

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Սարգսյան Մաքսիմ Լիպարիտի

**ԻՋՈՏՐՈՊ ԵՎ ԱՆԻՋՈՏՐՈՊ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐՈՒՄ ՁԵՎԱՎՈՐՎԱԾ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ**

Ա.04.21 «Լազերային ֆիզիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության սեղմագիր

Երևան – 2023

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Саргсян Максим Липаритович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУР,
СФОРМИРОВАННЫХ В ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.21 – “Лазерная физика”

ЕРЕВАН – 2023

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝ Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր,
պրոֆեսոր **Ռ.Ս. Հակոբյան**

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդ., Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր,
պրոֆեսոր **Ա.Հ. Մելիքյան**
Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր,
պրոֆեսոր **Է.Պ. Կոկանյան**

Առաջատար կազմակերպություն՝ **Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան**

Պաշտպանությունը կայանալու է 2023 թ. նոյեմբերի 25-ին ժամը 12:00-ին Երևանի պետական համալսարանում գործող Ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցե՝ 0025 Երևան, Ալեք Մանուկյան 1):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2023 թ. հոկտեմբերի 25-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար՝



Ֆ.-մ.գ.թ., դոցենտ
Վ.Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель: д.ф.м.н., профессор
Р.С. Акопян

Официальные оппоненты: Чл.-корр. НАН РА, д.ф.м.н.,
профессор **А. О. Меликян**
д.ф.м.н., профессор **Э. П. Коканян**

Ведущая организация: **Национальный политехнический университет
Армении**

Защита диссертации состоится 25 ноября 2023 г. в 12:00, на заседании специализированного совета 049 по физике Ереванского государственного университета по адресу: 0025, Ереван, ул. А. Манукяна 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.
Автореферат разослан 25 октября 2023 г.

Ученый секретарь
специализированного совета:



к. ф.м.н., доцент
В.П. Калантарян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐ

Աշխատանքի արդիականությունը

Ժամանակակից ֆոտոնիկայի բնագավառում իրականացվող հետազոտությունների հիմնական շարժառիթներից է մի շարք կիրառություններում էլեկտրոնիկայի՝ ֆոտոնիկայով փոխարինման հեռանկարը: Գործնական կիրառությունների տեսանկյունից, սակայն, ֆոտոնիկայի վրա հիմնված համակարգերը դեռևս ունեն մրցակցային թերություններ: Հիմնական խնդիրները, որոնք շարունակում են սահմանափակել արդյունաբերական լայն կիրառությունները, պայմանավորված են նրանով, որ նշված համակարգերում լուսային փնջերի բնութագրերի արդյունավետ ղեկավարման գործիքները քիչ են: Այս գործիքների աշխատանքի հիմքում սովորաբար ընկած է լույսի ամպլիտուդի, փուլի և բևեռացման կառավարումը: Փուլի միջոցով լուսային փնջերի ղեկավարման ավանդական մեթոդները հիմնված են օպտիկական ճանապարհների երկարությունների փոփոխման միջոցով փուլի կառավարման վրա: Իզոտրոպ միջավայրերում այիքային ճակատի կառավարման նշված եղանակը հաճախ իրականացվում է հետևյալ մոտեցումների կիրառմամբ՝ 1) նյութի հաստության՝ տրված պրոֆիլով տեղային փոփոխմամբ; 2) միջավայրի ծավալում բեկման ցուցիչի բաշխվածության (Նախօրոք տրված պրոֆիլով) տեղային փոփոխմամբ:

Առաջին եղանակով փուլային օպտիկական բաղադրիչների պատրաստումը, մասնավորապես, լազերային փնջերի տարածական բաշխվածության ձևավորման նպատակով, կարող է պահանջել մակերևութային բարդ, երբեմն՝ շատ նուրբ կառուցվածքների ստացում: Այսպիսի կառուցվածքները շատ զգայուն են արտաքին (ջերմային, քիմիական, և այլ) ազդեցությունների նկատմամբ, ինչը զգալիորեն սահմանափակում է դրանց կիրառությունների շրջանակը: Երկրորդ մոտեցման կիրառմամբ, մինչդեռ, հնարավոր է տրված փուլային բաշխվածությամբ օպտիկական տարրեր պատրաստել բարձր վնասման շեմ ունեցող թափանցիկ նյութերի ծավալում: Այսպիսի բաղադրիչները կարող են հրատապ և հեռանկարային կիրառություններ ունենալ բարձր հզորային օպտիկայում և կիրառման միջավայրի շատ ավելի խիստ ֆիզիկական պայմաններում: Այս առումով, հատուկ հետաքրքրություն են ներկայացնում սիլիկատային ապակիները (հեղուկ քվարց, բորոսիլիկատային (N-BK7) և այլ)՝ հաշվի առնելով օպտիկական և օպտիկա-մանրաթելային տեխնիկայում այդ նյութերի լայն տարածվածությունը:

Չնայած վերոնշյալ առավելություններին, 3D ծավալային օպտիկական տարրերի պատրաստումը շարունակում է մարտահրավեր մնալ: Դրա հետ մեկտեղ, ինտեգրման բարձր աստիճանի և չափերի փոքրացման նկատմամբ աճող պահանջարկը խթանում է մշակման այնպիսի եղանակների հետազոտումն ու ստեղծումը, որոնք կապահովեն միկրո- և նանո-մասշտաբներում գերբարձր լուծաչափ, նյութերի լայն ընտրություն, կառուցման դիզայնի առումով՝ ճկունություն և տեխնոլոգիական այլ պրոցեսների հետ համատեղելիություն: Միկրոմշակման լազերային ուղղակի գրանցման (LITHO) մեթոդն ունի վերը նշված պահանջները բավարարելու պոտենցիալը, և ներկայումս դրա՝ որպես միկրո- և նանոկառուցման գործիքի կիրառությունների շրջանակը արագ տեմպերով ընդլայնվում է [1, 2]: Սա մեծապես պայմանավորված է նորագույն տեխնոլոգիական մշակումներով, որոնց արդյունքում հասանելի են դար-

ծել բազմաթիվ տեխնոլոգիական պարամետրերի ղեկավարելիությամբ ճկուն, գերա-
րագ լազերային միկրոմշակման համակարգեր:

Այսպիսի համակարգերի կիրառմամբ միկրո- և նանո-մակարդակներում ապակի-
ների մշակման պրոցեսի ղեկավարելիությունը սկզբունքորեն հնարավորություն է
տալիս հաղթահարել պահանջվող հատկություններով ծավալային կառուցվածքների
պատրաստման հետ կապված խոչընդոտներ, որոնք բխում են տվյալ նյութի հետ
լազերի փոխազդեցության առանձնահատկություններից և երբեմն հիմնարար բնույ-
թի են: Դա առաջին հերթին վերաբերում է լազերով մակաձված բեկման ցուցչի փո-
փոխության (ԲՑՓ) արժեքներին, որոնք ապակիների դեպքում շատ փոքր են՝
($\Delta n \approx 10^{-4} \dots 10^{-2}$): Հետևաբար, լույսի փուլի էական փոփոխություններ ստանալու հա-
մար անհրաժեշտ է պատրաստել մեծ տարածական չափերով կառուցվածքներ:
Ծավալային էլեմենտների պատրաստման տեսանկյունից մեթոդի կիրառման համար
սահմանափակումներ են մտցնում նաև մշակող լազերային փնջի (վերափոխված տի-
րույթի) տարածական անհամասեռությունը, ինչպես նաև որոշակի խորության դեպ-
քում սֆերիկ աբերացիաների զգալի ազդեցությունը: Նշված խոչընդոտների հաղթա-
հարումը պահանջում է ԼՈՒԳ առանձնահատուկ մոտեցումներ և տեխնոլոգիական
լուծումներ, ինչը և ատենախոսության առաջին գլխում նկարագրված հետազոտույթ-
յունների առարկան է:

Ի տարբերություն իզոտրոպ միջավայրերի, անիզոտրոպ միջավայրերում ձև-
վորված կառուցվածքները հնարավորություն են տալիս լուսային փնջերը ղեկավարել
երկբեկման և երկրաչափական փուլի մոդուլման եղանակներով: Երկրաչափական
փուլի կառավարման վրա հիմնված օպտիկական տարրերը նոր սերնդի օպտիկա-
կան տարրեր են, որոնց պատրաստման հնարավորությունը ցուցադրվել է հեղուկ
բյուրեղներում [3], թափանցիկ նյութերում՝ ԼՈՒԳ մեթոդի կիրառմամբ (օգտագոր-
ծելով ատենախոսության մեջ նկարագրված երկրորդ տիպի վերափոխությունները)
[1], ինչպես նաև մետամակերևույթների կիրառմամբ [4]: Նշված մեթոդի հիման վրա
աշխատող օպտիկական տարրերը հաճախ անվանում են դիֆրակտային ալիքաթի-
թեղներ (ԴԱ): Հեղուկբյուրեղային էլաստոմերները (ՀԲԷ), շնորհիվ իրենց հատկույթ-
յունների (արտաքին դաշտերով ղեկավարելի օպտիկական անիզոտրոպության,
ուղղորդի բաշխման ծրագրավորման հնարավորության), հետաքրքրական միջավայ-
րեր են ղեկավարելի բնութագրերով ԴԱ-ներ պատրաստելու համար: Դրանք հնարա-
վորություն են տալիս ստանալ լրացուցիչ եղանակներով ղեկավարելի (օրինակ՝
մեխանիկական եղանակով, ջերմաստիճանը փոփոխելով) ալիքաթիթեղներ:

Կարևոր է նշել, որ ԼՈՒԳ մեթոդի կիրառմամբ պատրաստված լուսային փնջերի
ղեկավարման տարրերը և ՀԲԷ-ների հիման վրա պատրաստվող, մեխանիկական
եղանակով կառավարվող օպտիկական տարրերը իրար հետ կապված են: Դրանք
երկուսն էլ, ի վերջո, իրենցից ներկայացնում են դեֆորմացիաների ազդեցություն օպ-
տիկական հատկությունների վրա: Մասնավորապես, մի կողմից ունենք ապակիների
ծավալում վերափոխություններ, որոնց դեպքում լազերով մակաձված ծավալի տեղա-
յին փոփոխությունները հանգեցնում են պերմանենտ դեֆորմացիաների: Մյուս կող-
մից էլ ՀԲԷ-ների հիման վրա պատրաստվող, մեխանիկական եղանակով կառավար-
վող ալիքաթիթեղների դեպքում ունենք առաձգական դեֆորմացիաների ազդեցույթ-

յուն օպտիկական հատկությունների վրա: Նմանատիպ (հատկապես մեխանիկական լարումներով ղեկավարելի) ալիքաթիթեղների պատրաստումը շարունակում է մարտահրավեր հանդիսանալ: Ի հայտ եկած հիմնական դժվարությունները հետևյալն են. 1) օպտիկական տարրեր պատրաստելու համար անհրաժեշտ հատկություններով էլաստոմերների սինթեզը դեռևս արդիական է և լրացուցիչ հետազոտությունների կարիք ունի; 2) ՀԲԷ-ների կառուցվածք-հատկություններ կապը դեռևս ամբողջովին պարզաբանված չէ: Մյուս կողմից, ՀԲԷ-ների 3D տպագրության տեխնոլոգիաների վերջին զարգացումներն այս նյութերի հիման վրա բարդ կառուցվածք ունեցող օպտիկական տարրեր պատրաստելու հնարավորություն են տալիս: Ուստի, ՀԲԷ-ների հիման վրա մեխանիկական եղանակով կառավարվող օպտիկական սարքերի նախագծման և պատրաստման տեսանկյունից չափազանց կարևոր է դառնում նշված նյութերի ամբողջական մեխանիկական բնութագրման իրականացումը: Տվյալ ատենախոսության երկրորդ գլուխն անդրադառնում է նշված հարցին:

Հետաքրքրական միջավայրեր են նաև անիզոտրոպ մեխանիկական և օպտիկական հատկություններով թափանցիկ փայտերը (ԹՓ): Այս նյութերը թափանցիկ փայտ-պոլիմեր կոմպոզիտներ են, որոնց օպտիկական կիրառությունների պոտենցիալը ցուցադրվել է մի շարք աշխատանքներում [5]: ԹՓ-երը համեմատաբար նոր միջավայրեր են, ուստի դրանց օպտիկական և մեխանիկական հատկությունները դեռևս մանրամասն ուսումնասիրված և նկարագրված չեն: Երրորդ գլխի առաջին մասում, օգտագործելով լայնական իզոտրոպության ենթադրությունը, տեսականորեն նկարագրվել են ԹՓ-ի անիզոտրոպ մեխանիկական հատկությունները:

Կարևոր նշանակություն ունի դիտարկված միջավայրերի օպտիկական հատկությունների որոշումը: ԼՈՒԳ մեթոդի կիրառմամբ պատրաստված մակրոսկոպական կառուցվածքների օպտիկական բնութագրումը քննարկվել է տվյալ ատենախոսության առաջին գլխում: Ատենախոսության մեջ դիտարկված անիզոտրոպ միջավայրերի օպտիկական բնութագրումը Ջոնսի մատրիցական մեթոդի կիրառմամբ քննարկված է երրորդ գլխի երկրորդ մասում:

Ատենախոսության նպատակն է՝

- ❖ Բորոսիլիկատային ապակու ծավալում գերկարճ լազերային իմպուլսներով մակաձված վերափոխությունների հետազոտումն ու կիրառումը բեկման ցուցչի համասեռ փոփոխությամբ հոծ մակրոսկոպիկ փուլային կառուցվածքների ստացման նպատակով:
- ❖ Տեսական և փորձարարական եղանակներով մոնոդոմեն նեմատիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերների անիզոտրոպ առաձգական հատկությունների ամբողջական բնութագրումը:

Գիտական նորույթը

Ատենախոսության շրջանակներում իրականացված աշխատանքի գիտական նորույթը ներկայացվում է առաջին անգամ կատարված տեսական և փորձարարական աշխատանքների հետևյալ շարքով՝

1. Փորձարարական եղանակով ցույց է տրվել, որ ռեժիմների ճշգրիտ ընտրությամբ N-BK7 ապակու ծավալում հնարավոր է իրականացնել բեկման ցուցչի հոծ և համասեռ ձևափոխմամբ եռաչափ միկրոկառուցվածքավորում: Հայտնաբերվել

են շերտ-առ-շերտ լազերային գրանցման եղանակով N-BK7 ապակու ծավալում մեծ չափսերով ծավալային փուլային կառուցվածքների պատրաստման օպտիմալ տեխնոլոգիական ռեժիմներ:

2. Ցույց է տրվել, որ գերկարճ-իմպուլսային լազերի ճշգրիտ սկանավորմամբ ապակու ծավալում մակրոսկոպիկ հոծ փուլային կառուցվածքների in situ պատրաստման հնարավորությունը կարող է կիրառվել որպես մակաձված բեկման ցուցչի փոփոխության արժեքի և նշանի գնահատման արագ ու պարզ մեթոդ:
3. Տեսականորեն ցույց է տրվել, որ նեմատիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերների առաձգական հատկությունները նկարագրվում են հինգ հաստատուններ պարունակող առաձգական ազատ էներգիայի խտության միջոցով: Առաջարկվել են ձգման պարզ փորձեր նեմատիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերները բնութագրող նշված հինգ գործակիցները որոշելու համար:
4. Առաջարկվող տեսական մոդելի կիրառմամբ ազդեցվածով ֆունկցիոնալացված նեմատիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերների և ակրիլատային հիմքով օքսետիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերների համար առաջին անգամ որոշվել են առաձգականության բոլոր հինգ գործակիցները:
5. Տեսականորեն ուսումնասիրվել են անիզոտրոպ թափանցիկ փայտի մեխանիկական հատկությունները: Բայսայի հիման վրա պատրաստված թափանցիկ փայտի նմուշի համար գնահատվել են առաձգական ազատ էներգիայի խտության արտահայտության մեջ մտնող գործակիցներ:
6. Տեսականորեն ցույց է տրվել, որ նեմատիկ հեղուկ բյուրեղներում տարածականորեն անհամասեռ էլեկտրական դաշտի կիրառմամբ առաջացած ծավալի տեղային նվազումը կարող է հանգեցնել նյութի հոսքի:

Կիրառական նշանակությունը

Ատենախոսության առաջին մասում հայտնաբերված և հետազոտված միկրոմշակման տեխնոլոգիական ռեժիմները կարող են անմիջականորեն կիրառվել բորոսիլիկատային ապակու ծավալում լազերային փնջերի ուղղորդման, տարածական պրոֆիլի փոխակերպման համար նախատեսված սարքեր (տիպ I և տիպ II ալիքատարներ, ֆոկուսատորներ, փնջի ձևավորիչներ, դիֆրակտային ցանցեր) պատրաստելու համար: Ապակու ծավալում մեծ չափսերով հոծ փուլային կառուցվածքների ստացումը հնարավորություն է տալիս կիրառել (տվյալ տեխնոլոգիական ռեժիմում) մակաձված ԲՅՓ նշանի և արժեքի գնահատման պարզ մեթոդ: Երկրորդ մասում ստացված արդյունքները կարող են օգտակար լինել անիզոտրոպ էլաստոմերների հիման վրա մեխանիկական եղանակով կառավարվող ալիքաթիթեղներ նախագծելու և պատրաստելու համար: Երկրորդ մասում ներառված արդյունքները կարող են նաև օգտակար լինել այդ միջավայրերի ֆիզիկական մոդելավորման և դրանց հիմքով այլ կիրառությունների համար նախատեսված մեխանիկական եղանակով ղեկավարելի սարքերի պատրաստման տեսանկյունից:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Սուբ-ալիկովայրկյանային լազերային իմպուլսներով N-BK7 ապակու ծավալում բեկման ցուցչի ձևափոխման մակաձման՝ շեմայինին մոտ ինտենսիվությունների և ցածր (ջերմային կուտակային երևույթները բացառող) հերթագայման հաճախությամբ

յունների կիրառման պայմաններում բեկման ցուցչի փոփոխությունը բացասական նշանի է:

2. Բորոսիլիկատային ապակու ծավալում բեկման ցուցչի համասեռ փոփոխմամբ հոծ փուլային կառուցվածքներ հնարավոր է պատրաստել շերտ-առ-շերտ լազերային ուղղակի գրանցման եղանակով՝ գերկարճ-իմպուլսների էներգիական հոսքի, հերթագայման հաճախության և կիզակետի տեղափոխման կինեմատիկական պարամետրերի ճշգրիտ ղեկավարմամբ: Հայտնաբերվել են ապակու մեջ ներգծված մակրոսկոպական չափսերով և կողմնային չափսերի տրված հարաբերակցությամբ փուլային տարրերի լազերային միկրոկառուցման օպտիմալ ռեժիմներ:
3. Մոնոդոմեն նեմատիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերների գծային առաձգական հատկությունները ամբողջությամբ նկարագրվում են հինգ անկախ հաստատուններ պարունակող առաձգական ազատ էներգիայի խտության միջոցով: Առաջարկվել են յոթ չափումներ նշված հինգ առաձգականության գործակիցները ձգման պարզ փորձերից որոշելու համար:
4. Ակրիլատ-ամին հիմքով մոնոդոմեն նեմատիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերները բնութագրող հինգ առաձգականության գործակիցներից յուրաքանչյուրի արժեքն ընկած է 0.5-200 ՄՊա-ի տիրույթում: Դրանք գործնականում լավ բավարարում են տրանսվերսալ-իզոտրոպ նյութի առաձգական հաստատունների արժեքների համար ձևախախտման ազատ էներգիայի խտության դրական լինելու սկզբունքից բխող տեսական սահմանափակումներին:

Աշխատանքի ներկայացումը

Ատենախոսական աշխատանքի հիմնական արդյունքները գեկուցվել են Ultrafast Beams and Applications-2019, 2022 (Yerevan, Armenia), Optics of Liquid Crystals, OLC-2019, (Quebec, Canada), Laser Physics-2019, 2023 (Yerevan-Ashtarak, Armenia), EuroDisplay 2019 (Minsk, Belarus), Optics & its applications 2019 (Yerevan, Armenia), ինչպես նաև International Liquid Crystal Conference 2022 (Lisbon, Portugal) միջազգային գիտաժողովներում: Արդյունքները նաև քննարկվել են ԵՊՀ օպտիկայի ամբիոնի սեմինարների և ՔԵՆԴԼ ԱՀԻ երիտասարդական աշխատաժողովների ընթացքում:

Հրապարակումները

Ատենախոսության թեմայով հրապարակվել է 13 գիտական աշխատանք՝ 5 գիտական հոդված գրախոսվող պարբերականներում և միջազգային գիտաժողովների 8 թեզիսներ, որոնք բերված են սեղմագրի վերջում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունն ունի հետևյալ կառուցվածքը՝ առաջաբան, հապավումների ցանկ, ներածություն, երեք գլուխներ, եզրակացություն, երախտագիտություն, հավելված, օգտագործված գրականության ցանկ: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 146 էջ է: Այն ներառում է 24 նկար, 7 աղյուսակ և 311 անուն գրականության ցանկ:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

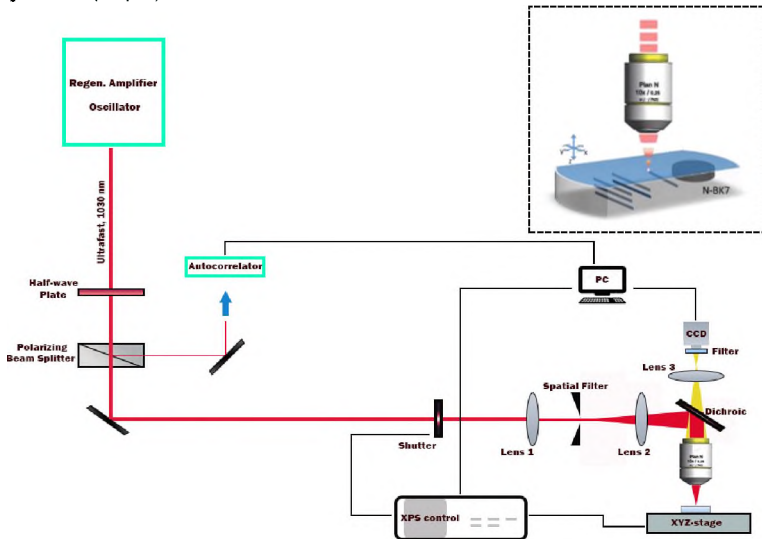
Ներածությունում հիմնավորված է ատենախոսական աշխատանքի արդիականությունը, սահմանված են աշխատանքի հիմնական նպատակներն ու խնդիրները, ներկայացված են արդյունքների կիրառական նշանակությունը, գիտական նորույթը,

պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները, ատենախոսության թեմայի շրջանակներում տպագրված աշխատանքների ցանկը:

Ատենախոսության **առաջին գլխում** ներկայացված են լազերային ուղղակի գրանցման մեթոդով բորոսիլիկատային (BK7) ապակիների ծավալում միկրոկառուցվածքների պատրաստման և հետազոտման, փուլային օպտիկական տարրերի ստացման նպատակով դրանց կիրառման ուղղությամբ աշխատանքները:

1.1 պարագրաֆը ներածությունն է, որտեղ բերված է համառոտ ակնարկ լազերային ուղղակի գրանցման մեթոդով թափանցիկ նյութերի միկրոմշակման արդի կիրառությունների և տեխնոլոգիական հնարավորությունների վերաբերյալ: **1.2 պարագրաֆում** նկարագրված են լազերային ուղղակի գրանցման մեթոդով սիլիկատային ապակիների միկրոմշակման առանձնահատկությունները՝ տարբեր օպտիկական տարրերի և սարքերի պատրաստման նպատակով դրանց կիրառման տեսանկյունից: Քննարկված է գերարագ պրոցեսների, տեխնոլոգիական որոշ պարամետրերի և մշակվող նյութերի ֆիզիկաքիմիական հատկությունների դերն ու ազդեցությունը մակաձված կառուցվածքների վրա:

Փորձերում օգտագործվող ֆեմտոլազերային միկրոմշակման համակարգը նկարագրված է **1.3 պարագրաֆում**: Այն MKS Newport-ի կոմերցիոն սFAB միկրոմշակման կայանի և Amplitude Systèmes-ի ֆեմտոլայրկյանային լազերային համակարգի համադրությունն է (Նկ. 1):



Նկ. 1. Փորձարարական համակարգի սխեմատիկ պատկերը: Ներդիրում ներկայացված է լայնական գրանցման կոնֆիգուրացիայի սխեմատիկ պատկերը:

Կառուցվածքային փոփոխությունները ստացվել են լազերային փունջը ֆոկուսացնելով 4 մմ հաստությամբ N-BK7 ապակու նմուշի ծավալում: Նմուշն ամրացվում է ծրագրային կառավարմամբ բլոկի վերին սեղանիկի վրա: Վերջինս ապահովում է 50 նմ դիրքավորման ճշգրտություն և նմուշների՝ մինչև 5 մմ/վ արագությամբ եռաչափ

շարժում 100x100x4 մմ տիրոյթում: Սեղանիկների հետագիծը և էլեկտրամեխանիկական փականը համաժամ կառավարվում են XPS-100 կոնտրոլլերի միջոցով, ինչը թույլ է տալիս ընտրել շարժման ռեժիմ՝ նմուշի ծավալը և/կամ մակերևոյթը ընտրված հետագծերով ճառագայթահարման ենթարկելու համար: Ֆոկուսացման համար օգտագործվել է $NA=0.25$ թվային ապերտուրայով և 10.6 մմ աշխատանքային հեռավորությամբ օբյեկտիվ: Ընկղմված կառուցվածքների պատրաստումը իրականացվել է լայնական գրանցման ռեժիմում (Նկ. 1), երբ կառուցվածքավորումը ստացվում է նմուշը՝ լազերի տարածմանը ուղղահայաց հարթության մեջ տեղափոխելու միջոցով: Համասեռ միկրոկառուցվածքների պատրաստման համար տեխնոլոգիական ռեժիմների ուսումնասիրությունն իրականացվել է Ազ. 1-ում ներկայացված պարամետրերի շրջանակում: Իմպուլսի էներգիան կառավարվել է հզորության ատենյուրատորի միջոցով, որը բաղկացած է պտտվող կիսալիքային թիթեղից և բարակթաղանթային բևեռացուցից: Իմպուլսի էներգիայի չափումը կատարվել է անմիջապես ֆոկուսացումից առաջ՝ PE10-C մոդելի պիրոէլեկտրական սենսորի օգնությամբ: Գերկարճ իմպուլսների տևողությունը որոշվել է ավտոկորելյացիոն ֆունկցիայի չափման միջոցով: Լազերով մակաձված բծերի վրա իմպուլսի էներգիայի և սկանավորման արագության ազդեցությունը ուսումնասիրվել է հետևյալ եղանակով. նախ BK7 նմուշի հղկված եզրի մոտ (Նկ. 1) գրանցվել են պարզ երկրաչափությամբ մի շարք կառուցվածքներ (գծեր, շրջանագծեր), այնուհետև օգտագործելով բացթողման ռեժիմում աշխատող Olympus BX51 օպտիկական մանրադիտակը՝ ուսումնասիրվել են փոխազդեցության տիրույթի՝ կողային երկրաչափության դեպքում (side view) արված պատկերները:

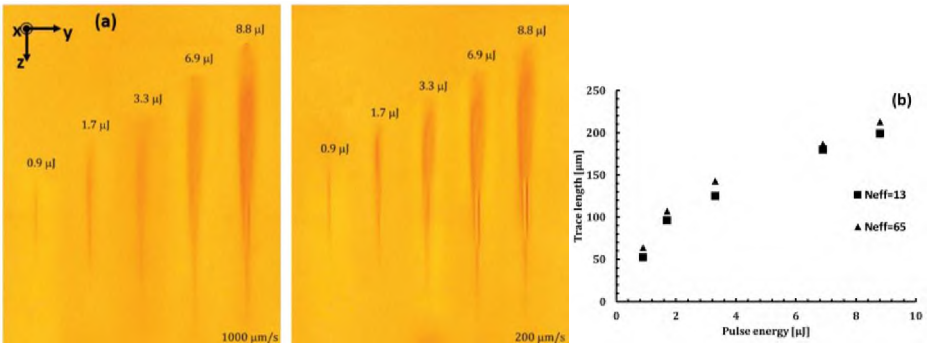
Աղ. 1. Փորձարարական պարամետրեր

Պարամետր	Արժեք
Ալիքի երկարություն	1030 նմ
Իմպուլսի էներգիա	0.8—10 մկՋ
Իմպուլսի տևողություն	500 ֆվ
Լազերի կրկնման հաճախություն	1 կՀց; 5 կՀց
Սկանավորման արագություն	200 մկմ/վ—1000 մկմ/վ
Կիզակետի խորություն (նմուշի մակերևոյթից)	50 մկմ—2000 մկմ
Իմպուլսների էֆեկտիվ քանակ (N_{eff})	3—65

1.4 պարագրաֆում քննարկված են բորոսիլիկատային ապակու ֆեմտոլազերային միկրոմշակման ռեժիմները՝ նկատի ունենալով գործնականում ծավալային կառուցվածքների պատրաստման նպատակով դրանց կիրառումը:

Նկ. 2-ում ներկայացված է մակաձված կառուցվածքների կախվածությունը իմպուլսի էներգիայից միավոր մակերեսի հետ փոխազդող իմպուլսների էֆեկտիվ քանակի ($N_{eff} = 2wR/V$, որտեղ R -ը՝ լազերի կրկնման հաճախությունը, իսկ V -ն՝ սկանավորման արագությունը, իսկ $2w$ -ն ֆոկուսացված փնջի տրամագիծն է) երկու արժեքների համար: $N-BK7$ ապակու ներսում ինքնակիզակետման երևույթների դրսևորման համար կրիտիկական էներգիան՝ E_{cr} , 500 ֆվ տևողությամբ գաուսյան բաշխվածություն ունեցող փնջերի դեպքում 1.8-1.9 մկՋ է: Նկ. 2a-ում պատկերված բծերը համապատասխանում են ինչպես կրիտիկականից վերև, այնպես էլ՝ ներքև ընկած էներգիաների: Պատկերների համեմատությունից երևում է, որ իմպուլսների $N_{eff}=13$ էֆեկտիվ քանակով

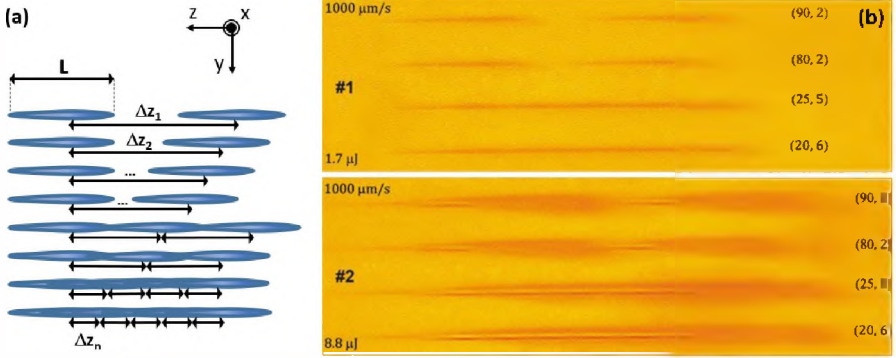
ճառագայթահարման և E_{cr} -ից պակաս իմպուլսի էներգիաների պարագայում, բծերն ունեն ձգված ծայրով էլիպսոիդի ձև և դրանց բնորոշ է գրեթե համասեռ (մանրադիտակի լուծողունակության սահմաններում) վերափոխություն՝ բժի ամբողջ երկարությամբ ԲՅՓ տեսակի (նշանի) պահպանմամբ: E_{cr} -ից բարձր էներգիաների դեպքում նկատվել են կառուցվածքային անկանոնություններ, որոնք հանդիսանում են մակածված բժի ձևի դեֆորմացիաներ և/կամ տարբեր ԲՅՓ նշաններով բնույթագրվող տիրույթներ: Ավելի երկարատև ճառագայթահարման դեպքում ստացվում է համանման կախվածություն էներգիայից ($N_{eff}=65$), այն տարբերությամբ, որ կառուցվածքային շեղումներն սկսում են դիտվել արդեն իմպուլսի՝ կրիտիկական էներգիայից փոքր $\sim 1,7$ մկՋ էներգիաների դեպքում (Նկ. 2a): Կրիտիկական էներգիայի նման էֆեկտիվ «նվազումը» N_{eff} -ի աճին զուգընթաց որակապես բացատրվում է, հաշվի առնելով, որ հաջորդական իմպուլսներով ճառագայթահարվելու դեպքում (քանի դեռ իմպուլսի կրկնման հաճախությունը մեծ չէ) յուրաքանչյուր հաջորդ իմպուլս փոխազդում է նյութի արդեն վերափոխված (դիտարկվող դեպքում՝ նվազեցված) բեկման ցուցցով տիրույթի հետ: Տրված պիկային հզորության դեպքում մակածված ոչ գծայնությունն ավելի մեծ է ավելի նոսր (ավելի փոքր գծային բեկման ցուցցով) միջավայրի համար: Մակածված ոչ գծայնության աճի մեխանիզմը բացատրում է նաև բժի երկարության կախվածությունը N_{eff} -ից, որը ցուցադրված է Նկ. 2b-ում: Մասնավորապես, իմպուլսի փոքր էներգիաների պարագայում մակածված ոչ գծայնության էֆեկտիվ աճը N_{eff} -ի մեծ արժեքների դեպքում հանգեցնում է ֆոկոսի գերձգված հատվածից հետո գտնվող տիրույթի ընդարձակմանը, որտեղ նյութի վերափոխման շեմը հաղթահարվում է շնորհիվ ինտենսիվ բազմաֆոտոնային կլանման:



Նկ. 2. (a) Բժի ձևի կախվածությունը լազերային իմպուլսի էներգիայից 5 կԳ կրկնման հաճախության և սկանավորման 1000 մկմ/վ ($N_{eff}=13$) ու 200 մկմ/վ ($N_{eff}=65$) արագությունների դեպքում: (b) Բժի տեսանելի երկարությունը՝ կախված սկանավորման արագությունից: Երկրաչափական կիզակետը նմուշի մակերևույթից ~ 530 մկմ խորության վրա է: Գրանցումն իրականացվել է նմուշը x առանցքի երկայնքով լազերի z ուղղությամբ ուղղահայաց տեղափոխելով:

Նկ. 3a-ում ցուցադրված զուգահեռ տեղափոխման սխեմայի կիրառմամբ ուսումնասիրվել է լազերային բժի մորֆոլոգիայի կախվածությունը գրանցման խորությունից, ինչպես նաև գտնվել է բծերի օպտիմալ փոխձածկումը երկարաձգված համասեռ կա-

ուցվածքների շերտ առ շերտ պատրաստման համար: Մշակման ֆիքսված պայմաններում կառուցվածքների շարքերը գրանցվել են երկրաչափական կիզակետը լազերի տարածման ուղղության (z) երկայնքով դիսկրետ քայլով (Δz) տեղափոխելու եղանակով: Նկ. 3b-ում պատկերված է իմպուլսի էներգիայի որոշակի արժեքներին համապատասխանող արդյունքները: Ցույց է տրված, որ երկրաչափական կիզակետի տեղափոխման Δz քայլի համապատասխան ընտրությամբ, կրիտիկականից ցածր էներգիաների դեպքում հնարավոր է ստանալ բեկման ցուցի հոծ և համասեռ ձևափոխմամբ երկարաձգված կառուցվածքներ:

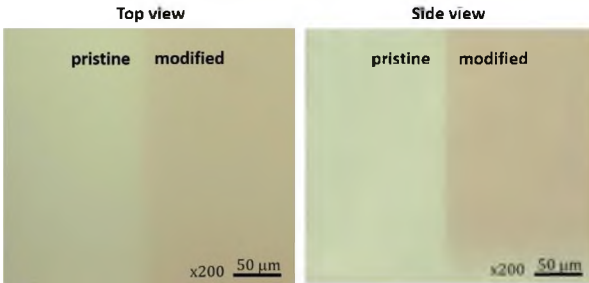


Նկ. 3. (a) Կառուցվածքների շարքերի պատրաստման համար կիրառվող տեղափոխման սխեման: (b) բժերի շարք, ստացված տարբեր խորությունների վրա լազերի 5 կՀց կրկնման հաճախության և գրանցման տարբեր պարամետրերի դեպքում: թվերի (Δz , N) զույգը ցույց է տալիս համապատասխան շարքում զուգահեռ տեղափոխության քայլը (Δz) և անցումների քանակը (N):

Նկ. 3b-ի #2-ից երևում է, որ մեծ պիկային հզորությամբ իմպուլսներով բավական փոքր զուգահեռ տեղափոխության քայլով շերտ առ շերտ գրանցման ժամանակ, բժի «պոչի» լայնացած լայնական կտրվածքով նոսրացած հատվածը «ջնջվում է» և «վերագրանցվում» է հերթագայող իմպուլսների կիզակետային բժի բարձրէներգիական հատվածով՝ բերելով փոփոխական նշանի ԲՅՓ-ով բնութագրվող տիրույթի ձևավորմանը: Նման երևույթի դիտարկումը կրկնման հաճախության ցածր (կուտակային երևույթները բացառող) արժեքի դեպքում, ինչպես նաև BK7-ի ռելաքսացիայի մեխանիզմներում ջերմային ընդարձակման մեխանիզմի սպասելի գերակայության պայմաններում, չի բացատրվում նախկինում [6] ներկայացված մեխանիզմներով, ուստի երևույթը մնում է չպարզաբանված և կարիք ունի հետագա ուսումնասիրությունների:

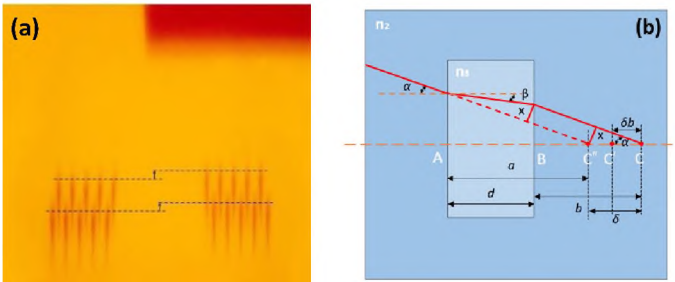
Շառագայթահարման ցածր չափաբաժիններով մշակման ռեժիմների (Նկ. 3b-ի #1-ին համապատասխանող ռեժիմների) օգտագործմամբ բորոսիլիկատային ապակու ծավալում ցուցադրվել է զուգահեռանիստի տեսք ունեցող մեծ չափսերով կառուցվածքի պատրաստումը շերտ-առ-շերտ սկանավորման եղանակով (Նկ. 4): Լայնական ուղղություններով կառուցվածքի հաստության ավելացումը իրականացվել է y առանցքի երկայնքով երկարաձգված համասեռ #1 Նկ. 3b կառուցվածքի գրանցումը կրկնելու եղանակով: Հարակից շերտերի միջև անհրաժեշտ փոխձածկմանը հասնելու համար օգտագործվել է նմուշի գերձգրիտ դիրքավորման առկա փորձարարական հնարավորությունը: Զուգահեռանիստի՝ եզրին մոտ տարածքների ուղղաձիգ և կողա-

յին պատկերները (Նկ. 4) ցույց են տալիս վերափոխված տարածքի բարձր (մանրադիտակի լուծողունակության սահմաններում) համաստեղությունը:



Նկ. 4. 4 մմ հաստությամբ BK7 նմուշի ներսում ներգծված 600x600x1600 մկմ³ ծավալով զուգահեռանիստի եզրին մոտ տիրույթների ուղղաձիգ (ձախից) և կողային (աջից) պատկերները:

1.5 պարագրաֆում ցույց է տրված, որ համասեռ կառուցվածքների պատրաստման հնարավորությունը կարելի է կիրառել որպես լազերային միկրոմշակման տրված տեխնոլոգիական ռեժիմներում բեկման ցուցչի փոփոխության նշանի և արժեքի գնահատման արագ և պարզ մեթոդ: Մեթոդի իրականացման նպատակով, տվյալ ճառագայթահարման պայմաններում, պատրաստված փուլային կառուցվածքից ներքև և դրանից դուրս ընկած հատվածներում՝ միևնույն խորության վրա (գծերի տվյալ շարքի դեպքում դրանցից յուրաքանչյուրի համար վերցվել է z կոորդինատի միևնույն արժեքը) գրանցվել են նույն քանակի պարզ երկրաչափական կառուցվածքներ (Նկ. 5a): Լազերային բծերի շարքերի շեղման վրա գրանցման խորության ազդեցությունը հասկանալու համար գծերի շարքեր են գրանցվել նաև նմուշի ավելի խորը մասում (լազերային բծերի առաջին շարքից $\Delta z = 30$ մկմ խորության վրա և բծերի առաջին շարքից y առանցքի երկայնքով $\Delta y = 10$ մկմ-ով հարաբերականորեն շեղված):



Նկ. 5. (a) N-BK7 նմուշի ծավալում գրանցված բծերի շարքի կողային պատկերը (side-view): Կետագծերի միջոցով ընդգծված է օպտիկական ճանապարհների տարբերության պատճառով առաջացած շեղումը: (b) Լազերային փնջի՝ համասեռ վերափոխված զուգահեռանիստ-կառուցվածքի միջով տարածման սխեմատիկ պատկերումը:

Միևնույն խորության վրա գրանցված լազերային բծերի վերոնշյալ շարքերի միջև դիտարկվող δ հարաբերական շեղումը որոշվում է հետևյալ բանաձևի օգնությամբ (Նկ. 5b)՝

$$\delta = d \left(1 - \frac{n_2}{n_3} \right) + d \frac{n_2 n_3^2 - n_2^3 \alpha^2}{n_3^3 \cdot 2}, \quad (1)$$

որտեղ n_2 -ը ապակու, իսկ n_3 -ը պատրաստված կառուցվածքի բեկման ցուցիչն է, d -ն վերջինիս հաստությունն է, α -ն է կառուցվածքի վրա ճառագայթի անկման անկյունն է: Այստեղ՝ աջ մասի երկրորդ գումարելին երրորդ կարգի սֆերիկ աբերացիան է:

Օպտիկական մանրադիտության եղանակով գնահատելով δ հարաբերական շեղումը և օգտագործելով (1)-ը՝ ցույց է տրվել, որ միկրոշակման տրված տեխնոլոգիական ռեժիմում մակաձված վերափոխությունները հանգեցնում են բեկման ցուցչի բացասական $\Delta n = -9,6 \times 10^{-3}$ փոփոխության:

Գլխում ստացված հիմնական փորձարարական արդյունքները ամփոփված են **1.6 պարագրաֆում**:

Երկրորդ գլուխը նվիրված է նեմատիկ ՀԲԷ-ների անիզոտրոպ առաձգական հատկությունների ուսումնասիրմանը: Գլխի սկզբում՝ **նախաբանում**, քննարկված են ատենախոսության տվյալ գլխում ուշադրության կենտրոնում գտնվող խնդիրները: **2.1 պարագրաֆը** ներածական է, որտեղ ներկայացված են ՀԲԷ-ների առանձնահատկությունները և դրանց հեռանկարային կիրառությունների մի շարք օրինակներ: **2.2 պարագրաֆը** ներառում է հակիրճ ակնարկ ՀԲԷ-ների պատրաստման տեխնոլոգիաների զարգացման պատմության վերաբերյալ: Առանձնացված են ՀԲԷ-ների՝ արտաքին ազդակներով ղեկավարելի օպտիկական ալիքաթիթեղների պատրաստման համար անհրաժեշտ թիրախային բնութագրերը: Համառոտ անդրադարձ է կատարված այդ պահանջները բավարարող ակրիլատ-ամին հիմքով և ակրիլատային հիմքով օքսետիկ ՀԲԷ-ների պատրաստման գործընթացներին: **2.3 պարագրաֆում** նկարագրված են ՀԲԷ-ների մեխանիկական պահվածքի որոշ առանձնահատկություններ: Այստեղ հակիրճ անդրադարձել ենք ՀԲԷ-ների և արտաքին ազդակների փոխազդեցության արդյունքում փորձերում դիտված երևույթները բացատրելու համար առաջ քաշված նոր մոտեցումներին:

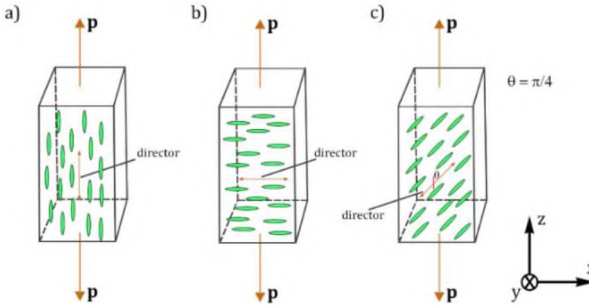
Նեմատիկ ՀԲԷ-ների առաձգական բնութագրման համար կիրառված տեսական մոտեցումը ներկայացված է **2.4 պարագրաֆում**: Մոնոդոմեն նեմատիկ ՀԲԷ-ները նկարագրող ընդհանուր ազատ էներգիայի խտությունը գրվում է հետևյալ տեսքով՝

$$F_{tot} = \lambda_0 (s_{ik})^2 + \frac{1}{2} \lambda_1 (s_{ii})^2 + 2\lambda_2 n_i n_k s_{ip} s_{kp} + \lambda_3 n_i n_k s_{ik} s_{pp} + \frac{1}{2} \lambda_4 n_i n_k n_l n_m s_{ik} s_{lm} + n_m (e_{kpm} \omega_p - a_{km}) \left[\frac{1}{2} D_1 (e_{kqr} \omega_q - a_{kr}) n_r + D_2 n_i s_{ik} \right] + \frac{1}{2} K_1 (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_2 (\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n}))^2 + \frac{1}{2} K_3 (\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n}))^2: \quad (2)$$

Այստեղ s_{ik} -ն ձևախախտման թենզորի սիմետրիկ բաղադրիչն է, \mathbf{n} -ը միավոր վեկտոր է, որին անվանում են ուղղորդ, a_{ik} -ն ձևախախտման թենզորի անտիսիմետրիկ բաղադրիչն է, e_{ijk} -ն անտիսիմետրիկ Լևի-Չիվիտայի թենզորն է, իսկ ω -ն բնութագրում է ուղղորդի պտույտը ($\delta \mathbf{n} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{n}$): λ_i գործակիցները ներառող առաջին հինգ անդամները, որոնք քառակուսային են ըստ ձևախախտման, ներկայացնում են նեմատիկ էլաստոմերի առաձգական էներգիան; K_1, K_2, K_3 գործակիցները ներառող վերջին երեք անդամները ներկայացնում են ուղղորդի ձևախախտումը նկարագրող Ֆրանկի առաձգական էներգիան; D_1 -ը և D_2 -ը նեմատիկ-պոլիմերային ցանց կապը նկարագրող հաստատուններն են, իսկ դրանք պարունակող անդամները բնութագրում են մեխանիկական և կողմնորոշումային ձևախախտումների միջև փոխազդեցությունը:

Լարվածության թենզորի բաղադրիչները ստացվում են՝ դիֆերենցելով ընդհանուր ազատ էներգիայի խտությունը ըստ ձևախախտման թենզորի բաղադրիչների: Առաձ-

գականության հինգ (λ_i) գործակիցները որոշելու, և, հետևաբար, նեմատիկ էլաստոմերների գծային առաձգական հասկությունները ամբողջությամբ բնութագրելու համար՝ դիտարկվել են ձգման երեք պարզ փորձեր, որոնք սխեմատիկորեն պատկերված են Նկ. 6-ում: Դիտարկված փորձերի դեպքում, դուրս են բերվել արտահայտություններ, որոնք կապում են λ_i գործակիցները փորձերում չափվող նորմալ ձևախախտումների հետ:



Նկ. 6. Երեք փորձերի սխեմատիկ պատկերումը: Արտաքին ուժերը ազդում են z առանցքի երկայնքով՝ (a) զուգահեռ նեմատիկ ուղղորդին, (b) ուղղահայաց նեմատիկ ուղղորդին: (c) Ուղղորդ z առանցքի հետ (թեմանան ուղղություն) կազմում է 45° անկյուն:

Հիմնական առաձգական հաստատունների՝ Յունգի մոդուլների և Պուասոնի գործակիցների համար ստացվել են հետևյալ արտահայտությունները՝

$$\begin{cases} E_{\parallel} = A_{\parallel}/(\lambda_0 + \lambda_1) \\ \sigma_{\parallel} = \frac{\lambda_1 + \lambda_3}{2(\lambda_0 + \lambda_1)} \\ E_{\perp} = 4\lambda_0 A_{\parallel}/A_{\perp} \\ \sigma_{\perp x} = 2\lambda_0(\lambda_1 + \lambda_3)/A_{\perp} \\ \sigma_{\perp y} = (2A_{\parallel} - A_{\perp})/A_{\perp} \end{cases}, \quad (3)$$

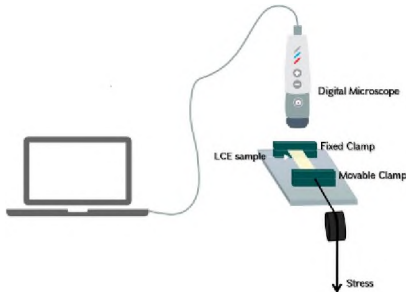
որտեղ $A_{\parallel} = 2\lambda_0^2 + 3\lambda_0\lambda_1 + 4\lambda_0\lambda_2 + 4\lambda_1\lambda_2 + 2\lambda_0\lambda_3 - \lambda_3^2 + \lambda_0\lambda_4 + \lambda_1\lambda_4$, $A_{\perp} = 4\lambda_0^2 + 4\lambda_0\lambda_1 + 8\lambda_0\lambda_2 + 4\lambda_1\lambda_2 + 4\lambda_0\lambda_3 - \lambda_3^2 + 2\lambda_0\lambda_4 + \lambda_1\lambda_4$:

2.5 պարագրաֆում նկարագրված է մոտեցման կիրառումը ակրիլատ-ամին հիմքով main-chain (երբ մեզոգենները ներառված են պոլիմերի հիմնական շղթայի ներսում) և ակրիլատային հիմքով side-chain (երբ մեզոգենները կողքից են կցված հիմնական շղթային) նեմատիկ ՀԲԷ-ների համար: Մասնավորապես, **2.5.1 ենթապարագրաֆում** մոտեցումը կիրառվել է ազոբենզենոլ ֆունկցիոնալացված ակրիլատ-ամին հիմքով նեմատիկ ՀԲԷ-ները բնութագրելու համար: Գործակիցների գնահատման համար անհրաժեշտ փորձարարական տվյալները վերցվել են [7] աշխատանքից: Փոքր ձևախախտումների տիրույթում կատարված փորձերի տվյալների հիման վրա երեք տարբեր նմուշների համար հաշվարկվել են առաձգական ազատ էներգիայի խտության արտահայտության մեջ մտնող առաձգականության հինգ գործակիցները: Աղ. 2-ում ներկայացված են այդ նմուշների կառուցվածքը և գործակիցների համար ստացված արդյունքները:

Աղ. 2. Նեմատիկ ՀԲԷ նմուշների կառուցվածքը և հաշվարկների արդյունքները:

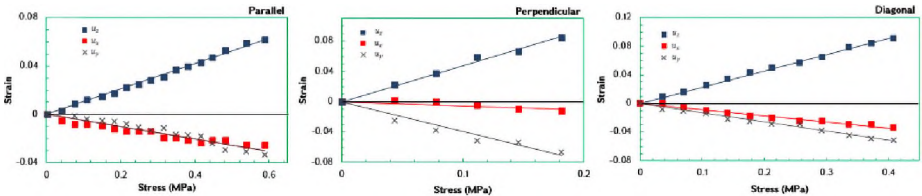
Նմուշ	Մոլային կազմ		Գործակիցներ (ՄՊա)				
	Ակրիլ/Ամին	2Ազո/ընդհանուր ռեակտիվ նյութեր	λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
1	1.1	1	2.51	197.5	0.8	2.51	55.5
2	1.1	2	2	42.6	1.1	1.9	41.4
3	1.1	4	2.2	199.7	0.5	2.3	46.4

2.5.2 Ենթապարագրաֆում ցուցադրված է մոտեցման կիրառումը ակրիլատային հիմքով օքսետիկ ՀԲԷ-ների համար: Նմուշի պատրաստման գործընթացը համապարփակ կերպով ներկայացված է [8] աշխատանքում: Ձգման երեք փորձերն իրականացվել են պարզ փորձարարական համակարգի կիրառմամբ (տե՛ս նկ. 7), որը թույլ է տալիս օպտիկական եղանակով միաժամանակ որոշել երկու փոխադրահայաց ուղղություններով ձևախախտումները, իսկ մյուս ուղղությամբ (նմուշի հաստության երկայնքով) ձևախախտումը որոշվել է՝ կիրառելով ծավալի պահպանման պայմանը: Փորձերի համար օգտագործվել են 1 սմ կողմով, 110 մկմ հաստությամբ քառակուսիաձև նմուշներ: Լարման կիրառումը այս փորձերում իրականացվել է փոփոխական քաշով բեռի օգտագործմամբ: Ձևախախտման չափման համար, յուրաքանչյուր լարման արժեքի դեպքում, լարման կիրառումից 30 վ հետո թվային մանրադիտակի միջոցով ֆիքսվել է նմուշի պատկերը: Բոլոր փորձերն իրականացվել են փոքր ձևախախտումների տիրույթում (չափված ձևախախտումները 0-10% տիրույթում են):



Նկ. 7. Փորձարարական համակարգի սխեմատիկ պատկերը:

Նկ. 8-ում ցուցադրված են այս ՀԲԷ նմուշների համար փորձերից ստացված ձևախախտում-լարում տվյալները:



Նկ. 8. Ձգման երեք փորձերի համար երեք փոխադրահայաց ուղղություններով ձևախախտումների կախումը լարումից:

Ստացված փորձարարական տվյալների օգտագործմամբ հաշվարկվել են առածգական ազատ էներգիայի խտության արտահայտության մեջ մտնող λ_i գործակիցները դիտարկվող նմուշի համար: Այդ գործակիցների համար ստացված արժեքները ներկայացված են Աղ. 3-ում:

Աղ. 3. Գործակիցների արժեքները ակրիլատային հիմքով օքսետիկ ՀԲԷ նմուշի համար:

λ_0 (ՄՊա)	λ_1 (ՄՊա)	λ_2 (ՄՊա)	λ_3 (ՄՊա)	λ_4 (ՄՊա)
0.572	15.042	-0.11	-0.052	8.23

Ցույց է տրվել, որ լայնական իզոտրոպ նյութերի համաչափությունից բխող տեսական սահմանափակումները բավական լավ բավարարվում են փորձարարա-

կան եղանակով չափված առաձգական հաստատունների համար: Աղ. 2-ի և 3-ի համեմատությունից երևում է, որ հինգ գործակիցների արժեքները ավելի մեծ են main-chain ՀՔԷ-ների համար, ինչը պայմանավորված է վերջիններիս դեպքում նեմատիկ-պոլիմերային ցանց ավելի ուժեղ կապով: **2.6 պարագրաֆում** ամփոփված են երկրորդ գլխում ներառված աշխատանքների հիմնական արդյունքները:

Երրորդ գլխի սկզբում բերված է նախաբան, որտեղ համառոտ նկարագրված են գլխում ներառված աշխատանքները և հիմնավորված է դրանց արդիականությունը:

Երրորդ գլխի առաջին մասը՝ **3.1 պարագրաֆը**, նվիրված է ԹՓ-ի անիզոտրոպ մեխանիկական հատկությունների բնութագրմանը: **3.1.1 ենթապարագրաֆը** ներածական է, որտեղ համառոտ անդրադարձ է կատարված ԹՓ-երի պատրաստման տեխնոլոգիաներին և դրանց որոշ կիրառություններին: **3.1.2 ենթապարագրաֆում** նկարագրված է երկրորդ գլխում քննարկված մոտեցման կիրառումը ԹՓ-երի նմուշների համար: Այստեղ ԹՓ-ի մեխանիկական հատկությունները մոդելավորվել են՝ օգտագործելով լայնական իզոտրոպության ենթադրությունը:

Թափանցիկ փայտերը բավական նոր նյութեր են և փորձերի հասանելի տվյալները բավարար չեն առաձգական ազատ էներգիայի արտահայտության մեջ մտնող բոլոր հինգ գործակիցները գնահատելու համար: Որոշ բացակայող տվյալներ հաշվարկվել են միկրոմեխանիկանան մոդելների կիրառմամբ: Մասնավորապես, բալսայի հիման վրա պատրաստված ԹՓ-ի նմուշի համար, օգտագործելով փորձերից ստացված արդյունքները [9] և կիրառելով ֆենոմենոլոգիական (խառնուրդի և հակադարձ խառնուրդի կանոնները) և կիսաէմպիրիկ միկրոմեխանիկական մոդելներ (Չամիսի մոդելը), հաշվարկվել են առաձգականության գործակիցների գնահատման համար անհրաժեշտ Պուասոնի գործակիցները: Դիտարկվող ԹՓ նմուշի հիմնական առաձգական հաստատունների համար փորձերից և միկրոմեխանիկական մոդելների կիրառմամբ ստացված արժեքները ամփոփված են Աղ. 4-ում:

Աղ. 4. Բալսայի հիման վրա պատրաստված ԹՓ-ի հիմնական առաձգական հաստատուններ:

Նյութի անուն	Փայտի տեսակ	Պատրաստման մեթոդ	E_{\parallel} (ԳՊ μ)	E_{\perp} (ԳՊա)	σ_{1y}^m (-)	σ_{1y}^p (-)	σ_1^q (-)
PMMA TW Veneer	Բալսա	NaClO ₂	4.3	2.4	0.343	0.323	0.3464

σ_{1y}^m – հաշվարկված է հակադարձ խառնուրդի կանոնի կիրառմամբ, σ_{1y}^p – հաշվարկված է Չամիսի մոդելի կիրառմամբ, σ_1^q – հաշվարկված է խառնուրդի կանոնի կիրառմամբ:

Աղ. 4-ում ներկայացված տվյալների օգտագործմամբ բալսայի հիման վրա պատրաստված ԹՓ-ի նմուշի համար գնահատվել են առաձգականության λ_0 , λ_1 , λ_3 գործակիցները և $\lambda = 4\lambda_2 + \lambda_4$ -ը: Աղ. 5-ում ներկայացված են վերոնշյալ առաձգականության գործակիցների համար հաշվարկված արժեքները:

Աղ. 5. Գործակիցների արժեքները բալսայի հիման վրա պատրաստված ԹՓ-ի նմուշի համար:

Նմուշ	Կիրառված մոդելներ	Գործակիցներ (ԳՊա)			
		λ_0	λ_1	λ_3	λ
PMMA TW Veneer	Ֆենոմենոլոգիական	0.8935	1.4	0.189	1.836
PMMA TW Veneer	Չամիսի կիսաէմպիրիկ	0.907	1.3	0.228	1.787

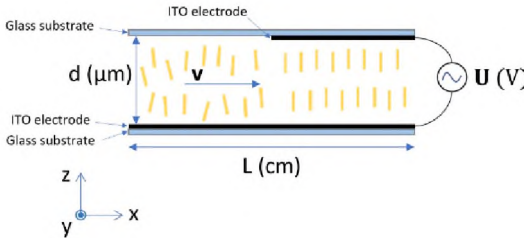
3.1.3 ենթապարագրաֆը ամփոփում է տվյալ գլխի առաջին մասում ստացված արդյունքները:

Երրորդ գլխի երկրորդ մասում **3.2 պարագրաֆում**, քննարկված են հետազոտված անիզոտրոպությամբ մակրոսկոպական միջավայրերի և դրանց հիման վրա պատրաստված տարրերի օպտիկական հատկությունների բնութագրման եղանակներ: Մասնավորապես, **3.2.1 ենթապարագրաֆում** նկարագրված են բևեռացման վիճակի նկարագրության մի շարք գործիքներ՝ Ջոնսի և Մյուլլերի մատրիցական ֆորմալիզմները, Պուանկարեի գնդադրոտը: **3.2.2 ենթապարագրաֆում** պարզ օրինակների դիտարկմամբ քննարկված է լույսի տարածումը համասեռ անիզոտրոպ կառուցվածքներով: Ջոնսի մատրիցական մեթոդի կիրառումը միջավայրի օպտիկական հատկությունների բնութագրման համար ցուցադրված է **3.2.3 ենթապարագրաֆում** մասնավոր օրինակի՝ ռեակտիվ մեզոգեններով ձևավորված աքրոմատիկ ցիկլոիդային դիֆրակտային ալիքաթիթեղի (ՑԴԱ) դիտարկմամբ: Ենթապարագրաֆի սկզբում հակիրճ ներկայացված են հեղուկբյուրեղային դիֆրակտային ալիքաթիթեղների որոշ առանձնահատկություններ: Այնուհետև քննարկված են ՑԴԱ-ների հատկությունները և նկարագրված են ՑԴԱ-ներից պատրաստված բազմաշերտ ծածկույթները:

Հակառակ թվիստի նշանով երկու քիչալ ՑԴԱ-ներից բաղկացած աքրոմատիկ ՑԴԱ-ի Ջոնսի մատրիցը ստացվում է՝ պարզապես բազմապատկելով մաս կազմող թվիստով ՑԴԱ-ների Ջոնսի մատրիցները: Թվիստով ՑԴԱ-ի Ջոնսի մատրիցը որոշվում է՝ այն ներկայացնելով որպես բազմաթիվ բարակ ՑԴԱ-ների շերտերից կազմված համակարգ, ընդ որում յուրաքանչյուր շերտ մյուսի նկատմամբ ունի փոքր ափսոսալիս փոլային շեղում: Արդյունքում, ստացվում են անալիտիկ արտահայտություններ աքրոմատիկ ՑԴԱ-ի դիֆրակտային հատկությունների համար: Թվային գնահատականները ցույց են տալիս, որ թվիստ կողմնորոշված աքրոմատիկ ալիքաթիթեղները առանձին ՑԴԱ-ների համեմատությամբ ունեն բարելավված օպտիկական բնութագրեր (առավելագույն դիֆրակտային գոտու լայնությունը ավելի քան վեց անգամ գերազանցում է առանձին ՑԴԱ-ի դիֆրակտման գոտու լայնությանը): Նման ալիքաթիթեղներին բնութագրական է բարձր դիֆրակտային էֆեկտիվություն տեսանելի ալիքային երկարությունների գրեթե ամբողջ տիրույթում: **3.2.4 ենթապարագրաֆում** ներկայացված է Երրորդ գլխի երկրորդ մասի ամփոփումը:

Հավելված Ա-ում տեսականորեն ուսումնասիրվել է տեղայնացված էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ մակաձված հիդրոդինամիկական երևույթ նեմատիկներում՝ պայմանավորված էֆեկտիվ մոլեկուլային ծավալի կրճատմամբ: **ԱԱ պարագրաֆում** ներկայացված են աշխատանքի շարժառիթները, կարևորությունը և կապը ատենախոսության մեջ ներառված մյուս աշխատանքների հետ: **ԱԲ պարագրաֆը** ներածական է, որտեղ համառոտ անդրադարձ է կատարված նեմատիկներում հիդրոդինամիկական շարժումներ մակաձելու եղանակներին և հոսքի առաջացման մեխանիզմներին: Այնուհետև համառոտ քննարկված է աշխատանքում հետազոտվող մեխանիզմը: Փորձերում դիտարկված հեղուկբյուրեղային բջջի սխեմատիկ պատկերը ներկայացված է Նկ. 9-ում: Բջջը պարունակում է հոմեոտրոպ կողմնորոշում ունեցող նեմատիկ հեղուկ բյուրեղ (ՆՀԲ): Էլեկտրական պոտենցիալը կիրառվում է բջջի աջ մասում: Արդյունքում, այն հատվածում, որտեղ կիրառված է դաշտը, ունենք կողմնորոշման ավելի բարձր աստիճան և, հետևաբար, մոլեկուլների զբաղեցրած էֆեկտիվ ծավալի նվազում: Ծնշման գրադիենտը, որն այս դեպքում առաջանում է տեղային դիէլեկտրի-

կական մոմենտի ազդեցությամբ էֆեկտիվ մոլեկուլային ծավալի նվազման հետևանքով, հանգեցնում է ՆՀԲ-ի հոսքի: Առաջացած տեղային ծավալի փոփոխությունների գնահատումը՝ երկութաբանական մոտեցման կիրառմամբ ներկայացված է **ԱԳ պարագրաֆում**:



Նկ. 9. Դիտարկվող բջջի սխեմատիկ պատկերը: Այստեղ L -ը բջջի երկարությունն է, d -ն երկու տակդիրների միջև հեռավորությունն է:

Տարածականորեն ոչ համասեռ էլեկտրական դաշտի կիրառման հետևանքով առաջացած տեղային ծավալի փոփոխության արագությունը գնահատվել է՝ օգտագործելով [10] աշխատանքում զարգացրած մոտեցումը և ենթադրելով, որ դաշտի (E) չափավոր արժեքների համար կարգավորվածության աստիճանի կախվածությունը էլեկտրական դաշտից գծային է: Ծավալի փոփոխության արագության համար ստացվել է հետևյալը՝

$$\frac{\partial V}{\partial t} \approx \frac{\Delta V}{\tau} = -6V_0 S_0 \left(\frac{R_0}{R_0 + 2} \right)^2 \frac{\alpha E}{\tau}, \quad (4)$$

որտեղ α -ն գծային կախվածության գործակիցն է, V_0 -ն ծավալն է իզոտրոպ փուլում, S_0 -ն կարգավորվածության աստիճանն է դաշտի բացակայության պայմաններում, $R_0/R_0 + 2$ -ը մոլեկուլի երկարության և լայնության հարաբերակցությունն է, իսկ τ -ով նշանակված է ծավալի կրճատման պրոցեսը բնութագրող ժամանակը:

Փորձերում դիտվող հիդրոդինամիկական երևույթները նկարագրելու համար կառուցվել են հետազոտվող համակարգը նկարագրող հավասարումները (Նավիե-Սթոքսի հավասարումը և անսեղմելիության պայմանը): Նշված հավասարումները լուծվել են ստացիոնար դեպքում և գնահատվել է ծավալի նվազմամբ մակաձված հոսքի ստացիոնար արագությունը: Վերջինս առավելագույնն է բջջի միջին հարթության մեջ, և դրա համար ստացվել է հետևյալը՝

$$v \left(\frac{a}{2} \right) \approx - \frac{6}{ld^2} \frac{\Delta V}{\Delta t} \left(\frac{d^2}{4} - \frac{a^2}{2} \right) = \frac{24mR_0^3}{h} N \frac{S_0 \alpha E}{\tau l d}, \quad (5)$$

որտեղ l -ը բջջի լայնությունն է, R_0 -ն կոշտ սֆերայի էֆեկտիվ շառավիղը, h -ը «փաթեթավորման» ֆրակցիան է (packing fraction), որը հավասար է մասնիկների զբաղեցրած ծավալի և ընդհանուր ծավալի հարաբերությանը, իսկ N -ը մոլեկուլների թիվն է: **ԱԴ պարագրաֆում**, [11] աշխատանքի փորձարարական տվյալների կիրառմամբ, գնահատվել է հոսքի ստացիոնար արագությունը: Ստացված արդյունքները համեմատվել են առկա փորձարարական արդյունքների հետ: **ԱԵ պարագրաֆը** ներառում է եզրակացություններ և հետագա քայլերի համառոտ նկարագրություն:

ԵԶՐԱՎԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

Ստորև թվարկված են ատենախոսության մեջ ներառված աշխատանքների հիմնական գիտական արդյունքները՝

1. Օպտիկական մանրադիտության ուսումնասիրություններով ցույց է տրվել, որ գերկարճ լազերային իմպուլսներով N-BK7 ապակու ծավալում մակաձված նյութի վերափոխությունը շեմայինին մոտ ինտենսիվությունների և ցածր հերթագայման հաճախությունների կիրառման պայմաններում հանգեցնում է բեկման ցուցչի հոծ ձևափոխման, իսկ բարձր պիկային հզորությունների դեպքում և/կամ երկարատև ճառագայթահարման պայմաններում լազերային իմպուլսներով մակաձված բծերն ունեն փոփոխական նշանի ԲՏՓ-ով բնութագրվող անհամասեռ կառուցվածք:
2. Ցույց է տրվել, որ ճառագայթահարման ցածր էներգիական չափաբաժինների դեպքում հնարավոր է ընտրել միկրոմշակման տեխնոլոգիական ռեժիմներ (սկանավորման արագություն, իմպուլսների հերթագայման հաճախություն), որոնք թույլ են տալիս շերտ-առ-շերտ սկանավորման եղանակով պատրաստել ապակու բեկման ցուցչի հոծ և համասեռ ձևափոխմամբ երկարաձված կառուցվածքներ: Առաջարկվող մոտեցման կիրառելիությունը ցուցադրվել է N-BK7 ապակու ծավալում ընկղմված, մեծ չափսեր ունեցող, համասեռ փոկային կառուցվածքի պատրաստմամբ:
3. Օգտագործելով մեծ չափսերով, բեկման ցուցչի համասեռ փոփոխմամբ ընկղմված փոկային կառուցվածքների *in situ* պատրաստման կարողությունը՝ առաջարկվել է թափանցիկ նյութերի ծավալում լազերային իմպուլսներով մակաձված բեկման ցուցչի փոփոխության նշանի և արժեքի գնահատման արագ ու պարզ մեթոդ: Ցույց է տրվել, որ միկրոմշակման տրված տեխնոլոգիական ռեժիմում սուբպիկովայրկյանային լազերով N-BK7 ապակու ծավալում մակաձված նյութի վերափոխությունները հանգեցնում են բեկման ցուցչի բացասական ($\Delta n = -9,6 \times 10^{-3}$) փոփոխության:
4. Ցույց է տրվել, որ մոնոդոմեն նեմատիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերների առաձգական հատկությունները տեսականորեն նկարագրվում են հինգ անկախ հաստատուններ պարունակող առաձգական ազատ էներգիայի խտության միջոցով: Նշված հինգ առաձգականության գործակիցների որոշման համար առաջարկվել են ձգման պարզ փորձեր:
5. Առաջարկվող տեսական մոդելի կիրառմամբ առաջին անգամ առաձգականության հինգ հաստատունները գնահատվել են ազդբեմզենով ֆունկցիոնալացված ակրիլատ-ամին հիմքով նեմատիկ հեղուկբյուրեղային էլաստոմերների համար՝ օգտագործելով հասանելի փորձարարական տվյալները: Նշված հեղուկբյուրեղային էլաստոմերները բնութագրող հինգ առաձգականության գործակիցներից յուրաքանչյուրի արժեքն ընկած է 0.5–200 ՄՊա-ի տիրույթում: Ցույց է տրվել, որ փորձերից ստացված արժեքները գործնականում լավ բավարարում են առաձգական հաստատունների արժեքների համար նյութերի համաչափությամբ պայմանավորված տեսական սահմանափակումներին:

Գրականություն

1. R. Gattass, E. Mazur. *Nature Photonics* 2, 219–225, 2008.
2. F. Sima, et al. *Nanophotonics*, vol. 7, no. 3, 2018, pp. 613-634.
3. C. P. Jisha, et al. *Laser & Photonics Reviews* 15, 2100003, 2021.
4. A. E. Minovich, et al. *Laser & Photonics Reviews*, 9: 195-213, 2015.
5. Y. Li, et al. *Adv. Opt. Mater.* 2018, 6, 1800059.

6. A. Mermillod-Blondin, et al. *Phys. Rev. B* 77, 104205, 2008.
7. S.W. Oh, et al. *Liquid Crystals* 2020, 48:4, 511-520.
8. Z. Wang, T. Raistrick, et al. *Materials* 16, 393, 2023.
9. Q. Fu, et al. *Compos. Sci. Technol.* 2018, 164, 296–303.
10. P.Palfy-muhoray, D.A. Balzarini, D.A. Dunmur. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1984, 110, 315–330.
11. T.Dadalyan, T.Galstian. *Sci. Rep.* 2019, 9, 12346.

Հրապարակված աշխատանքների ցուցակ

Գիտական հոդվածներ

1. **Sargsyan M.**, Gevorgyan G., Hakobyan M., Hakobyan R. Determination of the Elasticity Coefficients for Nematic Liquid Crystal Elastomers, *Crystals* (Q2) 2022, 12(11):1654.
2. **Sargsyan M.** Electrically Induced Hydrodynamic Effect in Nematics Caused by Volume Reduction, *Fluids* (Q2) 2022, 7(10):316.
3. Hovakimyan M.T., **Sargsyan M. L.**, Hakobyan R. S., Hakobyan M. R. Elastic properties of solid nematics, Proceedings of Optics of Liquid Crystals 2019 (OLC-2019), *Molecular Crystals and Liquid Crystals* (Q3) 2020, 713:1, 55-64.
4. Yeremyan A.S., **Sargsyan M.L.**, Gasparyan P.K. Fabrication of Uniform Phase Structures in the Bulk of a N-BK7 Glass Using Ultrashort Laser Pulses, *J. Contemp. Phys.* (Q3) 2020, 55, 191–198.
5. Sargsyan M.L., Hakobyan M.R., Hakobyan R.S. Multilayer Anisotropic Thin Film with a Twist, *Armenian Journal of Physics* 2020, 13 (1), 20-30.

Միջազգային գիտաժողովների թեզիսներ

1. **Sargsyan M.**, Gevorgyan G., Hakobyan M., Hakobyan R., Reynolds M., Gleeson H., Anisotropic Elastomers for Laser Beam Steering, Book of Abstracts of Laser Physics 2023, Ashtarak, Armenia, p. 72.
2. **Sargsyan M.**, The Effect of Ultrashort Pulse Shaping on Regimes of Laser Processing of a Glass. The 3rd International Workshop on “Ultrafast Beams and Applications” (UBA-22), Yerevan, Armenia.
3. **Sargsyan M.L.**, Gevorgyan G.S., Hakobyan M.R., Hakobyan R.S., Anisotropic Elastic Properties of Nematic Liquid Crystal Elastomers. 28th International Liquid Crystal Conference (ILCC 2022), Lisbon, Portugal.
4. Hovakimyan M.T., **Sargsyan M.L.**, Hakobyan R.S., Hakobyan M.R., Anisotropic Elastic Properties of Liquid-Crystalline Elastomers, Book of Abstracts of Optics-2019, Yerevan, Armenia, p. 105.
5. **Sargsyan M.L.**, Yeremyan A. S., Direct laser writing of buried phase structures in BK7 glass, Book of Abstracts of Laser Physics 2019, Ashtarak, Armenia, p.33.
6. Hovakimyan M.T., **Sargsyan M.L.**, Hakobyan M.R., Hakobyan R.S., Elastic properties of anisotropic elastomers, Book of Abstracts of International conference "EuroDisplay 2019", Minsk, Belarus, p. 97.
7. M.T.Hovakimyan, **M.L.Sargsyan**, M.R.Hakobyan, R.S.Hakobyan, Elastic Properties of Solid Nematics. 18th Topical Meeting on the Optics of Liquid Crystals (OLC-2019), p. 25, Hotel Chateau Laurier, Quebec City, Canada.
8. **Sargsyan M.**, Ultrafast laser-induced modification of glass and fabrication of buried phase structures, Abstracts of UBA-19, Yerevan, Armenia, p. 25.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУР,
СФОРМИРОВАННЫХ В ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

АННОТАЦИЯ

В диссертационной работе представлены теоретические и экспериментальные результаты, которые могут внести вклад в разработку средств управления световыми пучками, что является одной из актуальных задач в области фотоники, способствующей проектированию и изготовлению компактных и эффективных оптических устройств с управляемыми характеристиками.

Метод прямой лазерной записи (ПЛЗ) является одним из наиболее перспективных методов изготовления оптических элементов в объеме изотропных прозрачных сред (к примеру, в стекле). В настоящее время область применения метода стремительно расширяется благодаря новейшим технологическим разработкам, в результате чего стали доступны сверхбыстрые (фемтосекундные) лазерные системы микрообработки, обладающие возможностью точного управления технологическими параметрами и широким выбором режимов обработки. Однако из-за характерного недостатка рассматриваемого метода ПЛЗ, связанного с пространственной неоднородностью области структурирования, возникают значительные трудности при необходимости записи протяженных (с высоким соотношением продольных и поперечных размеров) структур или фазовых элементов с большими размерами.

Жидкокристаллические эластомеры (ЖКЭ) представляют интерес для создания оптических элементов с контролируемыми характеристиками на основе анизотропных сред. Последние благодаря своим свойствам (в частности, они обладают оптической анизотропией, управляемой внешними полями, возможностью программирования и перепрограммирования распределения директора) позволяют изготавливать оптические элементы, управляемые дополнительными способами (например, механически, путем изменения температуры). Особый интерес вызывает дизайн и разработка механически управляемых устройств на основе ЖКЭ. Однако создание таких устройств до сих пор остается сложной задачей. В основном это связано с тем, что механические свойства этих материалов еще не полностью характеризованы, что существенно затрудняет правильный дизайн таких устройств и их интеграцию в другие системы.

Основной целью диссертационной работы является исследование модификаций, индуцированных сверхкороткими лазерными импульсами в объеме боросиликатного стекла, и их применение для получения однородных макроскопических фазовых структур с сплошным изменением показателя преломления. А также теоретически и экспериментально провести полную характеристику анизотропных упругих свойств монодоменных нематических жидкокристаллических эластомеров.

Основные результаты диссертационной работы приведены ниже:

1. На основе микроскопических исследований было показано, что модификация вещества, индуцированная ультракороткими лазерными импульсами в объеме

- стекла N-BK7 при условиях применения околопороговых интенсивностей и низких частот повторения, приводит к сплошному изменению показателя преломления, а при высоких пиковых мощностях и/или в условиях длительной экспозиции лазерно-индуцированные треки имеют неоднородную структуру, характеризующуюся переменным знаком изменения показателя преломления.
2. Было показано, что при малых энергетических дозах облучения можно выбрать технологические режимы микрообработки (скорость сканирования, частота следования импульсов), позволяющие методом послойного сканирования изготавливать протяженные структуры с сплошным и однородным изменением показателя преломления стекла. Применимость предложенного подхода была продемонстрирована изготовлением однородной фазовой структуры большого размера, заглубленной в объем стекла N-BK7.
 3. Используя возможность *in situ* изготовления заглубленных фазовых структур больших размеров с однородным изменением показателя преломления, предложен быстрый и простой метод оценки знака и величины изменения показателя преломления, индуцированного лазерными импульсами в объеме прозрачных материалов. Было показано, что в данном технологическом режиме микрообработки, модификации вещества, индуцированные субпикосекундными лазерными импульсами в объеме стекла N-BK7, приводят к отрицательному ($\Delta n = -9.6 \times 10^{-3}$) изменению показателя преломления.
 4. Было показано, что упругие свойства монодоменных нематических жидкокристаллических эластомеров теоретически описываются плотностью упругой свободной энергии, содержащей пять независимых констант. Простые эксперименты на растяжение были предложены для определения упомянутых пяти коэффициентов упругости.
 5. С использованием предложенной теоретической модели на основе доступных экспериментальных данных пять коэффициентов упругости впервые были оценены для функционализированных азобензолом нематических жидкокристаллических эластомеров на основе акрилат-аминов. Значение каждого из пяти коэффициентов упругости, характеризующих упомянутые жидкокристаллические эластомеры, находится в диапазоне 0.5-200 МПа. Было показано, что полученные из экспериментов значения хорошо удовлетворяют теоретическим ограничениям на величины упругих констант, обусловленных симметрией материалов.

STUDY OF MECHANICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF STRUCTURES FORMED IN
ISOTROPIC AND ANISOTROPIC MEDIA

ANNOTATION

In this thesis, both theoretical and experimental findings are presented, that can contribute to the advancement of light control tools, which is one of the current challenges in the field of photonics. The results obtained can assist in the design and fabrication of compact and efficient optical devices with tunable characteristics.

Direct laser writing (DLW) stands out as one of the most promising techniques for fabricating optical elements in the volume of isotropic transparent media (such as glass). Currently, the scope of applications of the method is rapidly expanding due to the latest technological advancements, resulting in the availability of ultrafast (femtosecond) laser micromachining systems that offer precise control over technological parameters and a wide choice of processing regimes. However, the characteristic drawback of the DLW method, related to the spatial inhomogeneity of the structuring region, causes significant challenges when it is necessary to write extended (high-aspect ratio) structures or phase elements with large sizes.

Liquid crystalline elastomers (LCEs) are of particular interest for creating optical elements with adjustable characteristics based on anisotropic media. Their distinctive properties (including controllable optical anisotropy through external fields, and the ability of programming and reprogramming the director distribution), enable the creation of optical elements that can be controlled in additional methods (e.g., mechanically, or by changing the temperature). The design and fabrication of mechanically controlled devices based on LCEs is of particular interest. However, the creation of such devices remains challenging. Primarily, this is due to the fact that the mechanical properties of these materials have not yet been fully characterized, which significantly complicates the proper design of such devices and their integration into other systems.

The primary aim of this thesis is twofold: first, to investigate the modifications induced by ultrashort laser pulses in the volume of borosilicate glass and their application for fabrication of homogenous macroscopic phase structures with continuous refractive index change. Second, theoretically and experimentally perform the full characterization of anisotropic elastic properties of monodomain nematic liquid crystal elastomers.

The main results of the thesis are presented below:

1. Based on optical microscopic studies, it was shown that the modification of the material induced by ultrashort laser pulses in the volume of N-BK7 glass at application of near-threshold intensities and low repetition rates leads to a continuous change in the refractive index, while at high peak powers and/or under

- conditions of long-term irradiation the laser-induced tracks have a non-uniform structure characterized by a variable sign of the refractive index change.
2. It was shown that at low energy doses of irradiation it is possible to choose specific technological regimes of micromachining (scanning speed, pulse repetition rate) that allow fabrication of extended structures within the glass using the layer-by-layer scanning approach, resulting in a smooth and homogeneous change in the refractive index. The applicability of the proposed approach was demonstrated by fabrication of a large-size homogeneous phase structure buried in the volume of N-BK7 glass.
 3. Using the possibility of in situ fabrication of buried phase structures of large sizes with smooth and uniform refractive index change, an express and simple method for the estimation of the sign and magnitude of the refractive index change induced by laser pulses in the volume of transparent materials has been proposed. The research demonstrated that in the given technological regimes of micromachining, the material modifications induced by sub-picosecond laser pulses in the volume of N-BK7 glass result in a negative change ($\Delta n = -9.6 \times 10^{-3}$) in the refractive index.
 4. It has been shown that the elastic properties of monodomain nematic liquid crystal elastomers are theoretically described by an elastic free energy density containing five independent constants. Simple tensile experiments were proposed to determine the mentioned five elastic coefficients.
 5. Using the proposed theoretical model and based on available experimental data, five elasticity coefficients were estimated for the first time for azobenzene functionalized acrylate-amine-based nematic liquid crystalline elastomers. The value of each of the five elasticity coefficients characterizing the mentioned liquid crystalline elastomers is in the range of 0.5-200 MPa. It was shown that the values obtained from the experiments satisfy well the theoretical constraints on the values of elastic constants imposed by the material's symmetry.

