada no  $As_2S_3$  parauga caur otru difrakcijas režģi. Attēls nedaudz izplūdis.

Eksperimentāli sarežģītāka ir stara izvadīšana caur otru difrakcijas režģi. Taču ar mikrorotējamā galdiņa palīdzību uzdevumu staru ievadīt un izvadīt izdevās izpildīt.

Te, jāpiemin procesu raksturojošie parametri. Viļņvada izejā maksimālā jauda atbilstoša šauram, aptuveni pusgrādu platumam leņķiskajam diapazonam bija apmēram 0,02- 0,03% no krītošās jaudas gan sarkanajam, gan IS gaismai. Tas nozīmē nepieciešamību kvantitatīvu mērījumu veikšanai uzlabot parauga ģeometriju, iespējams veidojot pretrefleksijas slāņus, izvēloties avotam atbilstoša jutīguma pakāpes detektorus. Tā piemēram aptuveni 1,1mW 635nm staram viļņvada izejā jau atbilst vairs tikai 0,2 $\mu$ W liels signāls, bet 105mW 808nm staram viļņvada izejā atbilst 33,6 $\mu$ W liels signāls. Līdzīgas kārtas jaudas ir paraugiem, kuros gaismas izvadīšana no viļņvada notiek caur otru ierakstīto difrakcijas režģi (3.13.b. zīm.).

Svarīgākais secinājums ir, ka kopā ar izveidotu matemātisko modeli, veidojas pārliecība, ka sekmīgi varētu tikt ievadīta un izvadīta arī garāku viļņu gaisma. Lai to praktiski pārbaudītu būtu nepieciešami gan gaismas avoti, gan jutīgi detektori un attēlu reģistrēt spējīgas iekārtas.

### 3.3. Metālisku stiklu sastāvu modifikācija.

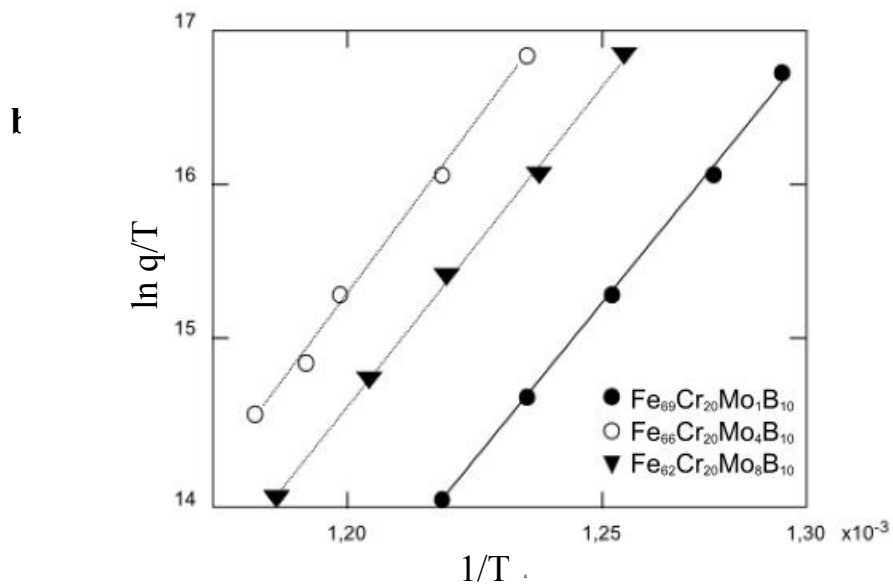
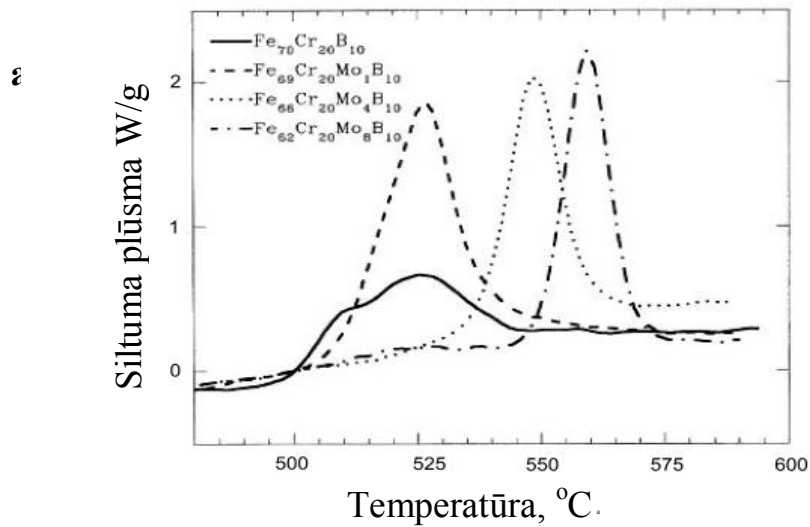
Līdzīgi kā halkogenīds telūrs izkausēti metāliski stikli pāriet stiklveida stāvoklī tikai strauji dzesējot. Papildus plānu kārtiņu veidā izmantotajiem halkogenīdu paraugiem un optiskās izpētes metodēm tika veikta eksperimentu sērija lai noskaidrotu arī citus fāzu pārejas (kristalizācijas) raksturlielumus (tādus kā Vikersa mikrociētība) modificējot stiklu matricas sastāvu. Paraugu izgatavošanas un eksperimentālo apsvērumu dēļ tika izvēlētas metālisko stiklu sistēmas. Tika detalizēti pētīts termiski inducēts fāžu rašanās process amorfā matricā.

Karsējot nekristālisku matricu  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{20}\text{B}_{10}$ , kuru veido strauji dzesējot un saīsināti sauca arī par RCX442, veidojas stabila un metastabila fāze. Piejaukuma materiālu (Mo, Nb vai V) pievienotā apjoma izmaiņa matricai nozīmīgi maina kristalizācijas tendenci, fāžu sastāvu, un mehāniskās īpašības (Vikersa mikrociētību).

Fāžu pārejas temperatūras un mehānisko īpašību maiņa ļauj secināt, ka nepieciešamības gadījumā, šādu matricas īpašību modifikāciju un termiskās iedarbības atkarības pētījumi varētu izrādīties lietderīgi arī halkogenīdu stiklos.

Augsta mehāniska izturība ir raksturīga metālisku stiklu īpašība. Vienlaicīgi šie materiāli ir plastiski. Tie ir arī ķīmiski noturīgi, jo ķīmiski procesi aktīvāk norit uz robežvirsmām, dislokācijām un citiem defektiem, kuru nav stiklveida materiālos.

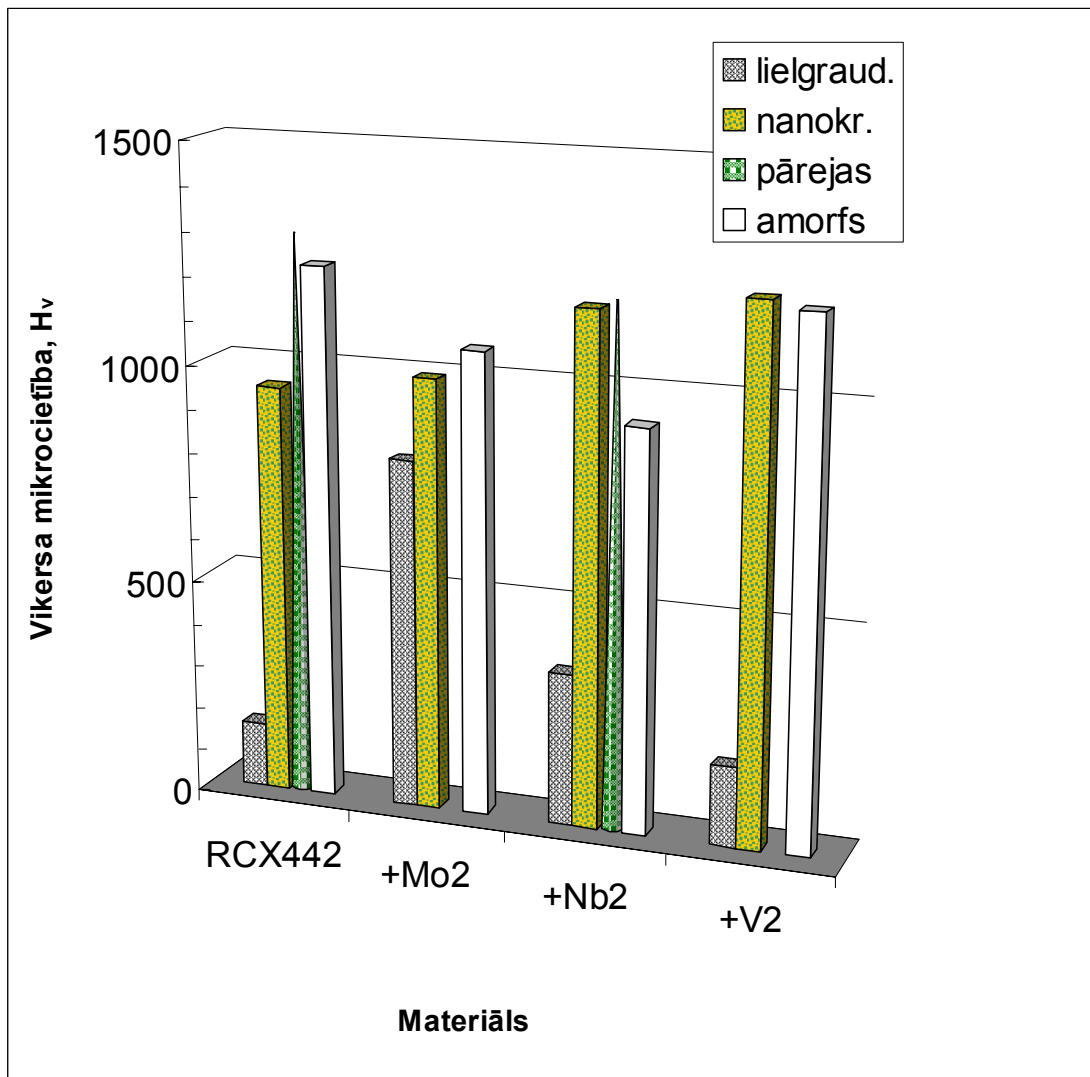
Rezultāti tika publicēti [68] un daļēji attēloti 3.14. zīm. un 3.15. zīm. Svarīgākie secinājumi ir, ka no trim piejaukuma materiāliem Nb visvairāk veicina amorfizācijas tendenci. Mo piejaukums izraisa augstāko kristalizācijas temperatūru. Vikersa mikrociētība,  $H_v$  ir visaugstākā struktūrām ar nanometru izmēru kristāliem. Mikrociētība samazinās palielinoties kristāliu izmēriem. Lieliem kristāliu izmēriem augstākā  $H_v$  ir izmantojot molibdēnu kā piejaukuma materiālu, turklāt kristalizējot matricā molibdēna piejaukumu vismazāk mainās Vikersa mikrociētība.



3.14. zīm. Karsējot nekristālisku matricu  $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{20}\text{B}_{10}$  veidojas stabilas un metastabīlas fāzes. Izmanojot skanējošo diferenciālkālorimetriju (DSC).

(a) izmērija fāzu pāreju temperatūru, siltuma plūsmu, un

(b) aprēķināja aktivācijas enerģijas 400– 650°C diapazonā. Temperatūrās augstākās par 700 °C tika izmantota termiskā diferenciālanalīze (DTA).



3.15. zīm. Metālisku stiklu matricas Vikersa mikrociētības atkarība no termiskās vēstures un piemaisījumiem. RCX442 ir nekristāliska matrica  $Fe_{70}Cr_{20}B_{10}$ .

### 3.4. Darba turpmākās attīstības virzieni.

#### 3.4.1. Optiskos balinātājus saturoša ūdens šķīduma salīdzinoša indikācija

Lai veidotu iemaņas darbam ar šķidrums sensoriem tika izvirzīts mērķis izveidot optisko indikātor metodi antropogēnās (uz cilvēku darbību attiecināmas) slodzes noteikšanai ūdens vidē. Par modeli optiska ķīmisko vielu sensoru sistēmas izveidei tika izveidota metode optisko balinātāju koncentrācijas ūdens šķīdumā noteikšanai ūdens antropogēnā piesārņojuma salīdzinošai indikācijai.

Mērījumu objektus sagatavoja, progresīvi samazinot koncentrāciju (atšķaidot) veļas mazgāšanas līdzekļa (turpmāk- VML) koncentrāciju destilēta ūdens šķīdumā. Visi šķīdumi tika filtrēti ar papīra filtru. VML (*Procter & Gamble, Ariel Automat Mountain Spring, 600g*, pirkti Latvijā) satur optiskos balinātājus un par to liecina informācija uz iesaiņojuma. Mērījumiem tika sagatavotas astoņas koncentrācijas (izsakot svara miljonajās daļās)- 55, 110, 220, 440, 880, 1750, 3500, 7000.

Optiskie balinātāji ir vielas, kuras nelielā daudzumā tiek pievienotas daudzos VML, arī drēbēs un papīrā. Tos izmanto lai patērētājam radītu perfekta baltuma (*perfect whiteness*) sajūtu par viņuprāt tīru drēbi, vai baltu papīru. Šīs vielas absorbē spektra ultravioletajā, cilvēka acij neredzamajā daļā un luminiscējot „atdod” gaismu spektra zilajā, redzamajā daļā. Vielām ir dažāds ķīmiskais sastāvs. To sastāvā bieži ir vairāki benzola gredzeni. Atsevišķos ekotoksicitātes zinātniskos pētījumos tiek apšaubīta šo vielu neitrāla ietekme uz floru un faunu [69].

Lai realizētu metodi optisko balinātāju koncentrācijas ūdens šķīdumā noteikšanai tika veikti absorbcijas mērījumi sekojot standarta procedūrai. Vispirms tika uzņemts tukšas UV-klases kvarca ķīvetes spektrs. Tad izlejot veco un ielejot jauno tika uzņemti pārējie spektri, palielinot koncentrāciju. Tika izmantots *UV-VIS Ocean Optics HR4000* augstas izšķirtspējas spektrometrs. Tika veikta fona atņemšana



un normalizācija (pret destilētā ūdens ķiveti). Izmantotās ķivetes bija četrstūra formā. Parauga luminiscence tika ierosināta ar *Kimmon He-Cd UV 325nm* lāzera viļņa garumu pa četrstūra ķivetes vienu sānu malu.

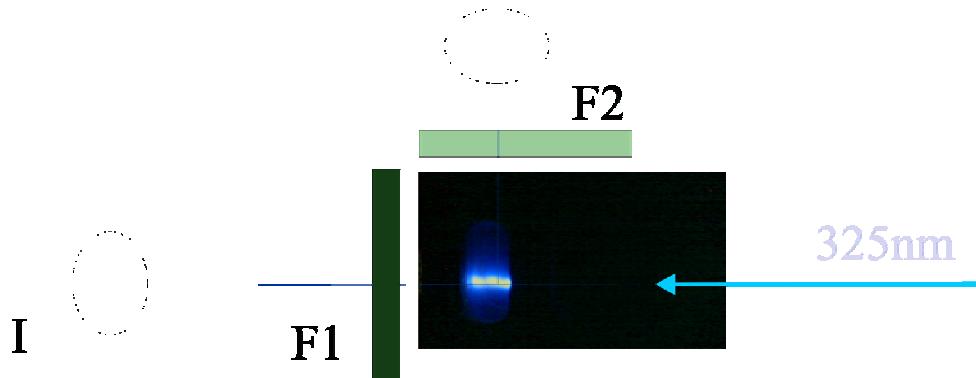
Eksperimentā luminiscence un caurizgājušās gaismas intensitātes tika vienlaicīgi reģistrētas ar *Nova II Ophir* jaudas mērītāju un fotoelektronu pavairotāju. Filtrācijai, lai atdalītu UV un VIS spektrālās komponentes, tika izmantoti krāsu optiskie filtri (*FOCT 9411-60*). Gaišs, optiski caurlaidīgs filtrs virs 340nm, *BC7* un tumšs, optiski caurlaidīgs filtrs zem 420nm, sk. 3.16. zīm. 325nm lāzera stars krīt uz paraugu kvarca ķivetē. UV gaisma tiek absorbēta paraugā un tas emitē zilu redzamo gaismu. Šī īpašība ļauj vienlaicīgi mērīt intensitāti un luminescenci atšķirīgās spektra daļās. Ar optisko krāsu stikla filtru palīdzību tiek atdalīti UV un redzamais spektra apgabali, un interesējošajos apgabalos uzņemti luminescences un transmisijas spektri.

Šāda shēma ļauj eksperimentāli ērtā un efektīvā veidā salīdzināt optiskos iznākumus. Tāpēc tika piedāvāts [70] izmantot šo metodi praksē lai operatīvi salīdzinātu antropogēnās slodzes ūdens baseinos un indicētu problēmas.

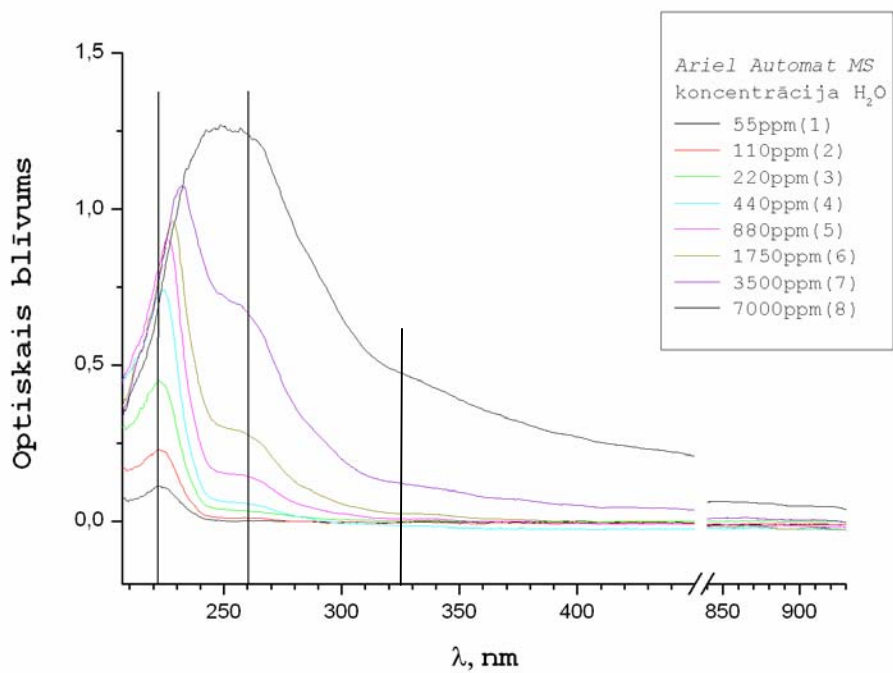
Metode var tikt izmantota kā kopējā antropogēnā piesārņojuma aizstājējindikators dažādās ūdens tilpnēs, jo pieļauj ērtu kartēšanu. Autora rīcībā nav informācija par agrāku līdzīgu, optisku metodi, kura sniedz kvantitatīvu lineāru iznākumu vairākās VML atšķaidījuma kārtās. Šāds lineārs iznākums ir ērts praktiskam darbam. VML reģionālajos tirgos dominē neliels skaits ražotāju ar tipveida produkciju. Vairums šo VML satur optiskos balinātājus. Šo vielu īpašības var ērti izmantot kā avotu marķierus un ar to palīdzību noteikt piesārņojuma avotu kā antropogēnas izcelsmes.

3.17. zīm. rāda parauga optisko blīvumu (normalizētu absorbciju) spektrus. Optiskais blīvums ir proporcionāls caurstarotā slāņa biezumam. Redzams, ka

## Fotoelektronu pavairotājs



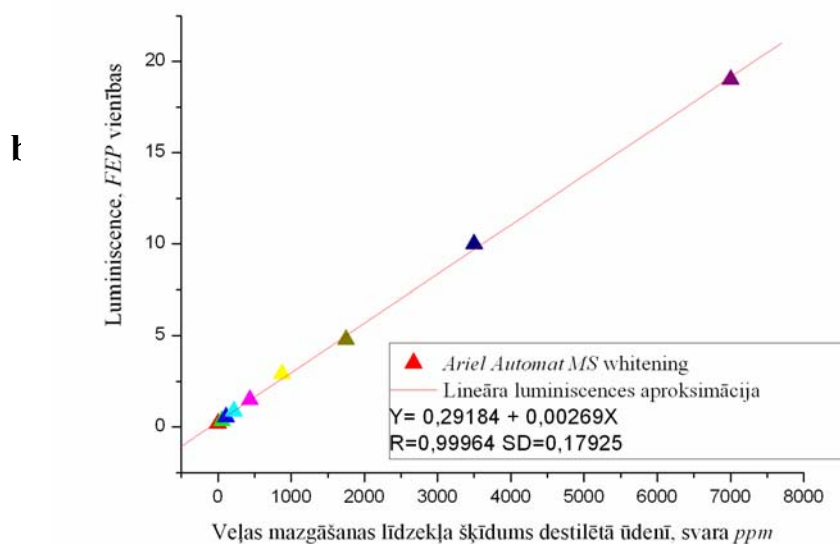
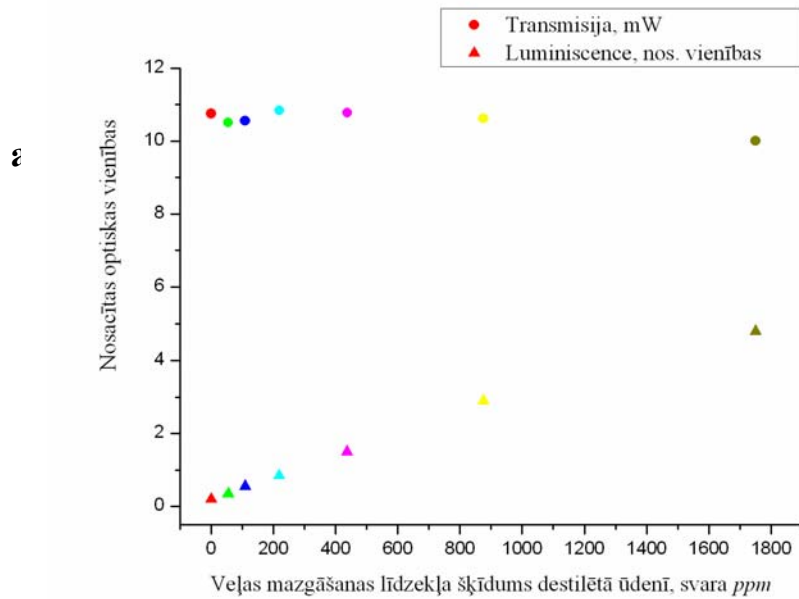
3.16. zīm. Eksperimentālā shēma optiska metodei optisko balinātāju koncentrācijas ūdens šķīdumā noteikšanai. Luminiscence tika ierosināta ar *Kimmon He-Cd UV 325nm* lāzera viļņa garumu pa četrstūra ķivetes vienu sānu malu. Luminiscence un caurizgājušās gaismas intensitātes tika vienlaicīgi reģistrētas ar *Nova II Ophir* jaudas mērītāju un fotoelektronu pavairotāju. Filtrācijai, lai atdalītu UV un VIS spektrālās komponentes, tika izmantoti krāsu optiskie filtri (*FOCT 9411-60*). F1- tumšs, optiski caurlaidīgs filtrs zem 420nm, F2- gaišs, optiski caurlaidīgs filtrs virs 340nm, *BC7*.



3.17. zīm. Optiskā blīvuma atkarība dažādām VML koncentrācijām destilētā ūdenī. Paraugi bija caur papīru filtrēti šķīdumi ievietoti kvarca ķīvetēs. Vēlākiem luminescences mērījumiem tiks izmantota He-Cd lāzera 325nm ierosinājuma līnija.

paraugiem ar VML, kuru sastāvā ir optiskie balinātāji (turpmāk, OB) piemīt skaidri izteikts absorbcijas maksimums. To var izskaidrot ar labi zināmajām OB īpašībām. Gan absorbcijas maksimuma vieta, gan forma mainās mainoties koncentrācijai. Absorbcija ir skaidri izteikta jau pie zemām koncentrācijām – 55ppm. Tas norāda, ka metodes jūtīguma sliekšnis nav sliktāks par desmit miljono optiskā balinātāja svara daļu ūdenī. Tāpēc ticami, ka metode ir vēl par vairākām kārtām jūtīgāka. To būtu iespējams pārbaudīt lietojot gaismas avotu UV 220- 230nm diapazonā. Salīdzinājumam jānorāda, ka VML koncentrācija, kura atbilst tai, kuru ražotājs rekomendē lai mazgātu veļu ar rokām atrodas starp 7 un 8 līkni.

Absorbcijas maksimumi atrodas starp 230- 250nm. UV un VIS spektrālās apgabala metodes labi *redz* valentajiem elektroniem raksturīgās pārejas. Absorbcijas maksimuma novirzīšanos var skaidrot ar īpašību maiņu mainoties parauga sastāvam [8]. Mainoties koncentrācijai iespējams salīdzināt vairākus ar absorbciju saistītus efektus- spektrālo nobīdi, absorbcijas līnijas platuma maiņu. Praktiskai, „aklai testēšanai” un vienkāršai un kvantitatīvai analīzei absorbcijas dati nav ērti piemēroti. Otrs šīs grupas eksperiments ar šiem paraugiem veica luminescences mērījumus izmantojot laboratorijas rīcībā esošo avotu- He-Cd lāzeru, kurš izstaro UV diapazonā, 325nm. 3.18. zīm. rāda transmisijas un luminescences atkarību no koncentrācijas. Transmisijas jauda bija vairākus milivatus liela un tika mērīta ar jaudas mērītāju. Vienlaikus tika mērīta luminescence. Tika izmantots fotoelektronu pavairotājs un iznākums norādīts patvaļīgās salīdzināmās vienībās. Indikatīvi par jaudu diapazonu var spriest pēc tā, ka 19 FEP vienības, ierosinot ar 325nm, atbilst aptuveni 2,5mW. Transmisijas grafiks norāda, ka ar esošo eksperimentālo iekārtu mainoties VML koncentrācijai nav iespējams novērot sistemātiskas transmisijas stara jaudas izmaiņas. Viens no izskaidrojumiem varētu būt tas, ka transmisijas izmaiņas ir nelielas.



3.18. zīm. Transmisijas un luminescences spektru atkarība no pētījumu objektu koncentrācijas (a).

b- Eksperimentāla luminescences optiskā iznākuma lineāra aproksimācija VML paraugiem ar par vairākām kārtām atšķirīgu šķīduma destilētā ūdenī koncentrāciju. 3.16. zīm. raksturotie gaismas filtri ietekmē mērījumu rezultātus. Transmisijas filtrs ir optiski caurlaidīgs gaismai zem 420nm un luminescences filtrs ir optiski caurlaidīgs virs 340nm. Detektoros nonākusi jauda netiek citādi izšķirta, jo mērķis ir indikatīva optiska metode, pieņemot, ka tīram ūdenim 325nm lāzera ietekmē nevajadzētu luminescēt, bet šāda uzvedība norāda uz nepieciešamību veikt papildus analītiskus mērījumus.

Nepieciešamība pirms katra mērījuma ieliet paraugu un pēc mērījuma to izliet, un, tāpat, izkustināt ķiveti var ierobežot transmisijas spektra piemērotību pētītā koncentrāciju diapazona analīzei. Sistēmu var uzlabot izveidojot eksperimentālu iekārtu, kurā nav jākustina ķivete, piem., viļņvada vai kapilāra formā. Vēlams būtu viļņa garuma izvēle tuvāk absorbcijas maksimumam.

Luminescences mērījums esošajā eksperimentālajā sistēmā VML koncentrāciju diapazonā no 55- 7000ppm (svara miljonās daļas) sniedz lineāru optisko iznākumu, sk. 3.18.b. zīm. Grafiku var aproksimēt ar lineāru luminescences optiskā iznākuma atkarību. Paraugi tika ierosināti ar 325nm, kas atrodas sāpus no maksimālās absorbcijas zonas. Var pieņemt, ka metodes jūtīgumu iespējams uzlabot par vairākām kārtām. Iekārta, kura spēj detektēt atšķirīgu balinātāju koncentrāciju būtu ideāli piemērota antropogēno slodžu indikācijai.

#### 3.4.2. Amorfo halkogenīdu viļņvadu pilnveidošana.

Ķīmisko vielu sensoru izveidei ļoti svarīgi ir zināt nosakāmās vielas optiskās aktivitātes apgabalus- proti, to optiskā spektra apgabalus, kuros ir novērojama absorbcija, kuros luminescence, u.tml, vai tie ir praktiski eksperimentāli pieejami atmosfērā esošā oglekļa dioksīda un ūdens dēļ, vai, piemēram, skābekļa dēļ. Amorfie halkogenīdu stikli pieļauj strādāt ar viļņu garumiem līdz 18 $\mu$ m. Sistēma jāpapildina ar atbilstošo gaismas avotu un detektoru, kā arī stara vizualizācijas un aprīkojumu.

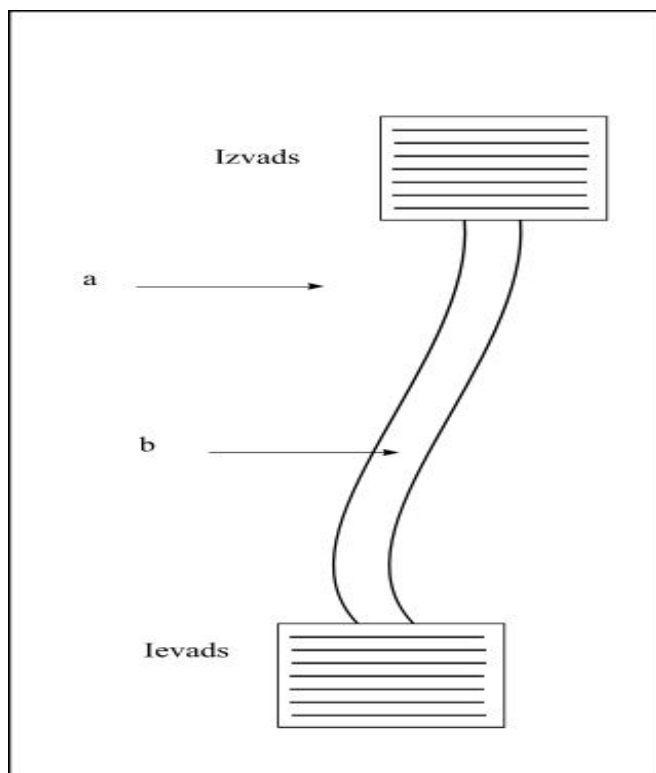
Svarīga ir parauga ģeometrijas salāgošana ar darba viļņa garumu izmantojot izveidoto matemātisko modeli. Jāpanāk lai mazāk gaismas atstarotos un vairāk nonāktu kārtiņā, piemēram, uz parauga uzklājot vai uzputinot vakuumā plānu kārtiņu, kuras biezums ir tāds, ka gaisma ar noteiktu viļņu garumu neatstarojas un samazinās atstarošanās noteiktam viļņu garumam (dzidrināta optika- [27]).

Eksperimentāli pārbaudāms būtu pieņēmums vai sistēmu lietderīgi papildināt modulējot krītošo gaismu ar elektronisko slēdzi (*chopper*) un detektējot ar atmiņas ierīci (*lock-in amplifier*). Ieejas režģi varētu apstarot ar saejošu baltas gaismas kūli un izejā šis kūlis jau būtu ar atbilstošajām absorbcijas joslām. Katra spektrālā komponente būs savā izejas leņķī. Spektrālo komponentu leņķa reģistrēšana iespējams būtu iegūstama skanējot ar detektoru perpendikulāri izejas kūlim. Tā varētu mērīt ieejošās un izejošās stara intensitātes attiecības atkarību no robežvides koncentrācijas. Lai palielinātu darba temperatūru iespējama sastāva modificēšana.

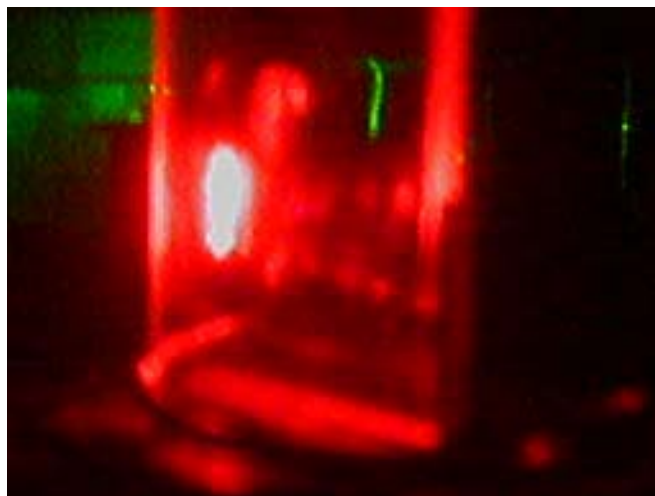
Eksperimentāli jāpārbauda t.s. slīpos režģus (*chirped gratings*). Uz ievada režģi tiek laists paralēls kūlis un dažādas spektrālās komponentes tiek atdalītas filmas plaknē. Ja nosakāmajām molekulām ir raksturīgas Ramana joslas, tad principā varētu eksperimentāli pārbaudīt vai ielaižot lāzera staru būtu iespējams detektēt Ramana izkliedes gaismu, kas izplatās izotropi visos virzienos. Galvenā priekšrocība ir, ka būtu iespējams lietot parastus, jutīgus un salīdzinoši lētus komerciālus silīcija CCD detektorus, nevis dārgus un mazjūtīgus infrasarkanos detektorus.

Tiek pētīta iespēja uz halkogenīdu kārtiņu bāzes veidot optiskas mikroshēmas un veidot slēdzus. Eksperimentā ieraksta ievada-izvada režģus dažādos parauga galos un izveido liektu planāro viļņvadu, piemēram, ar argona lāzeru un paraugam cieši pieguļošu masku. Palielinot laušanas koeficientu apstarotajā daļā, ieraksta rajons var kalpot kā savdabīgs viļņvads. Kritisks ir „ceļa” izmērs un tas, ka pēc izliekuma pārvarēšanas stars var nebūt paralēls ierakstītajam ceļam un tāpēc netiek efektīvi izvadīts ārā. Tāpēc svarīgi novērtēt, cik lielā mērā iespējams trajektoriju izliekt filmas plaknē, ja zināma ierakstītā un neierakstītā filmas laušanas koeficienta starpība. Kad tas izdarīts un kritiskais leņķis gan aprēķināts, gan eksperimentāli pārbaudīts, tad daļu no šī viļņvada var censties dzēst un iespējams atjaunot, sk. 3.19. zīm.

ε



ι



3.19. zīm. Liekta viļņvada izveide halkogenīdu plānās kārtiņās.

a- shematisks attēls; (a) normāls laušanas koeficients (b) palielināts  $n$ ,

b- viļņvada ierakstīšanas rezultātā veidotais ceļš  $\text{As}_2\text{S}_3$  plānā kārtiņā uz stikla.



## AIZSTĀVĀMĀS TĒZES

1. Sistēmas  $Sb_xSe_{1-x}$  sastāviem ( $x=0,40; 0,50; 0,75$ ) fotoinducēto fāžu pārejas (amorfš↔kristāliskš) ir reversīvas; pārejām ir termiskā daba. Kārtnas - pamatnes siltumvadāmība ietekmē gan amorfizāciju, gan fotokristalizāciju. Izveidotā oriģinālā divu impulsu metode tika pirmo reizi izmantota par 50ns ilgāku fāžu pāreju mērīšanai halkogenīdu stiklos.

2.  $As_2S_3$  plānu kārtnu sistēmā iespējams veikt redzamās un infrasarkanās gaismas ievadīšanu un izvadīšanu caur materiālā ierakstītiem difrakcijas režģiem. Izveidotā planārā viļņvada ierīce demonstrē darbības principu difraktīvu optisku elementu veidošanai darbam spektrālajā diapazonā līdz 16μm. Izveidotais matemātiskais modelis sekmē difrakcijas eksperimentu veikšanu.

3. Neliels piejaukumu daudzums metāliskos stiklos spēj nozīmīgi mainīt nekristāliskas matricas kristalizāciju, termiski veidojošos fāžu sastāvu, un mikrocietību. Nekristāliskā matricā piemaisījumi ietekmē matricas mehāniskās un termiskās īpašības, tāpēc piejaukumu ietekmes pētījumi ir jāveic ar nelielu sastāva izmaiņas soli.

## SECINĀJUMI

### REZULTĀTU KOPSAVILKUMS

Trijiem  $Sb_xSe_{1-x}$  sastāviem ( $x=0,40; 0,50; 0,75$ ) pirmoreiz izmērīti fotoinducēto fāžu pāreju ilgumi. Eksperimentāli pierādīta fotoinducēto fāžu pāreju ( $a \leftrightarrow c$ ) reversivitāte. Konstatēts, ka kristalizācijas laiki mainās mainoties sastāvam. Novērtēta kārtiņas siltumvadības ietekme uz fotokristalizācijas procesu. Rezultāti liecina par fotoinducēto fāžu pāreju procesa termisko raksturu. Izveidotā eksperimentālā metode ir labi piemērota fāžu pāreju kinētikas mērījumiem.

Veikts difrakcijas režģu ieraksts ( $\Lambda$  no 435nm līdz 8 $\mu$ m). Tas ir pietiekoši darbam, lai būtu iespējams strādāt ar krītošo  $\lambda \leq 16\mu$ m infrasarkanā gaismu. Veikts 635nm un 808nm staru ievads  $As_2S_3$  plānā kārtiņā. Difrakcijas efektivitāte palielinās palielinoties viļņu garumam.

Pētīts lāzeru staru ievads un izvads šajos paraugos gan caur parauga skaldni, gan caur citu difrakcijas režģi.  $As_2S_3$  plānas kārtiņas planārā viļņvadā iespējams ierakstīt difrakcijas režģus, tādējādi integrējot vienā ierīcē gaismas ievada mezglu, planāro viļņvadu un izvada mezglu.

Termiskie un mehāniskie eksperimentāli pētījumi strauji dzesētai  $Fe_{70}Cr_{20}B_{10}$  matricai ar pievienotu (Nb, V, Mo) vispārīgākā gadījumā papildina zināšanas par kristāliskas fāzes veidošanos nekristāliskā matricā un radušos fāžu mehānisko īpašību izpēti legēšanas ietekmes noskaidrošanai. Legēšana ietekmē matricas kristalizācijas tendenci, fāžu sastāvu un matricas fizikālās īpašības.

## PRAKTISKĀ NOZĪMĪBA

Iegūtie rezultāti praksē var tikt izmantoti:

1. Halkogenīdu optiskās ieraksta vides pilnveidošanā, piemēram, veidojot planāros viļņvadus un optiskos slēdžus.
2. Ķīmisko vielu šķidrumu sensoru izveidē darbam spektra infrasarkanajā diapazonā. Darbā demonstrēts, ka diskrēto modu ierosināšanās priekšnoteikums ir sistēmas ģeometrijas, difrakcijas režģa perioda salāgošana ar izvēlēto starojuma avota viļņa garumu.

## **NOBEIGUMS (perspektīva)**

1. Darba rezultāti aktualizē jautājumu par viļņvadu, optisko slēdžu un optiskā ieraksta vides fototermisku veidošanu halkogenīdu plānās kārtiņās. Pēc viļņvadu veidošanas un sistēmas ģeometrisku parametru optimizācijas ir iespējama sensoru veidošana darbam ar šķīdumiem, kuri absorbē spektra infrasarkanajā daļā līdz 16 $\mu$ m. Vairāku videi un iedzīvotāju veselībai aktuālu indikatorvielu spektri ir optiski aktīvi šajā spektrālajā diapazonā.

2. Perspektīvā, pamatojoties uz darba rezultātiem fototermiskajam ierakstam halkogenīdu plānās kārtiņās, iespējams paplašināt nosakāmo analītu klāstu. Perspektīvākie analīti ir tie, kuriem piemīt Ramana joslas. Tādējādi rastos iespēja infrasarkanā detektoru vietā izmantot lētus lādiņsaistes detektorus.

## IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Горюнова Н.А, Коломиец Б.Т., (1956). Изв. АН СССР. Сер.физ., 20, с.1496-1500.
- [2] N.F.Mott, E.A.Davis, *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials 2nd ed.*, Oxford University Press, Oxford, 1979. Izdots krieviski: Мотт Н., Дэвис Э. *Электронные процессы в некристаллических веществах.*- М., Мир, 1982 - 386с.
- [3] J.C. Philips, (1979). J. Non-Crystalline Solids, v34, N2, pp153-181.
- [4] *Semiconducting Chalcogenide Glass I.* Edited by R.Fairman, B.Ushkov., Elsevier-Academic Press, 2004. ISBN 0-12-752187-9.
- [5] K.Shimakawa, (2007). J. of Optoelectronics and Advanced Materials, v9, N10, pp2973-2978.
- [6] *Optical Chemical Sensors.* Edited by F.Baldini, A.N. Chester, J.Homola and S.Martellucci. NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry – v224, Springer, 2006.
- [7] M.J.Kang *et al.* (2007). *Microsyst.Technol.* v13, pp153-160.
- [8] A.R.West. *Solid State Chemistry and its Applications.* John Wiley and Sons Ltd., 1984. Izdots tulkojumā krieviski: А.Вест. *Химия твердого тела.* М., Мир, 1988.
- [9] I. Banik. (2007), *J.Non-Cryst.Solids*, v353, pp1920-1924.
- [10] G.Moffatt. *The handbook of binary phase diagrams.*- New York, 1984, v4, p583.
- [11] К.К. Шварц. *Физика оптической записи в диэлектриках и полупроводниках.* – Рига, 1986, с.232.
- [12] Д.М. Чижиков, В.П. Счастливый. *Селен и селениды.* – М., 1964, с.320.
- [13] Я.Г. Клява. *Структура аморфных твёрдых тел.* – Рига, 1988, с.56.
- [14] A.Elshafie *et al.* (1988). *J. Appl.Phys.* v64, N1, pp103-108.

- [15] Захаров В.П., Герасименко В.С. *Структурные особенности полупроводников в аморфном состоянии*. – Киев, 1976, с.280.
- [16] Гербредер В.И., Пирогов Ф.В., Тетерис Я.А. (1985). Термо- и фотоиндуцированные изменения оптических свойств халькогенидов сурьмы. Тез. доклада Всесоюзной конф. „Стеклообразные полупроводники”, с.282-283. Ленинград, 1985.
- [17] K.K.Shvarts, P.J.Stradins (1991), *Radiation Effects and Defects in Solids*, v119 (P2), p.881.
- [18] R.Barton *et al.* (1986), *Appl.Phys.Lett.*, v48, N3, pp1255-1257.
- [19] Фельц А. *Аморфные и стеклообразные неорганические твёрдые тела*. – М., 1986, с. 556.
- [20] Y.Sugiyama *et al.* (1990), *J.Non.Cryst.Sol.*, v122, N1, pp83-89.
- [21] A.Jung *et al.* (1989), *Japanese J. of Applied Physics*, v28, suppl.28-3, pp281-283.
- [22] P.Stradins, K.Shvarts, I.Teteris. (1989), *J.Non.Cryst.Sol.*, v114, N6, pp79-81.
- [23] Гулбис А., Гербредер В.И., (1987). *Latv.PSR ZA Vēstis, f.t.z.sēr.*, N1, с. 88-90.
- [24] M.Frumar *et al.* (2001). *J. Of Optoelectronics and Advanced Materials*, v3, N2, pp177-188.
- [25] Tanaka, K., Toyosawa, N. and Hisakuni, H. (1995), *Optics Letters*, v20, N19, pp1976-1978.
- [26] Ho, N. *et al.* (2006), *Optics Letters*, v31, Issue 12, pp1860-1862.
- [27] O. Students. *Optika*. Izdevniecība „Zvaigzne” Rīgā 1971, 413.lpp.
- [28] *Optik und Atomphysik* von Robert Wichard Pohl, Springer-Verlag, Berlin-Gottingen-Heidelberg, 1963. Izdots tulkojumā krieviski: Р.В.Поль. *Оптика и атомная физика*. – М., 1966.
- [29] J.C.Philips, M.F.Thorpe. (1985), *Sol.State Comm.*, v53, N8, pp699-702.

- [30] H.S.Carslaw, J.C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed. Oxford University Press, 1959.
- [31] Г.Р. Левинсон, В.И. Смилга. (1976), Квант. электрон., N4, с.1637-1658.
- [32] Рыкалин Н.М. *Тепловые основы сварки*. – М., 1947, с.272.
- [33] Y.Maeda *et al.* (1989), Jap.J.Appl.Phys., v28, suppl.28-3, pp147-151.
- [34] N.Koshino *et al.* (1988), Fujitsu Sci.Tech.J., v24, N1, pp60-69.
- [35] K.A.Rubin, M.Chen. (1989), Thin Solid Films, v181, pp129-139.
- [36] M.Wuttig and N.Yamada. (2007), Nature Materials, v6, November, pp824-832.
- [37] D.Gravensteijn *et al.* (1989), Philips Tech.Rev., v44, N8-10, pp250-258.
- [38] М. Фольмер. *Кинетика образования новой фазы*. – М.,1986, с.206.
- [39] I. Newton, *Optics*, 2nd (English) Edition, 1717, book III, part I.
- [40] F. de Fornel. *Evanescent Waves*, Springer, Berlīne, Vācija. 2001, p270. ISBN 3-540-65845-9.
- [41] J.Spīgulis. *Optiskās šķiedras*. Izdevniecība LVU Rīgā 1987, 63.lpp.
- [42] <http://users.ece.gatech.edu/sungwon/f11.htm>
- Autors: Sungwon Kim, Georgia Institute of Technology, Atlanta, ASV.
- [43] <http://www.andrew.cmu.edu/user/dcprieve/Evanescent%20waves.htm>
- Autors: Carnegie Mellon Computing Services UserWeb, ASV.
- [44] R.E.Kunz, K.Cottier. (2006), Anal Bioanal Chem, v384, pp180-190.
- [45] D. Savastru *et al.* (2006), J.Optoelectronics Adv.Mater. v8, N3, pp1165-1172.
- [46] N. Masuda *et al.* (2003), Thin Solid Films 438-439 pp403-406.
- [47] Z. Qi *et al.* (2003), Applied Optics v42, N22 pp4522-4528.
- [48] <http://www.neo.no/>
- Autors: Norsk Elektro Optikk AS (NEO), Lorenskoga, Norvēģija.

- [49] *Прикладная инфракрасная спектроскопия*. Под. ред. Д.Кенделла. М., Мир, 1970.
- [50] J.M.Chalmers, G.Dent. *Industrial analysis with vibrational spectroscopy*. The Royal Society of Chemistry, Кембриджа, Лielbritānija. 1997, p380. ISBN 0-85404-565-1.
- [51] *Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics*. Editor: A. Krier. Optical Sciences, Springer, Vācija, 2006, ISBN-10: 1-84628-208-X.
- [52] Antle Honne, H.Odegard, H. Schumann-Olsen. Multi-component trace gas monitoring. In- Northern Optics 2006, Bergen 2006, Bergena, Norvēģija.
- [53] *Kaspar Cottier* PhD promocijas darbs, *Neuchatel* Universitāte, Mikrotehnikas institūts, Noišatelē 2004.
- [54] K.Cottier *et al.* (2003), *Sensors and Actuators B* 91, pp241-251.
- [55] S.Ramachandran and S.G.Bishop. (1999). *Applied Phys. Lett.*, v74, N1, pp13-15.
- [56] Y.Zhao. (2000), *Applied Optics*, v39, N6, pp997-1007.
- [57] G.Whitenett *et al.* (2003), *J. of Optics A: Pure Appl.Opt.*, N5, ppS140-S145.
- [58] Z. Qi *et al.* (2001), *Chemistry Letters of the Chemical Soc. of Japan*, pp662-663.
- [59] Sanghera J. *et al.* (1996), US patent US5525800, Selective multi-chemical fiber optic sensor.
- [60] G.J. Qureshi *et al.* (2003), *Optical Engineering*, v42, N6, pp1754-1757.
- [61] G.J.Veldhuis and P.V.Lambeck. (1997), *Appl.Phys.Lett*, v71, N20, pp2895-2897.
- [62] R.Horwath, L.R.Lindvold, N.B.Larsen. (2002), *Appl. Phys. B* 74, pp383-393.
- [63] J. Zubia. G.Garitaonaindia, J.Arrue. (2000), *Applied Optics*, v39 N6, pp941-946.
- [64] N.C.Anheier *et al.* (2005). FY 2005 Infrared Photonics Final Report.
- [65] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. – т.5, Электричество и магнетизм, М., 1977, с.300.



[66] Stradins, P., Balters, O., Gerbreder, V. (1994), Proceedings Materials Research Society 1993 Fall Meeting, MRS v321, pp1-6. Crystallization and Related Phenomena in Amorphous Materials- Ceramics, Metals, Polymers, and Semiconductors, Boston. (ASV). Editors: M. Libera, T.E. Haynes, P. Cebe, J.E. Dickinson, Jr. Published by Materials Research Society. ISBN: 1-55899-220-0.

[67] Ю.Ф. Комник. *Физика металлических плёнок*. М., 1979, с.264.

[68] Chang, I., Balters, O., Cantor B. (1995). Int.J.Rapid.Solid., v9, pp63-73.

[69] Health assessment of specific stilbene derivatives used as textile auxiliaries or in detergents (October 2001). Internets. Autors: Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin, BgVV

[70] Balters, O., Teteris, J. (2006), Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, v14, N3, pp121-127.

## PATEICĪBA

Promocijas darba vadītājam Dr. Jānim Teterim par vērtīgajām diskusijām un praktisku palīdzību. Dr. Mārai Reinfeldei un diplomdarba vadītājam Dr. P.Stradiņam, kā arī visiem LU CFI Optiskā ieraksta laboratorijas, kā arī bijušās LZA FI Jonu kristālu radiācijas fizikas laboratorijas līdzstrādniekiem un tehniskajiem darbiniekiem, un ģimenes atbalstam par promocijas darba uzdevumu izpildes dažādu un daudzveidīgu sekmēšanu.

Darbs ar metāliskajiem stikliem tika veikts Oksfordas Universitātes Materiālu zinātnes departamentā. To nozīmīgi veicināja Dr.*B.Cantor* un Dr.*I.Chang*. Maģistra darbs- masīva alumīnija deformācijas kvantificēšanas pētījums ar SEM sniegtām eksperimentālo metožu iespējām, tika veikts Mičigānas Pavalsts Universitātes Materiālu zinātnes un mehānikas departamentā, ar Dr.*M.Crimp* atbalstu.

Daļa ilustrāciju tapušas ar Ērika Eglīša, Agra Bombizas un Sintijas Graudiņas-Bombizas palīdzību. Par ļoti svarīgu atbalstu promocijas darba praktiskai sagatavošanai autors vēlas pateikties ESF projektam doktorantu atbalstam, un LU FMF.



## PIELIKUMS. AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

Pētījuma rezultāti publicēti sekojošos recenzētos rakstos (*peer-reviewed, copyrighted*):

1. Balcers, O., Teteris, J. (2007). “*The development of As-S film waveguides for infrared sensor applications*”. Extended paper for Reports from 10th Lithuanian Conference of Junior Researchers March 29, 2007 “Science- Future of Lithuania”, pp 375-381, Vilniaus Gedimino technikos universitetas leidykla “Technika”; ISBN 978-9955-28-162-7.
2. Balcers, O., Teteris, J. (2006), “*Luminescence study of detergent optical brighteners in the context of developing optical environmental sensors for water quality control*”. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, Vol.14, N3, pp.121-127. ISBN 1648-6897.
3. Balcers, O., Teteris, J., (2006), “*Optical method for determining optical brightener concentration in water solution*”. Extended paper for the Proceedings from the conference “Northern Optics 2006”, Trans-Jour. Editors: Aasmund Sudbų and Gunnar Arisholm, June 2006, pp 59-61; ISBN: 14244-0435-5.
4. Chang, I, Balcers, O., Cantor, B., (1995). “*The Effect of added Mo on the Crystallisation Behaviour of Rapidly Solidified Fe<sub>70</sub>Cr<sub>20</sub>B<sub>10</sub> Alloys.*”. International J. Rapid Solidification., Vol.9, pp.63-73.

5. Stradins, P., Baltcers, O., Gerbreder, V., (1994). "*Photoinduced Amorphous↔Crystalline Transitions in Sb<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> Films*". Proceedings Materials Research Society 1993 Fall Meeting, MRS Vol.321, pp.1-6. Crystallization and Related Phenomena in Amorphous Materials- Ceramics, Metals, Polymers, and Semiconductors, Boston. (ASV). Editors: M. Libera, T.E. Haynes, P. Cebe, J.E. Dickinson, Jr. Published by Materials Research Society. ISBN: 1-55899-220-0.
  
6. Baltcers, O., Stradins, P., Gerbreder, V., (1992). "*Photoinduced amorphous↔crystalline phase-change transition kinetics in thin Sb<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> (x=0.40, 0.50, 0.75) films*". Latvian J. Phys. Techn. Sci., 2, pp.11-16.

Darba saturs referēts konferencēs un tēzēs:

1. Baltcers, O., Reinfelds, M., Teteris, J. "*The waveguiding properties of As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films for infrared optical sensor applications*" 3.starptautiskajā amorfu un nanostrukturētu halkogenīdu konferencē Brasov, Rumānijā, 2007.g. 2.-6.jūlijā.
  
2. Baltcers, O. "*Towards development of As-S films for infrared optical sensor applications*" „*Epidemiology of toxic metals- problems and solutions*" konferencē Portorož, Slovēnijā 2007.gada 25.aprīlī.
  
3. Baltcers, O., Teteris, J. "*The development of As-S film waveguides for infrared sensor application*" 10. jauno zinātnieku konferencē Viļņas Gedimina Tehniskajā Universitātē, Lietuvā 2007.g. 29.martā. Referāts tika apbalvots.

4. Balcers, O., Teteris, J. "*Planārie gaismas vadi uz nekristālisku  $As_2S_3$  kārtiņu bāzes*". LU CFI 23.zinātniskās konferences referātu tēzes, Rīgā, 2007.g. 13.-15.februārī.
5. Balcers, O., Teteris, J. "*Optical method for determining optical brightener concentration in water solutions*" "Northern Optics 2006" konferencē Bergenā, Norvēģijā, 2006.g. 14.-16.jūnijā.
6. Balcers, O. "*Luminescence study of detergent optical brighteners in the context of developing optical environmental sensors for water quality control*". SPIE starptautiskā studentu konference „*Developments in Optics and Communications*” (DOC-2006), Rīgā, 2006.g. 29.-30.aprīlī.
7. Balcers, O., Teteris, J. "*Luminescence method for range of water optical brightener concentrations to serve as an anthropogenic load indicator in water bodies*" 9. jauno zinātnieku konferencē Vilņas Gedimina Tehniskajā Universitātē, Lietuvā, 2006.g. 30.martā.
8. Balcers, O., Reinfelds M., Teteris J. "*Holographic recording in As-Se thin films*". 21.starptautiskā amorfo un nanokristālisko pusvadītāju konference (ICANS21), Lisabonā, Portugālē, 2005.g. septembrī.
9. Balcers, O., Teteris, J. (2005). "*Optiskie ķīmisko vielu sensori*". LU CFI 21.zinātniskās konferences referātu tēzes, 53.lpp, Rīgā, 2005.g. 7.-9.februārī.

10. Balcers, O., Teteris, J. (2004). “*Optiskie ķīmisko vielu sensoru uz amorfo halkogenīdu bāzes*”. LU CFI 20.zinātniskās konferences referātu tēzes, 101.lpp., Rīgā, 2004.g. 16.-18.februārī.
11. Chang I.T.H, Balcers, O., Cantor B., (1994). “The effect of adding Mo on crystallization behaviour of rapidly solidified Fe<sub>70</sub>Cr<sub>20</sub>B<sub>10</sub> alloys”. Proceedings Materials Research Society 1993 Fall Meeting, MRS Vol. 321, p.429. Crystallization and Related Phenomena in Amorphous Materials- Ceramics, Metals, Polymers, and Semiconductors, Boston. (ASV). Editors: M. Libera, T.E. Haynes, P. Cebe, J.E. Dickinson, Jr. Published by Materials Research Society. ISBN: 1-55899-220-0.
12. Balcers, O., Stradins, P. (1991). “Crystallization and amorphisation kinetics of thin Sb<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> films”. Proceedings the 2nd USSR Conference on Physics of Glassy Solids, Rīga, p.66.

Doktorants:

---

Ojārs Balcers

Darba vadītājs:

---

Jānis Teteris