

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

ԾԱՌՈՒԿՅԱՆ ԼՈՒՍԻՆԵ ՄԿՐՏՉԻ

**ՖՈՏՈՆԻԿ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ԳՐԱՌՄԱՆ ԵՎ ԹԵՍԱՎՈՐՄԱՆ ՆՈՐ
ԵՂԱՆԱԿՆԵՐ, ՊԻՐՈՒԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՍՈԼԻՏՈՆՆԵՐԻ
ԳԵՆԵՐԱՑՈՒՄ ԵՎ ՄԻԿՐՈ- ՈՒ ՆԱՆՈՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ՖՈՏՈՎՈԼՏԱՅԻԿ
ԳԵՐՈՒՄ ԲԵՍԵԼՅԱՆ ՓՆՋԻ ՄԻՋՈՑՈՎ**

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

Երևան – 2021

**Ատենախոսության թեման հաստատվել է
ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտում**

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. Դոկտոր, Ռաֆայել Խաժակի Դրամիյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր, Տիգրան Վոլոդիայի Գալստյան

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, Դավիթ Հայկի Սարգսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Երևանի Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2021թ. նոյեմբերի 13-ին ժամը 12:00-ին, Երևանի պետական համալսարանում (0025, ք. Երևան, Ալեք Մանուկյան 1), ԲՈԿ-ի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2021թ. սեպտեմբերի 28-ին

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար՝



Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու,
դոցենտ Վ.Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Институте физических исследований НАН РА

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, Рафаел Хажакович Дрампян

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор, Тигран Володяевич Галстян

доктор физ.-мат. наук, Давид Гайкович Саркисян

Ведущая организация:

Ереванский государственный университет

Защита диссертации состоится 13-го ноября 2021г. в 12 часов в Ереванском государственном университете (0025, г. Ереван, ул. Алека Манукяна 1) на заседании Специализированного совета ВАК Физика-049

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 28-го сентября 2021г.

Ученый секретарь, специализированного совета
кандидат физ.-мат. наук, доцент



В.П. Калантарян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՆԿԱՐԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ատենախոսությունը նվիրված է ֆոտոռեֆրակտիվ լիթումի նիոբատի (LN) բյուրեղում նոր ոչ գծային օպտիկական պրոցեսների ուսումնասիրությանը և նրանց կիրառություններին: Հետազոտությունները վերաբերում են օպտիկական հոլոգրաֆիայում մեկ լազերային փնջի նոր մոտեցմանը, պիրոէլեկտրական դաշտով ղեկավարվող կորագիծ հետազոծվ տարածական օպտիկական սոլիտոնների գեներացմանը, մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ հոլոգրամների չքայքայող թեստավորման նոր եղանակի մշակմանը, ինչպես նաև օպտիկական հոլոգրաֆիայի զարգացմանը՝ բեսելյան փնջով լուսամակածված ֆոտովոլտայիկ դաշտերի միջոցով բյուրեղի մակերևույթի վրա միկրո- և նանոմասնիկների գերման և ղեկավարման համար: Ստացված արդյունքներն ունեն արտահայտված կիրառություններ:

ԹԵՄԱՅԻ ԱՐԴԻԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Լազերային ճառագայթման փոխազդեցությունը միջավայրի հետ բերում է բազմաթիվ ոչ գծային երևույթների, ինչպիսիք են երկրորդ հարմոնիկի գեներացումը, պարամետրական պրոցեսները, լույսի հարկադրական ցրումը, ինքնակիզակետումը, օպտիկական հոլոգրաֆիան և այլն: Այս երևույթները պինդմարմնային բյուրեղներում ունեն բարձր արդյունավետություն և բազմաթիվ կիրառություններ են գտել ֆիզիկայի տարբեր բնագավառներում: Ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղները լայնորեն օգտագործվում են օպտիկական սոլիտոնների ձևավորման համար և օպտիկական հոլոգրաֆիայում: Չնայած օպտիկական հոլոգրաֆիան և լույսի ինքնակիզակետումն ունեն ֆիզիկական տարբեր հենքեր, այնուամենայնիվ նրանք իրար հետ միավորվում են շատ խոստումնալից կիրառություններով, ինչպիսիք են կողմավորված օպտիկական ինֆորմացիայի պահպանումն ու հասցեագրված ուղղորդումը:

Ինքնակիզակետումը և տարածական սոլիտոնների ձևավորումը կիրառական տեսանկյունից ամենահետաքրքիր և հեռանկարային երևույթներից են: Տարածական սոլիտոններն ալիքատարային կառուցվածքների լավ նմանակ են և հեռանկարային են օպտիկական ինֆորմացիայի հասցեագրված տեղափոխման համար: Ղեկավարվող կորագիծ հետազոծվ և երկար կյանքի տևողությամբ ալիքատարերի ստեղծումը մարտահրավերային խնդիր է օպտիկական ինֆորմացիայի ուղղորդման համար:

Օպտիկական հոլոգրաֆիան օպտիկական ինֆորմացիայի պահպանման և վերարտադրման կիրառություններում օպտիկայի արագ զարգացող բնագավառներից է: Դասական օպտիկական հոլոգրաֆիայում ռեֆրակտիվ ցանցերի ձևավորումը ֆոտոռեֆրակտիվ միջավայրում իրականացվում է տարածապես մոդուլացված օպտիկական ճառագայթների միջոցով: Լույսի ինտենսիվության մոդուլացումը սովորաբար իրականացվում է առանձին երկճառագայթ կամ բազմաճառագայթ ինտերֆերենցիայի սխեմաներով: Կոմպակտ ֆոտոնիկ սարքերի նախագծման և պատրաստման համար շատ գրավիչ է նոր մոտեցման մշակումը, որը կապահովի և՛ կանոնավոր երկչափ (2D) պատկերների ձևավորումը մեկ գառայան փնջի միջոցով, և՛ միաժամանակյա հոլոգրաֆիական գրառումը նույն ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում: Մեկ ճառագայթի մոտեցումը օպտիկական հոլոգրաֆիայում նոր հնարավորություններ կբացի ֆոտոռեֆրակտիվ նյութերում լույսի ինտենսիվությամբ վերահսկվող և ձևափոխվող

Ֆոտոնիկ կառուցվածքների ձևավորման և կոմպակտ ֆոտոնիկ սարքերի նախագծման համար:

Օպտիկական հոլոգրաֆիայում ակտուալ խնդիր է նաև ֆոտոնիկ կառուցվածքների և կողավորված ինֆորմացիայի չքայքայող թեստավորման եղանակների մշակումը: Բարձր արդյունավետությամբ հոլոգրաֆիական գրառումը և չքայքայող թեստավորումը մարտահրավերային խնդիր է:

Վերջին տասնամյակում օպտիկական հոլոգրաֆիան նոր և խոստումնալից զարգացում է գտել ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղի մակերևույթի վրա մեծ թվով միկրո- և նանոմասնիկների գերման և ղեկավարվող տեղաշարժման համար: Եղանակի էությունը կապված է տարածապես անհամասեռ լուսավորման պայմաններում բյուրեղի ծավալում և մակերևույթի մերձակայքում ֆոտոլիցքերի տարածական բաժանմամբ պայամանավորված ուժեղ անհամասեռ էլեկտրական դաշտերի ($\sim 10^7$ Վ/մ) ստեղծման հետ, որոնք էլ իրենց հերթին բյուրեղի մակերևույթի մոտ գտնվող մասնիկների վրա առաջացնում են դիէլեկտրաֆորետիկ ուժեր: Այսպիսի գերող սարքերը կոչվում են ֆոտովոլտայիկ լավիտներ (tweezers): Իրական ժամանակում տարբեր միկրո- և նանոօբյեկտների գերման և ղեկավարման համար մարտահրավերային խնդիր է հանդիսանում *lab-on-a-chip* սարքերի մշակումը:

Նշված մարտահրավերային խնդիրները այս առենախոսության առարկան են:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՆՊԱՏԱԿ

1. Օպտիկական հոլոգրաֆիայի համար մեկ օպտիկական ճառագայթի նոր մոտեցման մշակում:
2. Ղեկավարվող կորագիծ հետագծով սոլիտոնների գեներացում:
3. Հոլոգրամի չքայքայող թեստավորման նոր եղանակի մշակում:
4. Բեսելյան փնջերի կիրառմամբ ֆոտովոլտայիկ լավիտների նախագծում:

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԸ

Առենախոսության խնդիրները կարող են ամփոփվել հետևյալ կերպ՝

1. Երկաթով լեզիրված լիթիումի նիոբատի (LN:Fe) բյուրեղի միջով մեկ օպտիկական գառայան փնջի տարածման հետազոտություն ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում միաժամանակ իրականացվող կանոնավոր օպտիկական պատկերների ձևավորման և քվազիբյուրեղային ռեֆրակտիվ կառուցվածքների գրառման համար: Ֆիզիկական մոդելի մշակում և թվային հաշվարկների իրականացում:
2. LN:Fe բյուրեղում պիրոէլեկտրական էֆեկտի միջոցով ղեկավարվող ինքնակիզակետված օպտիկական ճառագայթի կորագիծ տարածման փորձնական ցուցադրություն և թվային հաշվարկների իրականացում:
3. Արտաքին մագնիսական դաշտի կիրառմամբ ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղներում ծավալային հոլոգրամների չքայքայող օպտիկական թեստավորման նոր եղանակի մշակում:
4. LN:Fe բյուրեղի մակերևույթի վրա միկրո- և նանոմասնիկների էֆեկտիվ ֆոտովոլտայիկ գերման համար բեսելյան փնջի մոտեցման իրականացում:

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՐՈՒՅԹԸ

1. Մշակվել է նոր մոտեցում ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում մեկ գաուսյան փնջով միաժամանակ իրականացվող 2D օպտիկական պատկերների ձևավորման և քվադրբյուրեղային ռեֆրակտիվ կառուցվածքի գրառման համար:
2. Փորձով ցուցադրվել է ֆոտոռեֆրակտիվ LN:Fe բյուրեղում գեներացված օպտիկական սոլիտոնի հետագծի ղեկավարումը պիրոէլեկտրական դաշտի միջոցով:
3. Մշակվել է նոր եղանակ ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղներում ֆոտոինդուկտված ռեֆրակտիվ կառուցվածքների չքայքայող օպտիկական թեստավորման համար՝ մագնիսական դաշտի կիրառմամբ:
4. Առաջարկվել և իրականացվել է բեսելյան փնջի նոր մոտեցում ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղի մակերևույթի վրա լուսամանկածված ֆոտովոլտայիկ դաշտի միջոցով միկրո- և նանոօբյեկտների արդյունավետ գերման և ղեկավարվող տեղաշարժման համար:

ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

1. Օպտիկական հոլոգրաֆիայում մեկ ճառագայթի մոտեցումը կիրառությունների նոր պոտենցիալ հնարավորություններ է ստեղծում՝ ֆոտոռեֆրակտիվ նյութերում լույսի ինտենսիվությամբ վերափոխվող ֆոտոնիկ կառուցվածքների ձևավորման և կոմպակտ ֆոտոնիկ սարքերի մշակման համար:
2. LN:Fe բյուրեղում կորագիծ հետագծով օպտիկական սոլիտոնների միջոցով երկար կյանքի տևողությամբ ալիքատարերի ձևավորումը խոստումնալից է օպտիկական ինֆորմացիայի հասցեագրված տեղափոխման համար:
3. Մագնիսական դաշտի կիրառմամբ ֆոտոնիկ կառուցվածքների չքայքայող թեստավորման նոր եղանակը հեռանկարային է ֆոտոնիկ սարքերում օգտագործման համար և ունի հեշտությամբ իրագործվելու առավելություն:
4. Բեսելյան փնջի տեխնիկայի և LN:Fe բյուրեղի հիման վրա նախագծված ֆոտովոլտայիկ լավիտները խոստումնալից են *lab-on-a-chip* սարքերի մշակման համար՝ իրական ժամանակում տարբեր միկրո- և նանոօբյեկտների գերման և տեղաշարժման ուսումնասիրության համար:

ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ՆԵՐԿԱՅԱՑՎԱԾ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԴՐՈՒՅԹՆԵՐԸ

1. Անընդհատ լուսային ճառագայթի տարածումը LN:Fe բյուրեղում լուսային փնջում ձևավորում է 2D կանոնավոր պատկերներ և միաժամանակ բյուրեղում գրառում է ֆոտոնիկ կառուցվածք՝ ճառագայթի և բյուրեղի համապատասխան պարամետրերի դեպքում:
2. LN:Fe բյուրեղում ձևավորված օպտիկական սոլիտոնի հետագիծը կարող է ղեկավարվել ջերմաստիճի փոփոխման միջոցով ստեղծված պիրոէլեկտրական դաշտով:
3. Մագնիսական դաշտի առկայությամբ ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղներում ֆոտոնիկ կառուցվածքների օպտիկական թեստավորումն էապես նվազեցնում է նրա ջնջումը: Մագնիսադիմադրության երևույթը, որը հիմնված է մագնիսական դաշտում փոքր պոլյարոնների թռիչքաձև տեղաշարժման մոդելի վրա, բացատրում է ֆոտոնիկ կառուցվածքների ջնջման ժամանակի աճը:

4. Բեսեյյան փնջի ազդեցությամբ լուսամակաձված բարձր կոնտրաստով 2D ֆոտոլիտալիկ դաշտը, որն առաջանում է LN:Fe բյուրեղի մակերևութին, ապահովում է CaCO_3 դիէլեկտրիկ միկրոմասնիկների և գլիցերինի լուծույթում Ag-ի նանոմասնիկների արդյունավետ գերումը բեսեյյան ցանցի համակենտրոն օղակների երկայնքով:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՆԵՐԿԱՅԱՑՈՒՄ

Ատենախոսության հեղինակի կողմից ատենախոսության արդյունքները ներկայացվել և քննարկվել են ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական Հետազոտությունների Ինստիտուտի սեմինարներում, Franche-Comté համալսարանի FEMTO-ST ինստիտուտում (Բեզանսոն, Ֆրանսիա, 2019թ.), «Laser Physics» միջազգային գիտաժողովում (Աշտարակ, Հայաստան, 2018թ.), International Advanced School «Frontiers of Optics and Photonics»-ում (Աշտարակ-Երևան, ՀՀ, 2018թ.), «ICTP Winter College on Extreme Non-linear Optics, Attosecond Science and High-field Physics»-ում (Տրիեստ, Իտալիա, 2018թ.), International Symposium “Optics and its Applications”-ում (Տրենտո, Իտալիա, 2018թ.), «International OSA Student Network (IONS-2018)»-ում (Երևան, Հայաստան, 2018թ.), «SPIE Optics + Optoelectronics, Conference»-ում (Պրահա, Չեխիա, 2019թ.), «Frontiers in Optics/Laser Science Conference (FiO/LS)»-ում (Վաշինգտոն DC, ԱՄՆ, 2019թ.), «SPIE Photonics Europe 2020»-ում (Առցանց ֆորում, Ֆրանսիա, 2020թ.), «SPIE Optics + Photonics 2021»-ում (Սան Դիեգո, Կալիֆոռնիա + Առցանց, 2021):

Հրատարակությունները. Ատենախոսության հիմնական արդյունքները հրատարակվել են 5 գրախոսվող ամսագրերում [1-5], ինչպես նաև SPIE proceedings-ներում [6-8], OSA Technical Digest-ում [9] և միջազգային գիտաժողովների ժողովածուներում [10-13], որոնք բերված են հրապարակումների ցանկում:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԾԱՎԱԼ

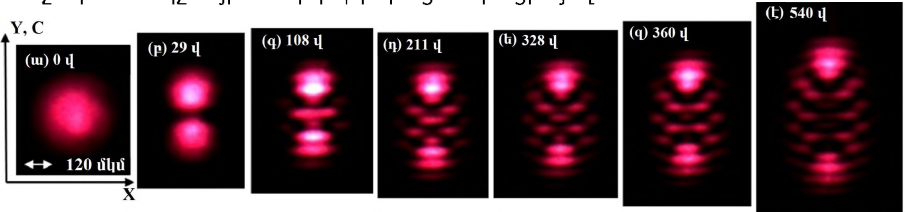
Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 4 գլուխներից, եզրակացությունից, գրականության ու հապավումների ցանկերից և պարունակում է 113 էջ, 49 նկար, 4 աղյուսակ և 150 հղում:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Ներածության մեջ հիմնավորված է ատենախոսության արդիականությունը, սահմանված է աշխատանքի նպատակը, ներկայացված են խնդիրները և գիտական նորույթը, թվարկված են կիրառությունները, պաշտպանությանը ներկայացվող դրույթները, տրված են ատենախոսության կառուցվածքը և ատենախոսության շրջանակում հրապարակումների ցանկը:

Գլուխ 1–ը՝ «Մեկ գաուսյան փնջի մոտեցումն օպտիկական հոլոգրաֆիայում», նվիրված է ֆոտոռեֆրակտիվ LN:Fe բյուրեղով 632.8 նմ ալիքի երկարությամբ և միլիվատային հզորությամբ մեկ գաուսյան փնջի տարածման պայմաններում ճառագայթի պրոֆիլում 2D միկրոմոտրական չափսերի կանոնավոր օպտիկական պատկերների ձևավորման և միաժամանակ բյուրեղում ռեֆրակտիվ կառուցվածքի գրառման ուսումնասիրությանը:

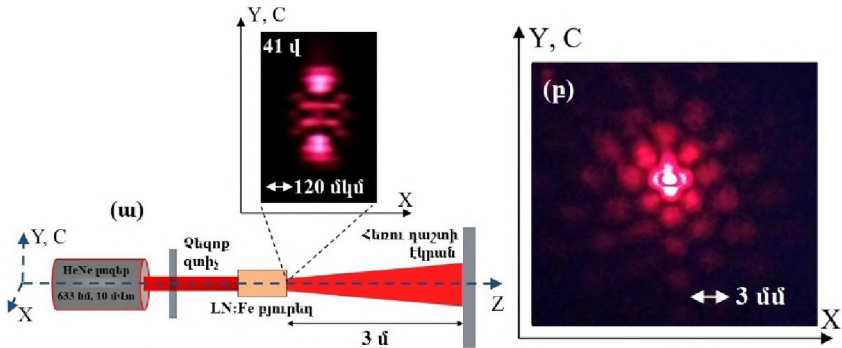
Ներկայացվում է լազերային ճառագայթի կտրվածքում 2D միկրոմետրական չափսերի օպտիկական պատկերների ձևավորվումը LN:Fe բյուրեղի միջով տարածման արդյունքում: Փորձերում օգտագործվել են 0.02-ից մինչև 10 մՎտ հզորությամբ ճառագայթներ և 4 մմ ու 10 մմ երկարություններով LN:Fe բյուրեղի նմուշներ՝ 0.03 կշռային % երկաթի կոնցենտրացիայով:



Նկար 1. Լազերային ճառագայթի պրոֆիլի ժամանակային էվոլյուցիան 10 մմ երկարությամբ LN:Fe բյուրեղի ելքային նիստին՝ 0.5 մՎտ հզորությամբ և սովորական (օ)-բևեռացմամբ մուտքային ճառագայթի համար: Նկար (ա)-ն ցույց է տալիս ելքային լազերային ճառագայթի պրոֆիլը՝ միացման $t=0$ պահին: Y-առանցքը համընկնում է LN:Fe բյուրեղի C -առանցքի հետ: (ա)-ում տրված սանդղակը նույնն է բոլոր (բ)-(զ) պատկերների համար:

Նկար 1-ը ցույց է տալիս 0.5 մՎտ հզորությամբ, (օ)-բևեռացմամբ լազերային ճառագայթի պրոֆիլի ժամանակային էվոլյուցիան 10 մմ երկարությամբ LN:Fe բյուրեղի ելքային նիստին՝ բյուրեղի միջով նրա տարածման արդյունքում: Ճառագայթի ինտենսիվությունը գնահատվել է $I \sim 1.3 \times 10^5$ Վտ/մ²: Ժամանակային էվոլյուցիան ցույց է տալիս մուտքային գաուսյան փնջի (Նկար 1(ա)) բաժանումը երկու փնջերի (Նկար 1(բ)): Հետագա զարգացումը ցույց է տալիս փնջի կենտրոնի նկատմամբ համաչափ դասավորված լուսային կետերից բաղկացած 2D կանոնավոր օպտիկական պատկերների ձևավորում (Նկարներ 1(գ)–1(ե)): Արտահայտված կանոնավոր օպտիկական պատկերը ձևավորվում է 211 վ-ում (Նկար 1(դ)), որը պահպանվում է անփոփոխ մինչև 328 վ (Նկար 1(ե)): Ավելի բարդ, բայց կանոնավոր պատկեր է ձևավորվում 540 վ-ում (Նկար 1(զ)):

Ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում տարածվող լազերային փնջի պրոֆիլում պատկերների ձևավորման դիտարկված երևույթը բացատրվում է բյուրեղում լուսամակաձված բաղադրյալ բեկման ցուցչի ձևավորմամբ: Ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղի լուսավորումը լազերային ճառագայթի միջոցով առաջացնում է ֆոտոհոնիզացիա, առաջացած ֆոտոլիցքակիրների վերաբաշխում և ձևավորում է լիցքերի բաժանման ներքին E_{sc} էլեկտրական դաշտեր, ինչը հանգեցնում է էլեկտրաօպտիկական երևույթի միջոցով բեկման ցուցչի համապատասխան փոփոխության: LN:Fe բյուրեղում լուսամակաձված բեկման ցուցչի փոփոխությունն ունի կենտրոնական մինիմում (բացասական ոսպնյակ) և յուրաքանչյուր կողմում համաչափ մաքսիմումներ (դրական ոսպնյակներ): Լույսով ինդուկցված բաղադրյալ ոսպնյակն առաջացնում է ճառագայթի տարամիտում նրա կենտրոնից և կիզակետում՝ եզրերից: Ճառագայթների փոխադարձ ինտերֆերենցիան հանգեցնում է երկրորդ կարգի պտտական համաչափությամբ կանոնավոր օպտիկական պատկերների ձևավորման: Կանոնավոր օպտիկական պատկերն իր հերթին LN:Fe բյուրեղում առաջացնում է քվադրբյուրեղային ֆոտոնիկ կառուցվածքի ձևավորում:



Նկար 2. (ա) Քվազիբյուրեղային ֆոտոնիկ կառուցվածքների թեստավորման սխեման: Ներդրված նկարը ցույց է տալիս գրառող ճառագայթի օպտիկական պատկերը բյուրեղի ելքային նիստի վրա: (բ)–ն 2 մՎտ հզորության թեստավորող ճառագայթի միջոցով ֆոտոնիկ կառուցվածքից ստացված դիֆրակցիայի պատկերն է հեռու դաշտում:

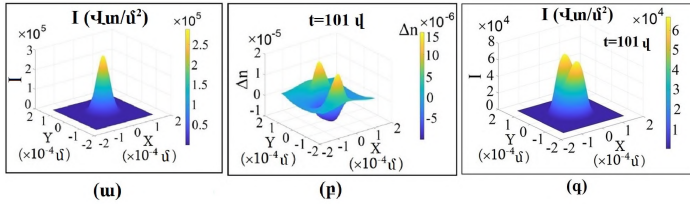
Նկար 2(ա)–ն ցույց է տալիս 4 մմ երկարությամբ LN:Fe բյուրեղում 632.8 նմ ալիքի երկարությամբ և 5 մՎտ հզորությամբ գաուսյան փնջի միջոցով 41 վ լուսավորմամբ գրառված քվազիբյուրեղային ֆոտոնիկ կառուցվածքի թեստավորման սխեման: Ներդրված նկարը ցույց է տալիս գրառող ճառագայթի օպտիկական պատկերը բյուրեղի ելքային նիստի վրա: Նկար 2(բ)–ն ցույց է տալիս 2 մՎտ հզորությամբ թեստավորող ճառագայթի միջոցով քվազիբյուրեղային կառուցվածքից ստացված հեռու դաշտի դիֆրակցիայի պատկերը: Գրառված քվազիբյուրեղային կառուցվածքի կյանքի տևողությունը LN:Fe բյուրեղում մի քանի ամիս է՝ շնորհիվ բյուրեղի բարձր էլեկտրական դիմադրության:

Հենքային ֆիզիկական պրոցեսների վերլուծության համար կատարվել է թվային մոդելավորում: Մշակված ֆիզիկական մոդելում, որպես ֆոտոակտիվ կետրոններ, դիտարկվել են և՛ երկաթի իոնները, և՛ պոլյարոնները: Ի լրացում Fe^{2+} խառնուրդային իոններով պայմանավորված ֆոտովոլտալիկ երևույթի՝ փոքր պոլյարոնների ներդրումը լիցքերի վերաբաշխման մեջ տեղի է ունենում նաև $Nb_{L}^{4+/5+}$ ներքին արատային կենտրոնների միջև լոյսի կլանման արդյունքում էլեկտրոնների թռիչքաձև տեղափոխմամբ ($Nb_{L}^{4+} \leftrightarrow Nb_{L}^{5+} + e^-$): Պոլյարոնների խտությունը $N_{x0} \sim 10^{26} \text{ մ}^{-3}$ է, իսկ Fe^{2+} դոնորներինի համար վերցվել է $N_{d0} \sim 10^{23} \text{ մ}^{-3}$:

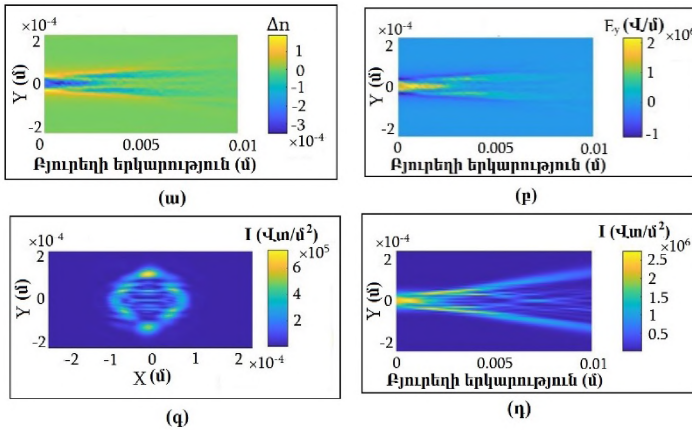
LN:Fe բյուրեղում ֆոտոռեֆրակտիվ պրոցեսների վաղ փուլի նկարագրման համար դիտարկվել է 1 մՎտ հզորությամբ, (օ)–բևեռացմամբ լազերային ճառագայթի ազդեցությունը:

LN:Fe բյուրեղում ֆոտոռեֆրակտիվ պրոցեսների վաղ փուլի նկարագրման համար դիտարկվել է 1 մՎտ հզորությամբ, (օ)–բևեռացմամբ լազերային ճառագայթի ազդեցությունը:

Նկար 3–ը ցույց է տալիս գաուսյան փնջի ինտենսիվության բաշխումը բյուրեղի մուտքում (ա), բեկման ցուցցի Δn փոփոխությունը (բ) և նրանով թելադրված լուսային փնջի համապատասխան երկգագաթ ելքային պրոֆիլը (գ) բյուրեղի ելքում՝ հաշվարկային $t = 101$ վ պահի համար: Մոդելավորման արդյունքները լավ համաձայնության մեջ են փորձնական դիտարկումների հետ (Նկար 1(բ)) :



Սկար 3. (ա) 1 մՎտ հզորությամբ և 72 մկմ տրամագծով գաուսյան փնջի հաշվարկված ինտենսիվության բաշխումը LN:Fe նմուշի մուտքում: (բ) Բեկման ցուցչի Δn փոփոխությունը բյուրեղի ելքում: (գ) Ելքային ճառագայթի ինտենսիվության բաշխումը: Մոդելավորումները կատարվել են (օ)-բևեռացված լազերային ճառագայթի համար: (բ)-ում և (գ)-ում հաշվարկային ժամանակը $t=101$ վ է:



Սկար 4. Ֆոտոռեֆրակտիվ պրոցեսի հաշվարկման արդյունքներն ավելի ուշ զարգացման փուլի համար. YZ հարթության մեջ բեկման ցուցչի Δn փոփոխության (ա), E_y տարածական լիցքերի դաշտի (բ) էվոլյուցիան, ինչպես նաև XY հարթության մեջ ճառագայթի ինտենսիվության բաշխումը (գ) և YZ հարթության մեջ ճառագայթի էվոլյուցիան տարածման երկայնքով (դ)՝ վաղ փուլի մոդելավորման նույն պարամետրերի համար, բացառությամբ ճառագայթի անսովոր (e) բևեռացման և 10 մՎտ հզորության: Մոդելավորման ժամանակն է՝ $t = 91$ վ:

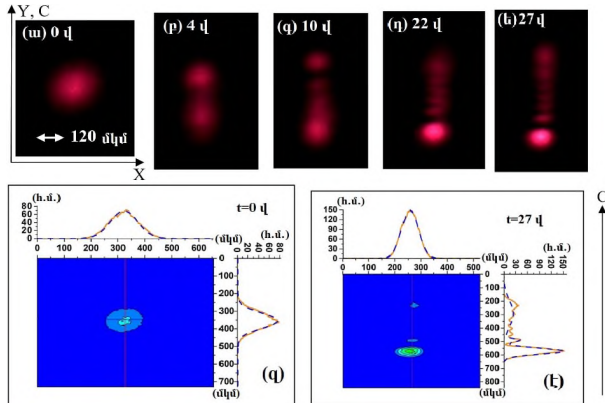
LN:Fe բյուրեղի միջով ճառագայթի տարածման ընթացքում ֆոտոռեֆրակտիվ պրոցեսի հետագա զարգացման փուլը կանխատեսում է Δn -ի, E_y տարածական լիցքերի դաշտի, ինչպես նաև լազերային ճառագայթի պրոֆիլի մոդիֆիկացիա և 2D օպտիկական պատկերների ձևավորում: Պրոցեսի զարգացման ավելի ուշ փուլում հաշվարկների և փորձով ստացված արդյունքների միջև լավ համընկնումներ են ստացվել ճառագայթի հաշվարկային 10 մՎտ հզորության ($I \sim 2.5 \times 10^6$ Վտ/մ²) համար, որն իր հերթին թույլ է տվել պոլյարոնների և դոնորների խտությունների համար վերցնել ավելի մեծ, համապատասխանաբար $N_{X0} \sim 10^{28}$ մ⁻³ և $N_{d0} \sim 10^{25}$ մ⁻³, արժեքներ: Լրացուցիչ $Nb_{Li^{4+}}$ պոլյարոնների առաջացումը կարելի է բացատրել ուժեղ լոյսի ազդեցության տակ $Nb_{Li^{4+}}:Nb_{Nb^{4+}}$ բիպոլյարոնների դիսոցացման միջոցով: Դոնորների ավելի մեծ խտությունը հաշվի է առնում

հնարավոր շղեկավարվող խառնուրդային իոնները, որոնք նույնպես կարող են իոնացվել ինտենսիվ լույսի ազդեցությամբ: 91 վ մոդելավորման ժամանակի դեպքում 10 մվտ հզորությամբ և (e)-բևեռացմամբ լույսի համար թվային հաշվարկների արդյունքները բերված են Նկարներ 4(ա)-4(դ)-ում:

Ճառագայթների փոխադարձ ինտերֆերենցիան (Նկար 4(դ)) հանգեցնում է կանոնավոր օպտիկական պատկերների ձևավորմանը (Նկար 4(զ)), որն ունի գոհացուցիչ համընկում փորձով ստացված պատկերների (օրինակ՝ Նկար 2(ա)) հետ:

Գլուխ 2 –ը՝ «Գաուսյան փնջի միջոցով կորագիծ հետազոծով տարածական սոլիտոնի ձևավորումը լիթիումի նիոբատի բյուրեղում», առաջին գլխի տրամաբանական շարունակությունն է:

LN բյուրեղի յուրահատկությունն է բացասական բեկման ցուցչի բացասական փոփոխությունը լույսի ազդեցության տակ: Այնուամենայնիվ, LN բյուրեղում ինքնակիզակետումը և տարածական օպտիկական սոլիտոնի ձևավորումը նույնպես հնարավոր է՝ արտաքին ստատիկ էլեկտրական դաշտի կիրառմամբ կամ ներքին պիրոէլեկտրական դաշտի ստեղծմամբ, որոնք ավելի ուժեղ են, քան ֆոտովոլտայիկ դաշտը:



Նկար 5. (ա-ե) 10 մմ երկարությամբ LN:Fe բյուրեղի միջով անցնող 632.8 նմ ալիքի երկարությամբ, (e)-բևեռացմամբ և 0.5 մվտ հզորությամբ լազերային ճառագայթի ժամանակային էվոլյուցիան, երբ բյուրեղի ջերմաստիճանն աճել է 10-ից 45°C: (զ) և (է)- ն հանդասնում են (ա) և (ե)-ում տրված պատկերների համակարգչային մշակումը Origin ծրագրի օգնությամբ՝ սքանավորելով ճառագայթի պատկերները հորիզոնական X և ուղղահիգ Y (C-տառանցք) ուղղություններով: (ե) և (է)-ն ցույց են տալիս ճառագայթի արտահայտիչ շեղում և ինքնակիզակետում:

Տվյալ փորձում LN:Fe բյուրեղի միջով ճառագայթի տարածումը ղեկավարվել է պիրոէլեկտրական էֆեկտի միջոցով՝ բյուրեղի ջերմաստիճանի 30 °C աճով: Փորձում օգտագործվել են 632.8 նմ ալիքի երկարությամբ և 0.5 մվտ հզորությամբ միամող լազերային ճառագայթ և 10 մմ երկարությամբ LN:Fe նմուշ: Լազերային ճառագայթը ուսայնակով կիզակետվել է բյուրեղի մուտքային նիստին՝ ապահովելով կիսաբարձրության վրա լրիվ լայնության (FWHM) 72 մկմ չափս, իսկ բյուրեղի ելքում ունեցել է FWHM-ի 124 մկմ չափս: Ուսումնասիրվել է (e)-բևեռացմամբ լազերային ճառագայթի պիրոէլեկտրական եղանակով ղեկավարվող ինքնակիզակետումը բյուրեղի ջերմաստիճանի աճի ռեժիմում: Պիրոէլեկտրական դաշտը որոշվում է $E_{Pr} =$

$(1/\epsilon_0 \epsilon_r) p \Delta T$ բանաձևով, որտեղ $p = dP_z/dT$ -ը պիրոէլեկտրական գործակիցն է, ϵ_0 -ը և ϵ_r -ը՝ համապատասխանաբար վակուումային և հարաբերական դիէլեկտրիկ հաստատունները, իսկ ΔT -ն՝ T ջերմաստիճանի փոփոխությունը: 25 °C-ում LN բյուրեղի համար $p \approx 6 \times 10^{-5}$ կուլոն \cdot մ⁻² \cdot Կ⁻¹ և ջերմաստիճանի 30 °C-ով աճի ժամանակ E_{Py} -ն գնահատվում է 6×10^6 Վ/մ:

Նկար 5-ը ցույց է տալիս 10 մմ երկարությամբ LN:Fe բյուրեղի միջով անցնող 632.8 նմ ալիքի երկարությամբ, (e)-բևեռացմամբ, 0.5 մՎտ հզորությամբ ճառագայթի պրոֆիլի ժամանակային էվոլյուցիան, երբ բյուրեղի ջերմաստիճանն աճել է 10-ից 45 °C: Բյուրեղի ելքային նիստի վրա C-առանցքի երկայնքով ճառագայթի չափսը 120 մկմ-ից ($t = 0$) նվազում է մինչև 53 մկմ ($t = 27$ վ): Կենտրոնացած ճառագայթի ինտենսիվությունը ցույց է տալիս ~ 2.5 անգամ աճ:

Պիրոէլեկտրական էֆեկտի օժանդակությամբ ~ 50 մկմ տրամագծով «վառ» սոլիտոնի արդյունավետ ձևավորումը և նրա կորագիծ հետագծով ~ 140 մկմ շեղումը դիտվել են լազերային ճառագայթի (e)-բևեռացման և բյուրեղի ջերմաստիճանի 30 °C-ով փոփոխության համար: Տվյալ փորձում բյուրեղը տաքացվել է ներքևի նիստից ($-C$ բևեռ)՝ 10-45 °C տիրույթում: Արդյունքում բյուրեղի վերին նիստը (+C բևեռ) 4-5 °C-ով ավելի ցածր ջերմաստիճան է ունեցել:

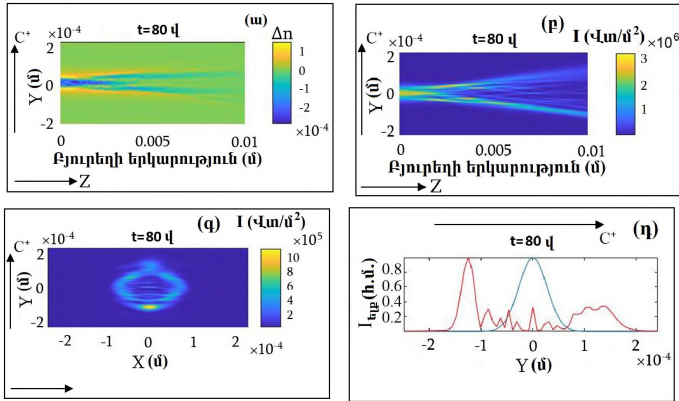
Ինքնակիզակետման ֆիզիկական բացատրությունը հիմնված է իրար նկատմամբ հակառակ ողղված լույսով ինդուկտված E_{Pv} ֆոտովոլտայիկ դաշտի և E_y պիրոէլեկտրական դաշտի հարաբերական մեծությունների վրա:

Ինքնակիզակետված ճառագայթի կորագիծ տարածումը կապված է բյուրեղի ներքևի և վերին նիստերի 4-5 °C ջերմաստիճանների տարբերության հետ, որն ապահովում է 4.4 մմ հաստությամբ բյուրեղի C-առանցքով 10³ °C/մ տարածական գրադիենտ: Այս արժեքը բավարար է արդյունքում LN:Fe բյուրեղում ստացված բեկման ցուցչի բաշխման մեջ ասիմետրիա մտցնելու համար, որի գագաթը $-C$ բևեռում T -ի և ΔT -ի ավելի մեծ արժեքների շնորհիվ շեղված կլինի բյուրեղի C⁺-առանցքին հակառակ, որն էլ իր հերթին կթելադրի ինքնակիզակետված ճառագայթի շեղումը բյուրեղի C⁺-առանցքին հակառակ:

Հենքային ֆիզիկական պրոցեսների վերլուծության համար իրականացվել են պիրոէլեկտրական երևույթի առկայությամբ LN:Fe բյուրեղի միջով լազերային ճառագայթի տարածման թվային հաշվարկներ՝ հաշվի առնելով նաև բյուրեղի C-առանցքի երկայնքով տարածական ջերմաստիճանային գրադիենտը: Փորձի հետ լավ համընկնում է ստացվել մուտքային փնջի 10 մկտ հաշվարկային հզորության համար: Հաշվարկներում փնջի ավելի մեծ ինտենսիվության կիրառումն տրամաբանական է, քանի որ LN բյուրեղի ներսում ճառագայթը բաժանվում է ավելի նեղ մանրաթելերի, որն էլ ապահովում է ավելի բարձր լույսի ինտենսիվություն:

Պրոցեսի վաղ փուլում ֆոտովոլտայիկ երևույթը գերակա է և բավարարվում է $E_{Py} < E_{Pv}$ պայմանը: Սա բերում է լուսային փնջի բաժանմանը հավասար հզորություններով երկու ենթափնջերի, որոնք C-առանցքի երկայնքով համաչափ են մուտքային փնջի կենտրոնին՝ $E_{Py} = 0$ դեպքում: Հետագա փուլում բյուրեղի ջերմաստիճանի ավելի մեծ ΔT փոփոխության արդյունքում պիրոէլեկտրական դաշտի աճը հանգեցնում է $E_{Py} > E_{Pv}$ պայմանին: Սա բերում է լուսավորված հատվածներում բեկման ցուցչի դրական փոփոխության, և, այդպիսով, տեղի է ունենում կիզակետման երևույթը: Թվային հաշվարկների արդյունքները $t = 80$ վ-ի համար տրված են Նկար 6-ում: Բեկման ցուցչի հաշվարկված Δn փոփոխությունը

տրված է Նկար 6(a)-ում: Բյուրեղի $-C$ բևեռի մոտ կենտրոնացած փունջը ցուցաբերում է ինքնակիզակետում և $-C$ -առանցքի ուղղությամբ շեղում: Բյուրեղի $+C$ նիստին մոտ տեղակայված փունջը դրսևորում է լայնացում և ինտենսիվության նվազում: Այսպիսով՝ հաշվարկները ցույց են տալիս ինքնակիզակետված օպտիկական ճառագայթի աստիճանական շեղում բյուրեղի C^+ -առանցքին հակառակ՝ հաստատելով փորձի արդյունքները (Նկար 5):

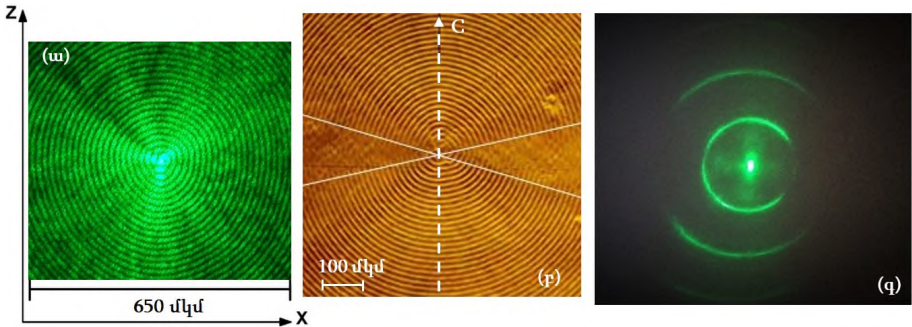


Նկար 6. Բեկման ցուցիչ Δn փոփոխությունը (ա) և լազերային ճառագայթի ինտենսիվության էվոլյուցիան (բ) 10 մմ երկարությամբ բյուրեղի միջով ճառագայթի տարածման երկայնքով YZ հարթության մեջ հաշվարկային $t=80$ վ պահին: XY լայնական հարթության մեջ ինտենսիվության պրոֆիլը (գ) և նրա բաշխումը Y (C) առանցքի ուղղությամբ (դ)՝ ժամանակի $t=80$ վ պահի համար: (դ)-ում կենտրոնական ուրվագիծը ցույց է տալիս ժամանակի $t=0$ պահին ելքային ինտենսիվության պրոֆիլը Y -ի երկայնքով:

Գլուխ 3-ում՝ «Արտաքին մագնիսական դաշտում ֆոտոռեֆրակտիվ $LiNbO_3:Fe$ բյուրեղում հոլոգրաֆիկական ցանցերի չքայքայող թեստավորման եղանակը և նրա պոլյարոնային մոդելը», մշակված և մանրամասն ուսումնասիրված է ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղներում ֆոտոնիկ կառուցվածքների չքայքայող օպտիկական թեստավորման նոր եղանակ արտաքին մագնիսական դաշտում:

Համակենտրոն օղակների կառուցվածքով և մեծ կոնտրաստ ունեցող միկրոմետրական չափսերի ռեֆրակտիվ ցանցերը $LN:Fe$ բյուրեղում գրառվել են չտարամիտվող բեսելյան փնջի տեխնիկայի միջոցով՝ օգտագործելով 532 նմ ալիքի երկարությամբ և 17 մՎտ հզորությամբ լազերային ճառագայթ: Բեսելյան փունջը ձևավորվել է 175° գագաթի անկունով կոնական ոսպնյակի՝ աքսիկոնի միջոցով: Թվային ֆոտոլցիկի միջոցով գրանցված բեսելյան փնջի ինտենսիվության լայնական բաշխումը՝ 15 մկմ պարբերությամբ, ցույց է տրված Նկար 7(ա)-ում: Փուլային մանրադիտակի միջոցով գրանցված 15 մկմ պարբերությամբ ռեֆրակտիվ ցանցի պատկերը տրված է Նկար 7(բ)-ում: Նկար 7(գ)-ն ցույց է տալիս 532 նմ ալիքի երկարությամբ, 17 մՎտ հզորությամբ և (e)-բևեռացմամբ թեստավորող գառայան փնջի միջոցով բեսելյան ցանցից ստացված հեռու դաշտի դիֆրակցիայի պատկերը: Դիտվել է մինչև 3 դիֆրակցիայի օղակ: Լուսային փնջով թեստավորման ընթացքում ուսումնասիրվել է գրառված ցանցերի կայունությունը ջնջման նկատմամբ 0 և 0,85 S մագնիսական դաշտերում: Այս նպատակով

օղակային ճեղքով դիաֆրագմայի միջոցով մնացած կարգերից առանձնացված առաջին կարգի դիֆրակցիայի օղակը ոսպնյակի օգնությամբ արտապատկերվել է հզորության չափիչի ֆոտոդիոդի վրա: Հզորության չափիչը միացվել է համակարգչին, որի օգնությամբ չափվել է դիֆրակտված լուսային օղակի հզորության ժամանակային էվոյուցիան:

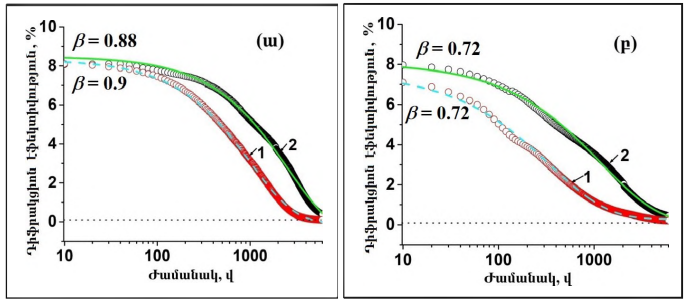


Սկար 7. (ա) Բեսելյան փնջի ինտենսիվության լայնական բաշխման փորձնականորեն չափված օղակաձև պատկերը, որն ունի 15 մկմ պարբերություն (բ) LN:Fe բյուրեղում գրառված բեսելյան ցանցի պատկերը՝ գրանցված փոկային մանրադիտակով: (գ) Բեսելյան ռեֆրակտիվ ցանցից ստացված 532 նմ թեստավորող գաուսյան փնջի հեռու դաշտի դիֆրակցիայի պատկերը:

Թեստավորման պրոցեսի ընթացքում բյուրեղը տեղադրվել է $127 \times 25.2 \times 43.5$ մմ³ չափսերով երկու հաստատուն մագնիսների միջև: Մագնիսների միջև 5.3 մմ ճեղքում ապահովվել է $\sim 1\%$ համասեռություն և $B = 0.85$ Տ մագնիսական դաշտ: Ապահովվել է B մագնիսական դաշտի, բյուրեղի C-առանցքի և թեստավորող ճառագայթի k ալիքային վեկտորի փոխադրահայացություն:

Ցանցի $\eta = P_{\text{diff}}/P_{\text{in}}$ դիֆրակցիոն էֆեկտիվության, որտեղ P_{diff} և P_{in} դիֆրակտված և ընկնող լույսի հզորություններն են, ժամանակային էվոյուցիայի չափումները թեստավորման ընթացքում կատարվել են $B = 0$ և $B = 0.85$ Տ մագնիսական դաշտերի համար: (օ)- և (ե)-բևեռացմամբ թեստավորող ճառագայթների համար η -ի կախումը ջնջման ժամանակից համապատասխանաբար ներկայացված են Սկարներ 8(ա)-ում և 8(բ)-ում:

1 (կարմիր շրջանակներ) և 2 (սև շրջանակներ) կորերը յուրաքանչյուր նկարում վերաբերվում են համապատասխանաբար $B = 0$ և $B = 0.85$ Տ մագնիսական դաշտերին: Դիֆրակցիոն էֆեկտիվության առավելագույն արժեքը $t = 0$ պահին չափվել է 8.2 %: Կորերը լավ ապրոքսիմացվել են $\eta(t) = \eta_{bg} = A \exp[-(t/\tau)^{\beta}]$ stretch էքսպոնենտային ֆունկցիայի միջոցով, որտեղ η_{bg} -ը դիֆրակցիոն էֆեկտիվության ֆոնային մակարդակն է, A -ն՝ հարմարեցման պարամետրը, τ -ն՝ ջնջման հաստատունը, իսկ β -ն՝ stretching գործակիցը: Ապրոքսիմացումների կորերը տրված են ընդհատուն կամ հոծ կորերով՝ համապատասխանաբար $B = 0$ և $B = 0.85$ Տ-ի համար: β գործակից արժեքները տրված են Սկարներ 8(ա)-ում և 8(բ)-ում համապատասխան կորերի մոտ:



Նկար 8. Y-կտրվածքով 0.05 կշռ.% LN:Fe բյուրեղում 17 մՎտ հզորությամբ, (a)- (ա) և (բ)- (բ) բևեռացմամբ թեստավորող գառայան փնջով չափված բետեյան ցանցի η դիֆրակցիոն էֆեկտիվության կախվածությունը ջնջման ժամանակից: Փորձով ստացված 1 կորերը (կարմիր շրջանակներ) ներկայացնում են $\eta(\theta)$ -ի ժամանակային էվոլյուցիան $B=0$ -ի համար, որոնց ապրոքսիմացումները տրված են ընդհատուն կորերով: 2 կորերը (սև շրջանակներ) կիրառված $B=0.85$ S մագնիսական դաշտի համար են, որոնց ապրոքսիմացումները տրված են հոծ կորերով: η_{max} -ի e անգամ նվազած մակարդակում չափված ջնջման հաստատունների արժեքներն են՝ (ա) 1012 վ և 2611 վ ($B=0$) և (բ) 350 վ և 1206 վ ($B=0.85$ S)՝ համապատասխանաբար (a)- և (բ)-բևեռացված թեստավորող ճառագայթների համար:

Չափումները ցույց են տվել ռեֆրակտիվ ցանցի ջնջման τ գործակցի 3.4 անգամ մաքսիմալ աճ՝ մագնիսական դաշտի առկայությամբ թեստավորման ընթացքում՝ (350 վ-ից երբ $B=0$ մինչև 1206 վ երբ $B=0.85$ S), (բ)-բևեռացմամբ թեստավորող ճառագայթի համար: Ժամանակի ընթացքում η դիֆրակցիոն էֆեկտիվության *stretched* էքսպոնենտային ֆունկցիայի միջոցով ապրոքսիմացվող արտահայտիչ նվազումը ցույց է տալիս մագնիսադինադրության երևույթի էական ներդրումը ֆոտոհաղորդականության մեջ: Մագնիսադինադրությունը պայմանավորված է փոքր պոլյարոնների թռիչքային լիցքատեղափոխման մեխանիզմով: Սա հանգեցնում է մագնիսական դաշտում σ ֆոտոհաղորդականության նվազման, որն էլ իր հերթին բերում է լիցքերի տարածական բաժանման էլեկտրական դաշտի և, հետևաբար, ռեֆրակտիվ ցանցի քայքայման ժամանակի աճի՝ համաձայն $\tau = \varepsilon \varepsilon_0 / \sigma$ -ի բանաձևի, որտեղ ε_0 -ը և ε -ը համապատասխանաբար վակուումային և հարաբերական դիէլեկտրական հաստատուններն են:

Այսպիսով՝ ֆոտոնիկ կառուցվածքների օպտիկական թեստավորումը զգալիորեն օպտիմալացվում է մագնիսական դաշտի կիրառմամբ, որը թույլ է տալիս մեծացնել լուսամակածված ֆոտոնիկ կառուցվածքների ժամանակային կայունությունը և ունի հեշտությամբ իրագործվելու առավելություն:

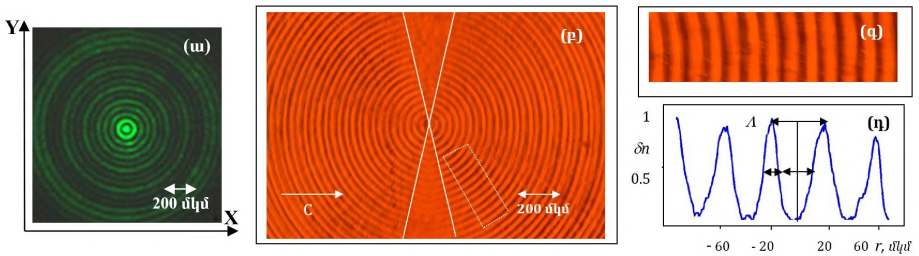
Գլուխ 4-

«Բետեյան փնջի մոտեցումը երկաթով լեզիրված լիթիումի նիոբատի բյուրեղում միկո- և նանոմասնիկների ֆոտովոլտայիկ գերման համար», առաջին անգամ օգտագործվել է չտարամիտվող բետեյան փնջի տեխնիկան ֆոտովոլտայիկ լավիտների մշակման համար:

Բետեյան փունջը ձևավորվել է կոնաձև ոսպնյակի՝ աքսիկոնի, միջոցով: Բետեյան փունջն ունի համակենտրոն օղակների կառուցվածքով պրոֆիլ (Նկար 9(ա)): Բացի մի քանի կենտրոնական մաքսիմումներից, բետեյան փնջի օղակներն ունեն մոտավոր պարբերական դասավորվածություն: Բետեյան փունջն ունի նաև

մեծ մոդուլյացիայի խորություն, ինտենսիվության մեծ կենտրոնացում կենտրոնական մաքսիմումում և յուրաքանչյուր օղակում, որը մեր փորձերի պայմանների համար գնահատվել է $\sim 2 \times 10^6$ Վտ/մ²:

Y-կտրվածքով ֆոտոռեֆրակտիվ LN:Fe բյուրեղը լուսավորվել է 532 նմ ալիքի երկարությամբ, 20-40 մՎտ հզորությամբ բեսելյան փնջով, որը գեներացնում է լիցքերի տարածական բաժանման ֆոտովոլտայիկ դաշտեր և էլեկտրաօպտիկան էֆեկտի միջոցով ստեղծում է ~ 40 մկմ պարբերությամբ բեսելյան ռեֆրակտիվ ցանց: Գրառող ճառագայթի կենտրոնական մաքսիմումում և յուրաքանչյուր օղակում $\sim 10^6$ Վտ/մ² մեծ ինտենսիվությունը բերում է տարածական լիցքերի դաշտի հագեցման՝ ցանցի գրառման 30 ր-ի ընթացքում: Լույսի մոդուլյացիայի մեծ խորությունը հանգեցնում է LN:Fe բյուրեղում մոդուլացված ֆոտովոլտայիկ դաշտի ձևավորման պրոցեսում ավելի բարձր կարգի հարմոնիկների ներդրման, ֆոտովոլտայիկ դաշտերի խիստ կենտրոնացման և ռեֆրակտիվ ցանցի սուր գագաթներով պրոֆիլի:



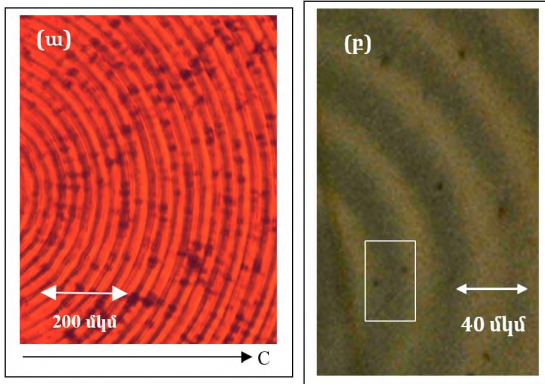
Նկար 9. (ա) 178° գագաթի անկյուն ունեցող աքսիկոնի միջոցով ձևավորված 40 մկմ պարբերությամբ բեսելյան փնջի ինտենսիվության բաշխումը լայնական կտրվածքում: (բ) փուլային մանրադիտակով դիտարկված բեսելյան ցանցի պատկերը LN:Fe բյուրեղում: Խաչված գծերը նշում են Y-կտրվածքով բյուրեղի այն տիրույթները, որտեղ ցանցը գրառված է մեծ կոնտրաստով (ձախ և աջ մասեր) և պրակտիկորեն չի գրառված (վերևի և ներքևի մասերը): (գ) ցույց է տալիս (ա)-ում ուղղանկյունով նշված ցանցի խոշորացված պատկերը: (դ) Բեսելյան ցանցի բեկման ցուցչի Δn փոփոխության բաշխումը (հարաբերական միավորներով) r ռադիալ ուղղությամբ:

Նկար 9(բ)-ն ցույց է տալիս փուլային մանրադիտակով դիտարկված բեսելյան ցանցի պատկերը: Նկար 9(գ)-ն ներկայացնում է Նկար 9(բ)-ում ուղղանկյունով նշված ցանցի շերտագծի խոշորացված պատկերը, իսկ Նկար 9(դ)-ն ցույց է տալիս համապատասխան բեկման ցուցչի բաշխումը ցանցի ռադիալ ուղղությամբ, որն ունի սուր գագաթով մաքսիմումներ և ավելի լայն մինիմումներ: Բեսելյան փնջի մոտեցումն ապահովում է բարձր կոնտրաստով քվադրպարբերական, 2D բաշխմամբ ֆոտովոլտայիկ դաշտի ստեղծում բյուրեղի ծավալում ու մակերևույթի մերձակայքում:

Անհամասեռ էլեկտրական դաշտերն առաջացնում են դիէլեկտրաֆորետիկ ուժեր բյուրեղի մակերևույթի մոտ գտնվող միկրո- և նանոմասնիկների վրա, որոնք որոշվում են ∇E^2 էլեկտրական դաշտի գրադիենտով: Դիէլեկտրաֆորետիկ ուժերը հնարավորություն են տալիս բյուրեղի մակերևույթի վրա միկրո- և նանոմասնիկների բարձրորակ 2D պատկերավորում (patterning) :

Իրականացվել է քննարկվել է LN:Fe բյուրեղի մակերևույթին ստեղծված ֆոտովոլտայիկ դաշտերի միջոցով CaCO_3 դիէլեկտրիկ միկրոմասնիկների, ինչպես նաև գլիցերինի լուծույթում գտնվող արծաթի նանոմասնիկների գերումը:

1-5 մկմ չափսերի CaCO_3 միկրոմասնիկների գերումը բյուրեղի մակերևույթին ուսումնասիրվել է օպտիկական փուլային մանրադիտակի միջոցով: Մինչ մանրադիտակով դիտարկումը, օդի հոսքի միջոցով հեռացվել են այն մասնիկները, որոնք ամուր չեն կապել բյուրեղի մակերևույթին: Մանրադիտակով ստացված պատկերը բերված է Նկար 10(ա)-ում: CaCO_3 մասնիկները գրանցվել են որպես բեկման ցուցչի անհամասեռություններ (CaCO_3 -ի բեկման ցուցիչը $n = 1.66$ է 532 նմ-ի համար) LN:Fe բյուրեղում բեսելյան ռեֆրակտիվ ցանցի պատկերում ($n_e = 2.22$): Այսպիսի ուսումնասիրությունը թույլ է տալիս միաժամանակ գրանցել և՛ ռեֆրակտիվ ցանցի պատկերը, և՛ գերված միկրոմասնիկները:



Նկար 10. (ա) Բյուրեղի մակերևույթին բեսելյան ցանցի բեկման ցուցչի մաքսիմումներում գերված CaCO_3 միկրոմասնիկների մանրադիտակով ստացված պատկերի հատվածը: (բ) Գլիցերինում դիսպերսված ~100 նմ իրական չափսերով Ag նանոմասնիկների (սև բծեր) գերման պատկերը LN:Fe բյուրեղի մակերևույթին՝ բեսելյան ցանցի առկայության դեպքում: Ուղղանկյունն առանձնացնում է արծաթի երկու նանոմասնիկներ, որոնք տեղաբաշխված են բեսելյան օղակի տարբեր եզրերին:

Մանրադիտակով ստացված մեծ կոնտրաստով պատկերները ցույց են տալիս միկրոմասնիկների դասավորվածությունը բացառապես հոլոգրամի օղակների երկայնքով (Նկար 10(ա)): CaCO_3 միկրոմասնիկները գերվել են բեսելյան ցանցի բեկման ցուցչի մաքսիմումներում, այսինքն՝ գեներացված ֆոտովոլտայիկ դաշտի մաքսիմումներում: Մանրադիտակի պատկերում գերված միկրոմասնիկների հետքերն առանձին մասնիկներ չեն, այլ, ավելի շուտ, մասնիկների ~30-40 մկմ չափսերի կլաստերներ:

Նկար 10(բ)-ն ցույց է տալիս գլիցերինում դիսպերսված Ag նանոմասնիկների գերումը LN:Fe բյուրեղի մակերևույթին՝ ֆոտովոլտայիկ էֆեկտի միջոցով բյուրեղում գրառված բեսելյան ցանցի առկայությամբ: Պատկերն ստացվել է անդրադարձման ռեժիմում աշխատող օպտիկական մանրադիտակի միջոցով: Ag մասնիկները երևում են որպես սև բծեր ցանցի օղակների էքսրեսումներում: Անդրադարձման ռեժիմում օղակների հանդես գալը կապված է ֆոտովոլտայիկ դաշտերի ազդեցության արդյունքում գլիցերինի շերտավորման հետ: Նանոմասնիկները տեղաբաշխվել են հիմնականում բեսելյան ցանցի օղակների սահմանների մոտ:

Մշակվել է LN:Fe բյուրեղի մակերևույթի մոտ բետեյան փնջով ինդուկտված ոչ սինուսոիդալ E էլեկտրական դաշտի բաշխվածության և LN:Fe բյուրեղի մակերևույթի մոտ ստեղծված համապատասխան $F_{DEP} \sim \nabla E^2$ դիէլեկտրաֆորետիկ ուժերի ֆիզիկական մոդելը, որը ճշգրտորեն բացատրում է փորձով ստացված արդյունքները:

Միկրո- և նանոմասնիկների գերման և ղեկավարման ֆոտովոլտայիկ մոտեցումը հեռանկարային է ֆոտոնիկայի, ինտեգրալ օպտիկայի և կենսատեխնոլոգիայի կիրառություններում:

Եզրակացության մեջ ամփոփված են 1-4 գլուխներում նկարագրված արդյունքները:

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

1. Մշակվել է նոր մոտեցում ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում մեկ գաուսյան փնջի միջոցով կանոնավոր 2D օպտիկական պատկերների ձևավորման և, միաժամանակ, քվազիբյուրեղային ռեֆրակտիվ կառուցվածքի գրառման համար [1, 4, 8, 11-13]: Ստացված արդյունքները նոր հեռանկար են բացում մեկ լազերային ճառագայթի օգտագործմամբ օպտիկական հոլոգրաֆիայի մշակման և զարգացման համար: Մշակվել է ֆիզիկական մոդելը և կատարվել են թվային հաշվարկներ, որոնք լավ համընկնում են փորձով ստացված արդյունքների հետ:
2. Իրականացվել է պիրոէլեկտրական դաշտի միջոցով ղեկավարվող կորագիծ հետազոծով օպտիկական սոլիտոնի գեներացումը ֆոտոռեֆրակտիվ LN:Fe բյուրեղում [3, 6, 8]: LN:Fe բյուրեղում տարածական սոլիտոնով հարուցված կորագիծ հետազոծով և երկար կյանքի տևողությամբ ալիքատարերը հեռանկարային են օպտիկական ինֆորմացիայի հասցեագրված փոխանցման համար: Փորձով ստացված արդյունքները լավ համընկնում են թվային հաշվարկների հետ:
3. Մշակվել է ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղներում հոլոգրաֆիական եղանակով գրառված ռեֆրակտիվ կառուցվածքների չքայքայող օպտիկական թեստավորման նոր եղանակ՝ մագնիսական դաշտի կիրառմամբ [5, 9, 10]: Մագնիսական դաշտում փոքր պոլյարոնների թռիչքաձև տեղաշարժման վրա հիմնված մագնիսադինամիության երևույթը բացատրում է ջնջման ժամանակի աճը: Մագնիսական դաշտի կիրառմամբ ֆոտոնիկ կառուցվածքների չքայքայող օպտիկական թեստավորման նոր եղանակը խոստումնալից է ֆոտոնային սարքերում կիրառությունների համար և ունի հեշտությամբ իրագործվելու առավելություն:
4. Առաջարկվել և իրականացվել է չտարամիտող բետեյան փնջի մոտեցումը ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղի մակերևույթի վրա միկրո- և նանոօբյեկտների արդյունավետ ֆոտովոլտայիկ գերման և ղեկավարման համար [2, 7]: Բարձր կոնտրաստով 2D ֆոտովոլտայիկ դաշտը, որն առաջանում է LN:Fe բյուրեղի մակերևույթի վրա օպտիկական բետեյան փնջի ազդեցությամբ, ապահովում է դիէլեկտրիկ CaCO_3 միկրոմասնիկների և գլիցերինում դիսպերսված Ag նանոմասնիկների արդյունավետ գերումը՝ բետեյան ցանցի համակենտրոն օղակների երկայնքով: Բետեյան փնջի տեխնիկայի և LN:Fe բյուրեղի վրա հիմնված ֆոտովոլտայիկ լավիտները խոստումնալից են *lab-on-a-chip* սարքերի մշակման և իրական ժամանակում տարբեր միկրո- և նանոօբյեկտների գերման և ղեկավարման ուսումնասիրությունների համար, որոնք լայն հեռանկարներ ունեն ֆոտոնիկայի, ինտեգրված օպտիկայի և կենսատեխնոլոգիայի

ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

1. L. Tsarukyan, A. Badalyan, F. Devaux, M. Chauvet, R. Drampyan, “Generation of regular optical patterns and photonic structures by a single Gaussian beam in a photorefractive LiNbO₃:Fe crystal”, *Opt. Com.* **478**, pp. 126396- 1-6 (2021).
2. L. Tsarukyan, A. Badalyan, R. Hovsepyan, R. Drampyan “Bessel beam approach for photovoltaic trapping of micro- and nanoparticles on Fe-doped lithium niobate crystal”, *Optics & Laser Technology* **139**, pp. 106949- 1-9 (2021).
3. L. Tsarukyan, A. Badalyan, F. Devaux, M. Chauvet, R. Drampyan “Pyroelectric-controlled bending of a self-tapped optical beam in a photorefractive iron doped lithium niobate crystal”, *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials* **29**(3), pp. 2150003 -1-19 (2021).
4. L. Tsarukyan “Laser beam break-up to regular optical patterns and refractive structures formation in a photorefractive lithium niobate crystal”, *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)* **56**(3), pp. 184-191 (2021)
5. L. Tsarukyan, R. Hovsepyan, R. Drampyan, “Polaron Approach for Nondestructive Readout of Holograms in Photorefractive LiNbO₃:Fe Crystal in an External Magnetic Field”, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications (PNFA)* **40**, pp. 100793- 1-7 (2020).
6. L. M. Tsarukyan, A. M. Badalyan, R. Kh. Drampyan, “Optical soliton generation in a photorefractive Fe-doped lithium niobate crystal by a pyroelectric effect”, *Proc. SPIE*, **11818**, 18180K- 1-7 (2021).
7. L. M. Tsarukyan, A. M. Badalyan, R. K. Hovsepyan, R. Kh. Drampyan, “Trapping of dielectric microparticles on iron doped lithium niobate crystal by optical Bessel beam induced space-charge field”, *Proc. SPIE*, **11367**, 113671B- 1-9 (2020).
8. L. M. Tsarukyan, A. M. Badalyan, R. K. Hovsepyan, R. Kh. Drampyan, “Regular optical patterns formation and pyroelectric controlled beam self-localization in a photorefractive LiNbO₃:Fe crystal”, *Proc. SPIE* , **11030**, 1103017- 1-10 (2019).
9. L. Tsarukyan, R. Hovsepyan, R. Drampyan, “Small polarons model for nondestructive testing of holograms in LiNbO₃:Fe crystal in external magnetic field”, *Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS, OSA Technical Digest, paper JTu3A.16* (2019).
10. L. M. Tsarukyan, P. A. Mantashyan, R. K. Hovsepyan, R. Kh. Drampyan, “Nondestructive readout of Bessel-like photonic structures in an external magnetic field”, *Book of Abstracts, 6th International Symposium “Optics and its Applications” (OPTICS-2018)*, p. 53, Trento, Italy (2018).
11. L. M. Tsarukyan, A. M. Badalyan, R. Kh. Drampyan, “Regular light patterns formation by a Gaussian beam in a photorefractive LiNbO₃:Fe crystal”, *Book of Abstracts, Laser Physics 2018*, pp. 26-27, Ashtarak, Armenia (2018).
12. L. M. Tsarukyan, A. Badalyan and R. Kh. Drampyan, “Pattern formation in a laser beam propagating through a LiNbO₃:Fe crystal”, *Book of Abstracts , International OSA Student Network (IONS-2018)*, p. 33, Yerevan, Armenia (2018).
13. R. Drampyan, L. Tsarukyan, A. Badalyan “Regular optical patterns formation by a single Gaussian beam passed through a photorefractive LiNbO₃:Fe crystal”, *Abstracts, International Symposium Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies 2019 (FLAMN-19)*, p.75, Saint-Petersburg, Russia (2019).

NOVEL METHODS FOR PHOTONIC STRUCTURES RECORDING AND TESTING, GENERATION OF PYROELECTRIC OPTICAL SOLITON AND MICRO- AND NANOPARTICLES PHOTOVOLTAIC TRAPPING BY A BESSEL BEAM

Tsarukyan Lusine Mkrtich

SUMMARY

The PhD thesis is devoted to the study of the novel nonlinear optical processes in a photorefractive lithium niobate (LN) crystal and their applications.

The objectives of the dissertation are 1) the development of a novel single beam approaches in optical holography, 2) the generation of spatial optical solitons with controlled bending trajectories, 3) the elaboration of a new method for nondestructive readout of the holograms, 4) the design of photovoltaic tweezers by the use of a Bessel beam.

The experiments were performed with the use of 0.03 wt% and 0.05 wt% iron doped LN (LN:Fe) crystals having pronounced photorefractive and pyroelectric properties. For realization of the tasks 1 and 2 a single mode laser beam at 632.8 nm wavelength and with the maximum power of 10 mW was used. In the experiments, corresponding to 3rd and 4th tasks, a cw single-mode green laser beams at 532 nm wavelength and with the powers of 17 mW and 40 mW, respectively, were used. The investigations in tasks 3 and 4 were performed with the wide use of the nondiffracting Bessel beam technique which provided a good advantage for the formation of high-contrast holographic gratings.

The following main results of the thesis can be stated:

1. A novel single beam approach for simultaneous generation of the regular 2D optical patterns by a single Gaussian beam and recording of a quasi-crystalline refractive lattice structure in the photorefractive crystal is elaborated [1, 4, 8, 11-13]. Experimental results obtained for laser beam power variation in the range of 0.5 to 10 mW demonstrate that the increase of input beam power essentially speeds-up the formation of the regular optical patterns from 211 to 8 s. The obtained results demonstrate a novel approach for optical holography with a single laser beam, which is promising for elaboration of compact photonic devices. The underlying physics is elaborated and numerical simulations are performed which are in good agreement with experimental results.

2. The pyroelectric controlled bending optical soliton generation in the photorefractive LN:Fe crystal is experimentally demonstrated [3, 6, 8]. The time evolution of the soliton formation shows approximately 2.4 times decrease of the optical beam diameter to $\sim 50 \mu\text{m}$ with simultaneous bending of $\sim 140 \mu\text{m}$ opposite to the C+-optical axis of the crystal. The long-living waveguiding channels generated in LN:Fe crystal by spatial solitons with pyroelectric controlled curvilinear trajectory are promising for targeted optical information transfer. The experimental results are in good agreement with numerical simulations.

3. A novel method of the magnetic field assisted nondestructive optical testing of refractive lattice structures recorded by holographic method in the photorefractive crystals is elaborated [5, 9, 10]. For LN:Fe crystal the results show up to a 3.4 times increase of lattice erasure constant from 350 s for e-polarized probe beam with 17mW power to 1206 s in an external magnetic field of 0.85 T. The magneto-resistance effect based on the model of small polarons hopping in a magnetic field explains the erasure time increase. The novel magnetic field assisted method of nondestructive testing of photonic lattice structures is promising for

applications in photonic devices and has the advantage to be simply feasible.

4. A Bessel beam approach is suggested and realized for effective photovoltaic trapping and manipulation of micro- and nano-objects on the surface of the photorefractive crystal [2, 7]. The high-contrast 2D photovoltaic field induced by optical Bessel beam with periodicity of 40 μm on the surface of LN:Fe crystal provides the effective trapping of 1-5 μm sized dielectric CaCO_3 microparticles and of 100 nm sized Ag nanoparticles in glycerin suspension along the concentric rings of the Bessel lattice. The photovoltaic tweezers, based on the Bessel beam technique and LN:Fe crystal, are promising for the elaboration of the lab-on-a-chip devices for the study of trapping and manipulation of different micro- and nano-objects in real time with wide perspectives in photonics, integrated optics and biotechnology.

The obtained results have promising practical applications and were published in 5 peer-reviewed journals [1-5], as well as in SPIE proceedings [6-8], OSA Technical Digest [9] and in the International Conference' Books of Abstracts [10-13] listed in the references. The thesis consists of an Introduction, four Chapters, Conclusion, and Bibliography, contains 113 pages, 49 figures, 4 tables and 150 references.

НОВЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ СТРУКТУР, ГЕНЕРАЦИИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ И ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ПЛЕНЕНИЯ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ БЕССЕЛЕВА ПУЧКА

Царукян Лусине Мкртчевна

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Представленная диссертация посвящена исследованию новых нелинейно-оптических процессов в фоторефрактивном кристалле ниобата лития и их применениям.

Целями диссертации являются: 1) разработка нового подхода в оптической голографии с использованием одного лазерного луча, 2) генерация пространственного оптического солитона с криволинейной траекторией, 3) разработка нового метода неразрушающего оптического тестирования голограмм, 4) разработка фотовольтаических пинцетов с использованием Бесселева пучка.

Эксперименты были осуществлены с использованием кристаллов ниобата лития допированных железом с концентрациями 0.03 и 0.05 вес.% проявляющих выраженные фоторефрактивные и пироэлектрические свойства. Для реализации задач 1) и 2) использовался одномодовый лазер на длине волны 632.8 нм и с максимальной мощностью 10 мВт. В экспериментах, соответствующих задачам 3) и 4), использовались лазерные пучки с длиной волны 532 нм и с мощностями 17 и 40 мВт, соответственно. Исследования в задачах 3) и 4) были осуществлены с использованием техники Бесселева пучка, которая обеспечивает формирование высококонтрастных голографических решеток.

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Разработан новый метод для генерации регулярных двумерных оптических изображений с помощью одного гауссова пучка и одновременной записи квазикристаллических рефрактивных решеток в фоторефрактивном кристалле [1, 4, 8,

11-13]. Экспериментальные результаты полученные для мощностей лазерного пучка в диапазоне 0.5- 10 мВт показывают, что увеличение мощности лазерного пучка ускоряет процесс формирования регулярных оптических изображений от 211 до 8 с. Полученные результаты демонстрируют новый подход в оптической голографии с использованием одного лазерного луча, которые перспективны для разработки компактных фотонных устройств. Разработана основополагающая физика процесса и проведено численное моделирование, которое хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

2. Экспериментально реализована контролируемая пироэлектрическим эффектом генерация оптических солитонов с криволинейной траекторией в фоторефрактивном кристалле LN:Fe [3, 6, 8]. Временная эволюция формирования солитона показывает уменьшение диаметра оптического пучка до 50 мкм с одновременным отклонением ~140 мкм в сторону противоположную S^+ -оптической оси кристалла. Долгоживущие волноводные каналы, сформированные в кристалле LN:Fe пространственными солитонами с пироэлектрически управляемой криволинейной траекторией, перспективны для адресной передачи оптической информации. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с численными расчетами.

3. Разработан новый метод неразрушающего оптического тестирования в магнитном поле рефрактивных решеток, голографически записанных в фоторефрактивных кристаллах [5, 9, 10]. Для кристалла LN:Fe результаты показывают увеличение постоянной стирания решеток до 3.4 раза от 350 с для e-поляризованного пробного пучка с мощностью 17 мВт до 1206 с во внешнем магнитном поле 0.85 Т. Эффект магнитосопротивления, основанный на прыжковом механизме малых поляронов в магнитном поле, объясняет увеличение времени стирания. Новый метод неразрушающего тестирования фотонных решеток в магнитном поле является перспективным для применений в фотонных устройствах и имеет преимущество простой реализации.

4. Предложен и реализован метод Бесселева пучка для эффективного фотовольтаического пленения и перемещения микро- и нанообъектов на поверхности фоторефрактивного кристалла [2, 7]. Продемонстрировано что высококонтрастное двумерное фотовольтаическое поле, индуцированное оптическим Бесселевым пучком с периодом 40 мкм на поверхности кристалла LN:Fe, обеспечивает эффективное пленение диэлектрических микрочастиц CaCO_3 с размерами 1-5 мкм и наночастиц Ag с размером 100 нм в глицериновой суспензии вдоль концентрических колец Бесселевой решетки. Фотовольтаические пинцеты, основанные на технике Бесселева пучка и кристалле LN:Fe, являются перспективными для разработки *lab-on-a-chip* устройств и исследования пленения и перемещения различных микро- и нанообъектов в реальном времени с широкими перспективами в фотонике, интегральной оптике и биотехнологии.

Полученные результаты имеют перспективные практические применения и опубликованы в 5 рецензируемых журналах [1-5], а также в Трудах SPIE [6-8], Техническом Сборнике OSA [9] и Абстрактах [10-13] Международных конференций. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии, содержит 113 страниц, 49 рисунков, 4 таблицы и 150 ссылок.