ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Սահակյան Յուրի Սարգսի

ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿ ԵՎ ՖԵՐՐՈՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐՈՒՄ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՈՒՂՂՄԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա.04.03 «Ռադիոֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2026

YEREVAN STATE UNIVERSITY

Yuri S. Sahakyan

INVESTIGATION OF OPTICAL RECTIFICATION OF LASER RADIATION IN DIELECTRIC AND FERROMAGNETIC NONLINEAR MEDIA

ABSTRACT

of dissertation for competition of scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) on specialty 01. 04. 03 – "Radiophysics"

YEREVAN - 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ ֆ.մ.գ.թ. Ա.Հ. Մակարյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ. գ. թ. Հ.Ս. Հարոյան

ֆ.մ.գ.թ. Հ.Վ. Բաղդասարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. հունիսի 6-ին ժամը 12:00-ին Երևանի պետական համալսարանում գործող 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Հասցեն՝ Ա. Մանուկյան 1,0025 Երևան:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. մայիսի 5-ին:

Մասնագիտական խորհրդի Գիտական քարտուղար ֆ.մ.գ.թ., դոցենտ Վ. Պ. Քալանթարյան

The theme of dissertation approved in the Yerevan State University.

Scientific advisor: PhD. of Science (Phys. And Math.), A. H. Makaryan

Official opponents: PhD. of Science (Tech), H. S. Haroyan

PhD. of Science (Phys. And Math.), H. V. Baghdasaryan

Leading organization: Institute for Physical Research, NAS of Armenia

The defense of the Dissertation should be held on the 6 June 2026 at 12:00 in the session of the specialized council physics 049 of the Yerevan state University.

Address: A. Manoogian 1, Yerevan 0025, Armenia.

It is possible to familiarize with the Dissertation in library of YSU.

The abstract is dispatched at May 5 2026

Scientific secretary of the Specialized Council Dr. V. P.Kalantaryan

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Տերահերցային տիրույթը զբաղեցնում է միլիմետրական և ինֆրակարմիր սպեկտրների միջանկյալ հատվածը և կարևոր է սպեկտրոսկոպիայի, ոչ դեստրուկտիվ վերահսկման, անվտանգության, կենսաբժշկական պատկերացման ու բարձր արագության կապի համար: Սակայն այդ տիրույթի աղբյուրների արդյունավետությունը և գործնական կիրառելիությունը շարունակում են մնալ սահմանափակ:

Ատենախոսությունն ուղղված է երկու փոխկապակցված խնդրի՝ ոչ գծային դիէլեկտրիկ բյուրեղներում օպտիկական ճառագայթումը ՏՀց ճառագայթման փոխակերպելու պայմանների բարելավմանը և թափանցիկ մագնիսակարգավորված միջավայրերում լազերային ճառագայթման արագագործ դետեկտման ու ՏՀց ճառագայթման գեներացման մեխանիզմների բացահայտմանը:

Ատենախոսության նպատակը

Ատենախոսության հիմնական նպատակն է ոչ գծային միջավայրերում (դիէլեկտրիկ և ֆերրոմագնիսական) լազերային ճառագայթման տարբերային հաճախության գեներացման և օպտիկական ուղղման առանձնահատկությունների հետազոտում՝ փոխակերպման արդյունավետության բարելավման ուղիների որոնման համար:

Գիտական նորույթը

- Ցույց է տրվել, որ ոչ գծային միադոմեն լիթիումի նիոբաթի բյուրեղում տարբերային հաճախության գեներացման (ՏՀԳ) սխեմայում երկու լազերային փնջերի իրար նկատմամբ անկյան փոփոխությամբ հնարավոր է էականորեն բարձրացնել ՏՀց ճառագայթման գեներացման արդյունավետությունը: Ցույց է տրվել, որ փնջերի միջև անկյան, դրանց շառավիղների և ՏՀց ալիքի երկարության հարաբերակցության օպտիմալ ընտրությամբ, ինչպես նաև ոչ գծային բյուրեղի չափի ու ձևի համապատասխան ընտրությամբ հնարավոր է ստանալ խիստ ուղղորդված ՏՀց ճառագայթում՝ ուղղորդվածության դիագրամի և սպեկտրալ բաղադրության կառավարման հնարավորությամբ:
- Իրականացվել է ոչ գծային միադոմեն լիթիումի նիոբաթի բյուրեղում ՏՀԳ սխեմայով գեներացված ՏՀց ճառագայթման համակարգչային մոդելավորում: Առաջին անգամ մոդելավորվել են հարթ զուգահեռ ոչ գծային

ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏԻ ԳՐԱԴԱՐԱՆ
Библиотека Физического Института
113/3 11. 05. 2026թ.

բյուրեղում ՏՀց ճառագայթման գեներացման և բյուրեղից դուրս բերման պրոցեսը ելքում օգտագործելով փուլային դիմակ:

- Փորձնականորեն գրանցվել է նանովայրկյանային տևողությամբ լազերային իմպուլսների դետեկտում թափանցիկ ֆերրոմագնիսական բյուրեղների միջոցով՝ սենյակային ջերմաստիճանում: Ցույց է տրվել, որ դետեկտված ազդանշանի ամպլիտուդն էականորեն կախված է արտաքին մագնիսական դաշտի մեծությունից, մագնիսացման կորի տեսքից, ինչպես նաև գծային բևեռացմամբ լազերային ճառագայթման բևեռացման ուղղության և ֆերրոմագնիսական նմուշի մագնիսացման ուղղության միջև կազմած անկյունից:
- Փորձնականորեն ուսումնասիրվել և ցույց է տրվել ՏՀց ճառագայթման գեներացման հնարավորությունը թափանցիկ ֆերրոմագնիսական նյութում: Հաստատվել է, որ ֆերրոմագնետիկ միջավայրում մագնիսական մոմենտի ոչ գծային կախվածությունը արտաքին մագնիսական դաշտից կարող է հանդիսանալ ՏՀց ճառագայթման գեներացման արդյունավետ մեխանիզմ:

Գործնական արժեքը

Ոչ գծային միադոմեն լիթիումի նիոբատի բյուրեղում ՏՀԳ սխեմայով ստացված ուղղորդված ՏՀց ճառագայթումը, ինչպես նաև հարթ զուգահեռ եզրերով բյուրեղում գեներացման տեսական մոդելավորման արդյունքները կարող են նպաստել հեռահաղորդակցության, անվտանգության, նյութերի սպեկտրոսկոպիկ հետազոտությունների, կենսաբժշկական պատկերման և նյութերի անվնաս հետազոտությունների համար նախատեսված ՏՀց համակարգերում:

Թափանցիկ ֆերրոմագնիսական նյութերում լազերային ճառագայթման օպտիկական ուղղման հետազոտությունների արդյունքները կարող են օգտագործվել ԻԿ և օպտիկական տիրույթների հզոր լազերային իմպուլսների արագագործ դետեկտորների մշակման, ինչպես նաև ՏՀց իմպուլսների գեներացման համար:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Տարբերային հաճախության ալիքի երկարության կարգի լազերային փնջերի փոխակերպման արդյունավետությունը կտրուկ աճում է (մոտ 10^3 անգամ) փուլային սինքրոնիզմն ապահովող ոչ կոլինեարության ~10^{-2} ռադիան անկյան դեպքում:
2. Լազերային իմպուլսների օպտիկական ուղղման պայմաններում ինտենսիվության համասեռ բաշխումով ՏՀց ճառագայթում կարելի է ստանալ՝ լիթիումի նիոբատի բյուրեղի մի առանձնացված (ուղղանկյունաձև) հատվածի ոչ գծային ընկալունակության պարբերական բևեռացման միջոցով:

3. Ելքային մակերևույթը փուլային կամ ամպլիտուդային դիմակով պատելու դեպքում հարթ զուգահեռ եզրերով ոչ գծային բյուրեղում գեներացված, Չերենկովի անկյան տակ տարածվող ՏՀց ճառագայթման ելքային արդյունավետությունը հասնում է մինչև 50%:
4. $Y_3Fe_5O_{12}$ նռնաքարի և $YFeO_3$ օրթոֆերրիտի միաբյուրեղների հիման վրա իրականացվում է կարճ (~20 նվրկ տևողությամբ) լազերային իմպուլսների դետեկտում:
5. Մագնիսացման հետևանքով $Y_3Fe_5O_{12}$ բյուրեղում ֆեմտովայրկյանային լազերային իմպուլսների օպտիկական ուղղման արդյունքում գրանցվել է ՏՀց ճառագայթում:

Աշխատանքի ներկայացումը

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները ներկայացվել են Երևանի պետական համալսարանի Ֆիզիկայի ինստիտուտի ու Ռադիոֆիզիկայի և հեռահաղորդակցության ամբիոնի սեմինարներում և մի քանի միջազգային գիտաժողովներում:

Հրատարակված աշխատանքների ցանկը

1. Makaryan A. H. and Sahakyan Y. S. **2021** Investigation of the Efficiency of Terahertz Radiation Generation in a Nonlinear Crystal Depending on the Parameters of Exciting Laser Beams *J. Contemp. Phys.* **56** 280–4
2. Baghdasaryan D. H., Makaryan A. H., Sahakyan Y. S. and Tadevosyan V. R. 2022 Detection of amplitude-modulated laser radiation in transparent orthoferrite *IET Conf. Proc.* **2022** 60–2
3. Baghdasaryan D. H., Gevorkyan G. S., Makaryan A. H., Sahakyan Y. S. and Tadevosyan V. R. **2023** Investigation of Nanosecond Laser Pulses Optical Detection in Ferrimagnetic Crystals Y3Fe5O12 and YFeO3 *J. Contemp. Phys.* **58** 184–7
4. Baghdasaryan D., Makaryan A., Mekhitarian V., Poghosyan A. and Sahakyan Y. Generation of THZ pulses in the transparent ferromagnetic materials by optical rectification of ultrafast laser pulses *IET Conf. Proc.* **2024** 79–81
5. Sahakyan Y., Avetisyan Yu., Kirakosyan A., Makaryan A. and Tadevosyan V. 2025 Generation of THz radiation in a plane-parallel artificial PPLN crystal with a THz diffraction grating in output *IET Conf. Proc.* **2024** 42–4
6. Sahakyan Yu. **2025** Generation of THz pulses with a uniform wavefront in a PPLN crystal *Armenian Journal of Physics* **18** (3) 38–42

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

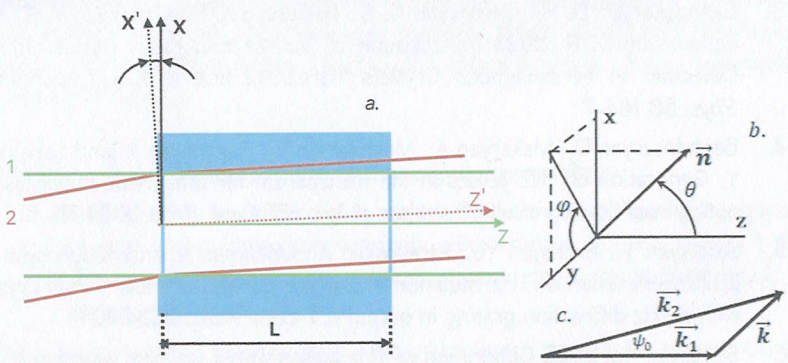
Առաջաբանի մեջ հիմնավորված է աշխատանքի արդիականությունը, ձևակերպված են նպատակներն ու խնդիրները, ներկայացված են աշխատանքի գիտական նորույթը և գործնական արժեքը: Ձևակերպված են պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները:

Ատենախոսության առաջին գլուխը նվիրված է լազերային ճառագայթման տարբերային հաճախության գեներացման արդյունավետության հետազոտմանը, երբ լազերային փնջերի լայնական չափերը համեմատելի են գեներացվող տարբերային հաճախության ալիքի երկարության հետ:

Ներկայացված են ոչ գծային բյուրեղներում ՏՀg ճառագայթման ստացման եղանակները իմպուլսային լազերային ճառագայթման փոխակերպման՝ ՏՀԳ և ՕՈւ մեթոդներով, և արդյունավետ փոխակերպման համար անհրաժեշտ պայմանները՝ օպտիկական և ՏՀg տիրույթներում փոքր կլանմամբ և մեծ քառակուսային ոչ գծայնությամբ բյուրեղների առկայություն, ինչպես նաև փուլային սինքրոնիզմի ապահովման հնարավորություն:

§1.2-ում ներկայացված է ալիքային հավասարումը ոչ գծային միջավայրում՝ սահմանափակ լայնական չափերով, գծորեն բևեռացված գաուսյան լազերային փնջերի դեպքում, երբ դրանք տարածվում են միմյանց նկատմամբ անկյան տակ (տես Նկ. 1):

§1.3-ում բերված է ալիքային հավասարման լուծումը տրված դաշտերի մոտավորությամբ: Ցույց է տրվել, որ փոքր շառավիղներով փնջերի դեպքում, շնորհիվ այն բանի, որ անկյունային սպեկտրները լայն են, գտնվում են սինքրոն



Նկ. 1. a. ω_1 և ω_2 հաճախություններով լազերային փնջերի տարածումը բյուրեղում; b. ՏՀg ճառագայթման ուղղությունը xyz կոորդինատական համակարգում; c. Ալիքային վեկտորների փոխդասավորվածությունը վեկտորական սինքրոնիզմի ապահովման դեպքում

փոխազդող սպեկտրալ բաղադրիչներ, մինչդեռ լայն փնջերի դեպքում անկյունային սպեկտրները կենտրոնանում են փնջերի տարածման ուղղության շուրջ և փոխակերպման արդյունավետությունը նվազում է:

Փոխազդող ալիքային դաշտերը ներկայացված են իրենց անկյունային սպեկտրների միջոցով [1].

$$A_i(\alpha,\beta,z,t) = \frac{1}{(2\pi)^2}\iint_{-\infty}^{\infty} E_i(x,y,z,t)\, e^{-i(\alpha x+\beta y)}dxdy \qquad (1)$$

Այսպիսի ներկայացման շնորհիվ հավասարման լուծման արդյունքում անմիջապես կստացվեն գեներացվող ՏՀg ճառագայթման հիմնական պարամետրերը՝ ինտենսիվությունը և անկյունային բաշխումը:

ՏՀԳ դաշտի անկյունային սպեկտրի համար ալիքային հավասարումն ընդունում է հետևյալ տեսքը [1]:

$$\frac{d^2A(\alpha,\beta,z,t)}{dz^2} + g^2A(\alpha,\beta,z,t) = -\Upsilon F(\alpha,\beta,z,t) \qquad (2)$$

որտեղ $\alpha = k\cdot sin\vartheta\cdot cos\varphi$, $\beta = k\cdot sin\vartheta\cdot sin\varphi$, $g = \sqrt{k^2-\alpha^2-\beta^2}$, $\Upsilon = 4\pi\chi(\frac{\Omega}{c})^2$; $k = n\frac{\Omega}{c}$; $\Omega = \omega_1-\omega_2$ տարբերային հաճախությունն է, ω_1 և ω_2 -ը գրգռող ալիքների հաճախությունները, իսկ $\chi_{ef} = e_3\hat{\chi}e_1e_2$ – միջավայրի արդյունարար ոչ գծային ընկալունակությունը:

$F(\alpha,\beta,z,t)$ ֆունկցիան որոշվում է գրգռող ալիքների անկյունային սպեկտրների փաթույթով.

$$F(\alpha,\beta,z,t) = \iint_{-\infty}^{\infty} A_1(\bar{\varkappa}_1,z,t)\, A_2^*(\bar{\varkappa}_2,z,t)\delta(\varkappa+\bar{\varkappa}_1-\bar{\varkappa}_2)d\varkappa_1 d\varkappa_2 \qquad (3)$$

որտեղ $d\bar{\varkappa}_j = d\alpha_j d\beta_j$

Լուծելով (2) հավասարումը «տրված դաշտերի» մոտավորությամբ, ստացվել է արտահայտություն

$$A(\alpha,\beta,l) = H\frac{l}{g+b}\frac{e^{-\frac{i(g+b)l}{2}}}{\sqrt{1+cos^2\Psi}}\, sinc\frac{l(b-g)}{2}\cdot exp\left[-\frac{r^2(\alpha-k_2sin\Psi)^2}{4(1+cos^2\Psi)} - \frac{r^2\beta^2}{8}\right] \qquad (4)$$

որտեղ $H = -i\gamma\frac{r^2}{2\pi}E_{10}E_{20}$, $sinc\eta = \frac{sin\eta}{\eta}$:

Ենթադրելով, որ ոչ գծային բևեռացման ուղղությունը համընկնում է կոորդինատական համակարգի y -առանցքի հետ (տես Նկ . 1), լազերային փնջերի միջև կազմած ψ-անկյունից կախված ՏՀԳ ճառագայթման ելքային հզորության անկյունային բաշխվածության համար կունենանք [2].

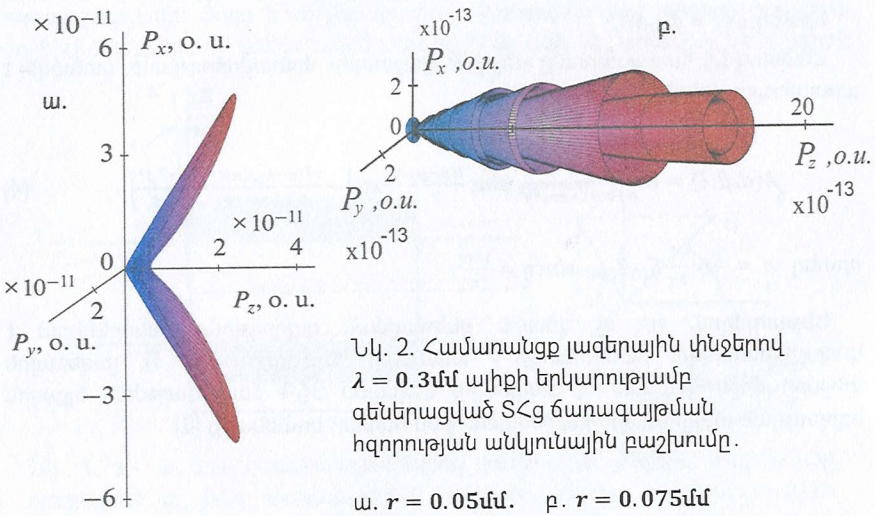
$$P(\vartheta,\varphi,z) =$$

$$= H^2 \cdot (sin^2\vartheta sin^2\varphi + cos^2\vartheta) \cdot$$

$$\cdot \frac{z^2 sinc^2\left[\left(k_2 \cdot cos\psi - k_1 - k \cdot cos\vartheta + \frac{sin\psi \cdot cos\psi(k_2 \cdot sin\psi - k \cdot sin\vartheta \cdot cos\varphi)}{1+cos^2\psi}\right)\frac{z}{2}\right]}{(1+cos^2\psi)\cdot\left(k_2 \cdot cos\psi - k_1 + k \cdot cos\vartheta + \frac{sin\psi \cdot cos\psi(k_2 \cdot sin\psi - k \cdot sin\vartheta \cdot cos\varphi)}{1+cos^2\psi}\right)^2} \cdot$$

$$\cdot exp\left[-\frac{r^2(k \cdot sin\vartheta \cdot sin\varphi)^2}{4} - \frac{r^2(k \cdot sin\vartheta \cdot cos\varphi - k_2 \cdot sin\psi)^2}{2(1+cos^2\psi)}\right] \qquad (5)$$

§1.4-ում ուսումնասիրվել է $LiNbO_3$ բյուրեղում ՏՀԳ միջոցով ստացված ՏՀg ճառագայթման անկյունային բաշխումը լազերային փնջերի համառանցք տարածման դեպքում: Հետազոտությունը ցույց է տվել, որ նեղ փնջերի դեպքում ճառագայթումն առավելապես դիտվում է Չերենկովյան անկյանը մոտ տիրույթում (Նկ.2ա.), իսկ փնջերի շառավիղների մեծացումը բերում է ՏՀg ճառագայթման կենտրոնացմանը լազերային փնջերի տարածման ուղղությամբ և միևնույն ժամանակ խիստ նվազում է փոխակերպման արդյունավետությունը (Նկ.2բ.):

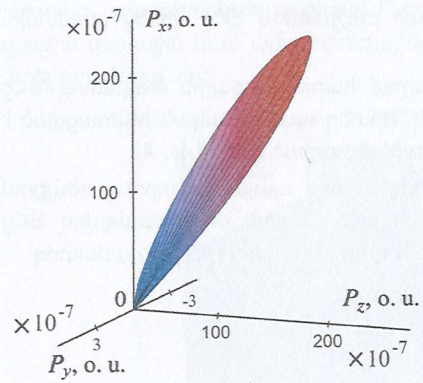


Նկ. 2. Համառանցք լազերային փնջերով $\lambda = 0.3$մմ ալիքի երկարությամբ գեներացված ՏՀg ճառագայթման հզորության անկյունային բաշխումը.

ա. $r = 0.05$մմ. բ. $r = 0.075$մմ

§1.5-ում դիտարկվել է ՏՀg գեներացումը՝ միմյանց նկատմամբ անկյան տակ տարածվող լազերային փնջերի դեպքում:

Ցույց է տրվել, որ լայն փնջերի դեպքում փոխադարձ անկյան օպտիմալ ընտրությունը թույլ է տալիս հիմնական սպեկտրալ բաղադրիչների համար ապահովել վեկտորական սինքրոնիզմ, ինչի շնորհիվ մեծանում է փոխակերպման արդյունավետությունը և ստացվում է շատ ավելի մեծ ուղղորդվածությամբ ՏՀg ճառագայթում (տես Նկ. 3):



Նկ. 3. LiNbO3 ոչ գծային բյուրեղում գեներացված λ=0.3մմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման հզորության անկյունային բաշխումը ψ=ψ₀ անկյան և z=5մմ երկարությամբ բյուրեղի դեպքում:

§1.6-ում տեսականորեն ստացված արդյունքները համեմատվել են [3] աշխատանքում ստացված փորձարարական արդյունքների հետ: Հաշվի առնելով, որ [3] աշխատանքում իրական լազերային փնջերը տարբերվում են գաուսյանից և բացի այդ՝ ոչ գծային բյուրեղը տեղադրված է ալիքատարում, տեսական և փորձարարական արդյունքների համընկնումը կարելի է համարել բավարար:

Եզրակացության մեջ ամփոփվել են առաջին գլխի հիմնական արդյունքները:

Երկրորդ գլուխը նվիրված տերահերցային ճառագայթման գեներացմանը ՊԲԼՆ բյուրեղում լազերային իմպուլսների օպտիկական ուղղման միջոցով:

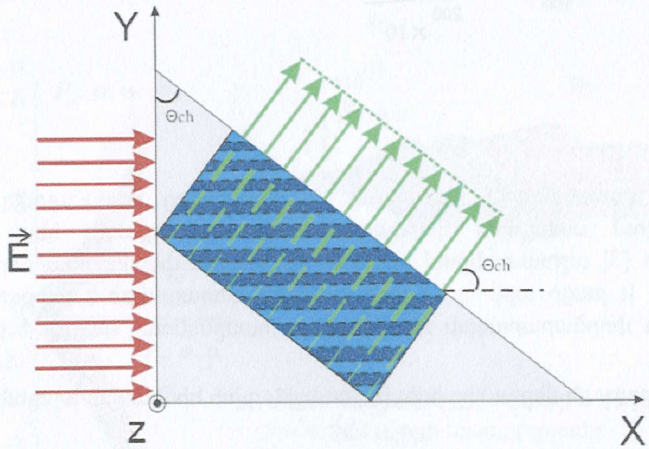
§2.1-ում քննարկվել են ՊԲԼՆ բյուրեղներով քվազիմոնոքրոմատիկ ՏՀg ճառագայթման գեներացման սկզբունքները: Ներկայացվել է բյուրեղի ոչ գծային ընկալունակության գործակցի նշանի պարբերական փոփոխման շնորհիվ

քվազիփուլահամաձայնեցման պայմանի իրականացման հնարավորությունը, որի դեպքում գեներացված ճառագայթման հաճախությունը որոշվում է բևեռացման փոփոխման պարբերությամբ:

§2.2-ում վերլուծվել է ՊԲԼՆ բյուրեղում ՏՀց իմպուլսների գեներացումը և ալիքային վեկտորների փոխդասավորվածությունը սինքրոնիզմի ապահովման դեպքում: Քանի որ ՊԲԼՆ բյուրեղում ՏՀց ալիքը տարածվում է գեներացվող փնջերի նկատմամբ Չերենկովյան անկյան տակ, ապա այն բյուրեղից արդյունավետ դուրս բերելու համար անհրաժեշտ է բյուրեղն ընտրել ուղղանկյուն պրիզմայի տեսքով, որի ելքային մակերևույթը կտրված է Չերենկովի անկյան տակ: Սակայն այս դեպքում բյուրեղից առաքվող ՏՀց փնջում ինտենսիվության բաշխումը խիստ անհավասարաչափ է՝ բյուրեղի տարբեր հատվածներում գեներացվող ալիքն անցնում է տարբեր ճանապարհ: Հետևաբար, ավելի որակյալ ինտենսիվության հավասարաչափ բաշխումով ՏՀց փունջ ստանալու համար անհրաժեշտ է որոնել այլ ուղիներ:

§2.3-ում առաջարկվել է ՊԲԼՆ բյուրեղում հարթ ալիքային ճակատով ՏՀց իմպուլսների գեներացման մի տարբերակ, որտեղ պարբերական բևեռացված է $LiNbO_3$ բյուրեղի մի որոշակի՝ ուղղանկյունաձև հատված (տես Նկ. 4):

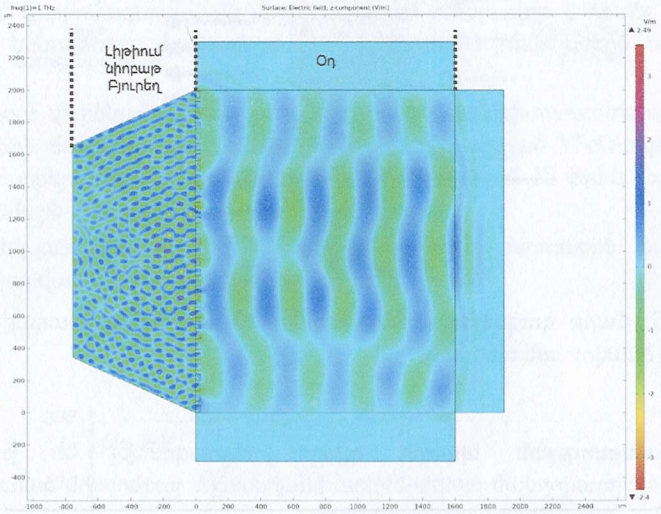
Վերլուծվել է բյուրեղի երկրաչափությունը և այն պայմանը, որոնց դեպքում բյուրեղի տարբեր հատվածներից Չերենկովյան անկյան տակ առաքվող ՏՀց ալիքները կանցնեն միանման ճանապարհ և դուրս կգան բյուրեղից համափուլ:



Նկ. 4 Եռանկյուն պրիզմայի տեսքով, մի՝ ուղղանկյունաձև հատվածի պարբերաբար բևեռացմամբ լիթիումի նիոբատի ոչ գծային բյուրեղի սխեմատիկ պատկերը. ABCD պարբերական բևեռացված հատվածը, կարմիր սլաքներով ցուցադրված է բյուրեղի վրա ընկնող լազերային փունջը, կանաչ սլաքներով՝ գեներացված ՏՀց ճառագայթումը

§2.4-ում հետազոտվել է ՏՀց ճառագայթման գեներացումը հարթ զուգահեռ արհեստական ՊԲԼՆ բյուրեղում, որտեղ պարբերական համակարգը ձևավորվում է բյուրեղի մուտքում փուլային կամ ամպլիտուդային դիմակ տեղադրելով [4]:

Արհեստական ՊԲԼՆ բյուրեղում նույնպես ՏՀց ճառագայթումը գեներացվում է չերենկովյան անկյան տակ, հետևաբար, լրիվ ներքին անդրադարձման պատճառով այն չի կարող դուրս գալ լիթիումի նիոբատի հարթ զուգահեռ բյուրեղից: Սակայն COMSOL Multiphysics միջավայրում մոդելավորումը ցույց է տալիս, որ բյուրեղի տարբեր հատվածներում գեներացված ՏՀց դաշտերի վերադրումը բյուրեղի ելքային մակերևույթի մոտ առաջացնում է դաշտի որոշակի պարբերական բաշխում (Նկ. 5), ինչը հնարավորություն է ստեղծում ելքային փուլային կամ ամպլիտուդային դիմակի միջոցով ճառագայթումը դուրս բերել բյուրեղից՝ օդ:

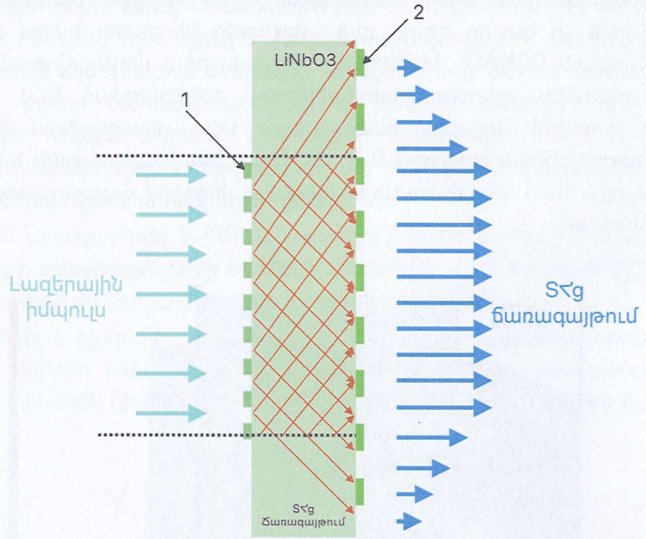


Նկ. 5. Ելքային փուլային դիմակով հարթ զուգահեռ արհեստական ՊԲԼՆ բյուրեղում ՏՀց դաշտի պատկերը՝ մոդելավորված COMSOL Multiphysics միջավայրում

Մոդելավորումը ցույց է տվել, որ ճիշտ ընտրված և բյուրեղի ելքային մակերևույթի մոտ տեղադրված փուլային դիմակը կարող է ապահովել համափուլ ճառագայթում ելքային մակերևույթից, հասցնելով բյուրեղ-օդ անցման արդյունավետությունը մինչև մոտ 50% (տես Նկ. 5):

Հարթ զուգահեռ արհեստական ՊԲԼՆ բյուրեղից առաքվող ՏՀg փնջի ձևավորման սխեման ներկայացված է Նկ. 6-ում:

§2.5-ում ամփոփվել են երկրորդ գլխում ստացված հիմնական արդյունքները և արվել են համապատասխան եզրակացություններ:



Նկ. 6. Հարթ զուգահեռ արհեստական ՊԲԼՆ բյուրեղից առաքվող ՏՀg փնջի ձևավորման սխեման

Ատենախոսության երրորդ գլխում հետազոտվել են թափանցիկ մագնիսակարգավորված բյուրեղներում իմպուլսային լազերային ճառագայթման դետեկտման առանձնահատկությունները:

§3.1-ում ներկայացվել է ֆերրոմագնիսական նյութերի կիրառական նշանակությունը և հիմնավորվել է մագնիսաօպտիկական ոչ գծային արձագանքի հետազոտման անհրաժեշտությունը օպտիկական ու ՏՀg տիրույթներում: Նշվել է, որ տեսանելի և ինֆրակարմիր տիրույթներում դիտվող արձագանքը դասական՝ ռեզոնանսային մեխանիզմով չի բացատրվում [5] և մինչ օրս դեռևս բանավեճերի առարկա է:

§3.2-ում քննարկվել են դիամագնիսների, պարամագնիսների և մագնիսակարգավորված միջավայրերի հիմնական մագնիսական հատկությունները, մասնավորապես՝ ֆերրոմագնիսական նյութերի ստատիկ մագնիսացման կորերը, շեշտվել է դրանց ոչ գծային բնույթը:

§3.3-ում դիտարկվել է փոփոխական մագնիսական դաշտում $\boldsymbol{M}$ մագնիսական մոմենտի շարժումը, որը նկարագրվում է [6] աշխատանքում առաջարկված հավասարումով.

$$\frac{d\boldsymbol{M}}{dt} = \gamma[\boldsymbol{M} \times \boldsymbol{B}] - \gamma^2 I \frac{d\boldsymbol{B}}{dt} + \boldsymbol{R} \qquad (6)$$

որտեղ $\gamma = e/2m$-ը գիրոմագնիսական հարաբերությունն է, I-ն՝ իներցիայի մոմենտը, իսկ R-ը՝ դիսիպատիվ անդամը:

Հավասարումից հետևում է, որ փոփոխական մագնիսական դաշտում, երբ այն ուղղված է մագնիսական մոմենտի ուղղությամբ, ապա մագնիսական մոմենտը մարող պրեցեսիային զուգահեռ կատարում է նաև տատանողական շարժում՝ փոփոխական դաշտի հաճախությամբ:

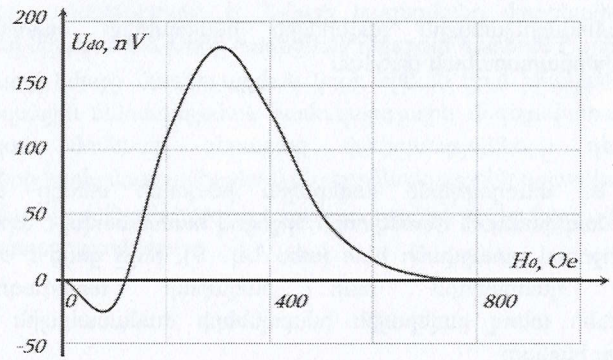
Ֆերրոմագնիսական միջավայրի ոչ գծայնության առկայության դեպքում մագնիսական դաշտի համար ալիքային հավասարումը կունենա հետևյալ տեսքը

$$\frac{\partial^2 H(r,t)}{\partial r^2} - \varepsilon\mu\varepsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2 H(r,t)}{\partial t^2} = \varepsilon\varepsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2 M_{NL}}{\partial t^2} \qquad (7)$$

որից հետևում է, որ քառակուսային ոչ գծայնության՝ $M_{NL} \sim H^2$ առկայության դեպքում ֆերրոմագնիսական միջավայրերում հնարավոր է դիտել տարբեր ոչ գծային երևույթներ, մասնավորապես՝ լազերային իմպուլսների օպտիկական ուղղում:

§3.4-ում փորձնականորեն ուսումնասիրվել է ամպլիտուդամոդուլացված He-Ne լազերի ճառագայթման դետեկտումը մագնիսացված $YFeO_3$օրթոֆերիտում՝ երկու տարբեր ալիքի երկարությունների դեպքում (λ = 1.15 մկմ և λ = 3.39 մկմ), որտեղ նմուշն ունի բավարար թափանցիկություն:

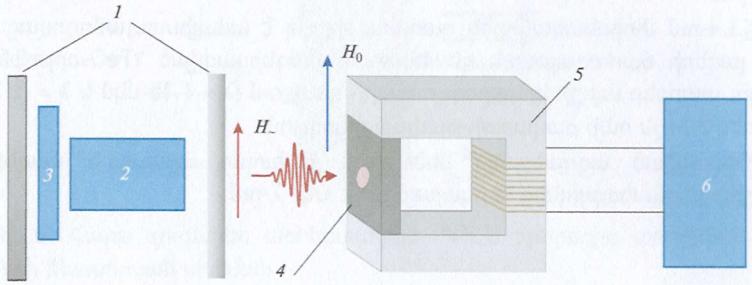
Դետեկված ազդանշանի մեծության կախումը արտաքին մագնիսական դաշտի լարվածությունից ներկայացված է Նկ. 7-ում:



Նկ. 7. Դետեկված ազդանշանի մեծության կախումը մագնիսական դաշտի լարվածությունից

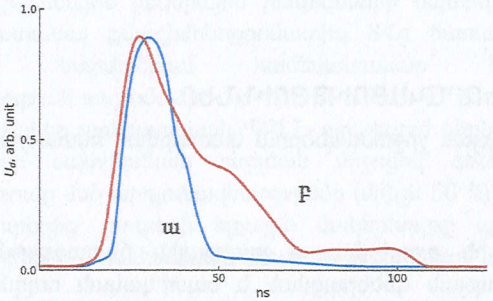
Ցույց է տրվել, որ դետեկտված ազդանշանը բացակայում է զրոյական արտաքին մագնիսական դաշտի դեպքում: Մագնիսական դաշտ կիրառելիս հայտնվում է դետեկված ազդանշան, որի արժեքը սկզբում մեծանում է մագնիսական դաշտի աճման հետ, որից հետո այն նվազում է մինչև զրո, փոխում է իր նշանը (շրջվում է փուլը) և կրկին մեծանում մինչև որոշակի առավելագույն արժեքի իսկ դաշտի հետագա աճը բերում է դետեկված ազդանշանի նվազմանը մինչև զրո: Սա լիովին համապատասխանում է նմուշի ստատիկ մագնիսացման կորին:

§3.5-ում հետազոտվել է նանովայրկյանային նեոդիմային լազերի իմպուլսների օպտիկական դետեկտումը $Y_3Fe_5O_{12}$ և $YFeO_3$ բյուրեղներում՝ ըստ Նկ. 8-ում բերված բլոկ սխեմայի: Այստեղ նույնպես դետեկտված ազդանշանի ամպլիտուդը կախված է շեղման մագնիսական դաշտից և համապատասխանում է նմուշների ստատիկ մագնիսացման կորերին: Զրոյական արտաքին դաշտի և մագնիսացման հագեցման դեպքում դետեկտված ազդանշանը բացակայում է: Դետեկտված իմպուլսները գրանցվել են օսցիլոգրաֆի էկրանին:



Նկ. 8. Նանովայրկյանային լազերային իմպուլսների օպտիկական դետեկտման փորձարարական սխեման

Մոտ 20 նվ տևողությամբ լազերային իմպուլսի տեսքը՝ ստացված հետազոտվող մագնիսական դետեկտորի միջոցով համեմատվել է արագագործ ֆոտոդիոդի միջոցով ստացվածի հետ (տես Նկ. 9), ինչը ցույց է տալիս, որ մագնիսական դետեկտորն ունի բավարար արագագործություն նանովայրկյաններ տևող լազերային իմպուլսների ժամանակային տեսքերը վերարտադրելու համար:



Նկ. 9. ա. Իտրիում-երկաթի նռնաքարի վրա հիմնված մագնիսական դետեկտորի կողմից գրանցված լազերային իմպուլսի ժամանակային տեսքը, բ. արագագործ ֆոտոդիոդի վրա հիմնված դետեկտորի ելքային ազդանշանի տեսքը

§3.6-ում ուսումնասիրվել է YIG բյուրեղի շերտում ֆեմտովայրկյանային լազերային իմպուլսների օպտիկական ուղղման միջոցով ՏՀց ճառագայթման գեներացման հնարավորությունը: Որպես լազերային իմպուլսների աղբյուր օգտագործվել է Spectra-Physics ընկերության Mai-Tai Titanium:Sapphire ֆեմտովայրկյանային լազերը

Փորձնականորեն գրանցվել է տերահերցային ճառագայթում արտաքին շեղման մագնիսական դաշտում տեղադրված իտրիում-երկաթի նռնաքարի միաբյուրեղի բարակ շերտում՝ ինֆրակարմիր տիրույթի ֆեմտովայրկյանային լազերային իմպուլսների ազդեցության տակ:

Արտաքին մագնիսական դաշտի այն արժեքների դեպքում, որտեղ ֆերրոմագնիսական նմուշի մագնիսացման կորը ոչ գծային է (H~80 Oe), ՏՀց ազդանշանը առավելագույնն է: Նմուշի հագեցմանը մոտենալիս դետեկված ազդանշանը նվազում է և խորը հագեցման դեպքում դառնում է զրո:

Նռնաքարի նմուշի մագնիսացման կորի հիման վրա իրականացվել է նաև ՏՀց իմպուլսային ճառագայթման համակարգչային մոդելավորում՝ միջավայրի մագնիսական մոմենտի գերարագ փոփոխությունների դեպքում, որի արդյունքները համապատասխանում են փորձնականորեն ստացվածներին:

§3.7-ում ամփոփվել են երրորդ գլխում ստացված հիմնական արդյունքները և արվել եզրակացություններ:

ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ատենախոսության շրջանակներում կատարված հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ

1. Ոչ գծային բյուրեղներում լազերային ճառագայթման տարբերային հաճախության գեներացման և օպտիկական ուղղման դեպքում եթե լազերային փնջերի շառավիղները շատ փոքր են գեներացվող ալիքի երկարությունից, ապա կոլինեար լազերային փնջերի դեպքում, դրանց լայն անկյունային սպեկտրի շնորհիվ, տեղի ունի արդյունավետ փոխակերպում, իսկ գեներացվող ալիքը տարածվում է Չերենկովյան անկյան տակ: Փնջերի շառավիղների մեծացման դեպքում լազերային փնջերի անկյունային սպեկտրները կենտրոնանում են տարածման հիմնական ուղղության շուրջ, և կոլինեար տարածման դեպքում սինքրոն փոխազդեցության հնարավորությունը նվազում է, ինչի հետևանքով նվազում է նաև ճառագայթման գեներացման արդյունավետությունը:

2. Հետազոտության արդյունքները հաստատում են, որ լայնական մեծ չափերով լազերային փնջերի դեպքում փոխակերպման արդյունավետությունը կարող է էապես աճել, եթե փնջերը տարածվեն միմյանց նկատմամբ փուլային սինքրոնիզմն ապահովող ոչ կոլինեարության ~10^{-2} ռադիան անկյան տակ:
Տերահերցային ճառագայթման գեներացման դեպքում այդ անկյան օպտիմալ ընտրությամբ հնարավոր է ապահովել վեկտորական սինքրոնիզմ լազերային փնջերի հիմնական սպեկտրալ բաղադրիչների միջև, ինչի շնորհիվ արդյունավետությունը կարող է աճել մի քանի կարգով, և միաժամանակ ճառագայթումը դառնում է խիստ ուղղորդված: Հետևաբար, հզոր ՏՀց ճառագայթում ստանալու համար օպտիմալ անկյան ընտրության դեպքում հնարավոր է կիրառել ավելի լայն և հզոր լազերային փնջեր՝ նվազեցնելով ոչ գծային բյուրեղի օպտիկական վնասման հավանականությունը, միաժամանակ պահպանելով արդյունավետ փոխակերպման պայմանները:

3. Երկրորդ գլխում առաջարկված ՊԲԼՆ և արհեստական ՊԲԼՆ սխեմաները կարող են ծառայել որպես ինտենսիվության համասեռ բաշխումով տերահերցային ճառագայթման գեներացման արդյունավետ եղանակներ: Մասնավորապես, ուղղանկյուն պրիզմայի տեսք ունեցող բյուրեղի միայն մի առանձնացված հատվածում պարբերական բևեռացման իրականացումը հնարավորություն է տալիս

ֆեմտովայրկյանային լազերային իմպուլսների օպտիկական ուղղման միջոցով ստանալ քվազիմոնոքրոմատիկ ՏՀց ճառագայթում՝ փնջի լայնական կտրվածքում համեմատաբար հավասարաչափ ինտենսիվության բաշխմամբ:

4. Հարթ զուգահեռ արհեստական ՊԲԼՆ բյուրեղում գերկարճ լազերային իմպուլսների օպտիկական ուղղման միջոցով գեներացված ՏՀց ճառագայթումը մեծ արդյունավետությամբ (մինչև 50 %) կարելի է դուրս հանել բյուրեղից՝ բյուրեղի ելքային մակերևույթը պատելով ալիքի պարամետրերին համապատասխան փուլային կամ ամպլիտուդային դիմակով:

5. Հետազոտությունների արդյունքները հաստատում են, որ թափանցիկ ֆերրոմագնիսական բյուրեղները կարող են կիրառվել որպես լազերային ճառագայթման արագագործ դետեկտորներ և որպես ոչ գծային տարրեր՝ լազերային ճառագայթման փոխակերպմամբ ՏՀց ճառագայթման գեներացման համար: Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ դետեկտված ազդանշան ստացվում է միայն մագնիսացված նմուշում: Դետեկտված ազդանշանի ամպլիտուդի կախվածությունն արտաքին մագնիսացնող դաշտից լավ համապատասխանում է ֆերրոմագնիսական նմուշի մագնիսացման ստատիկ կորին, ինչը հաստատում է այն վարկածը, որ դետեկտման արդյունավետությունը պայմանավորված է ստատիկ մագնիսացման կորի ոչ գծայնությամբ: Նույն բանն է հաստատում նաև YIG մոնոբյուրեղում ֆեմտովայրկյանային լազերային իմպուլսների օպտիկական ուղղման միջոցով ստացված ՏՀց ճառագայթման ամպլիտուդի կախվածությունը մագնիսական դաշտից:

6. Ատենախոսության շրջանակներում կատարված հետազոտությունների արդյունքները կարող են գտնել տարբեր կիրառություններ: Մասնավորապես, դրանք կարող են նպաստել լազերային ճառագայթման փոխակերպման միջոցով ՏՀց ճառագայթման գեներացման համակարգերի արդյունավետության բարձրացմանը և որակյալ ՏՀց փնջերի ձևավորմանը: Ֆերրոմագնիսական բյուրեղներում լազերային ճառագայթման ոչ գծային փոխակերպման հետազոտությունների արդյունքները կարող են օգտագործվել արագագործ մագնիսաօպտիկական և ԳԲՀ ճառագայթման դետեկտորների, ՏՀց աղբյուրների մշակման համար և այլուր:

Հղված գրականություն

[1] U. A. Abdullin, G. A. Lyakhov, O. V. Rudenko, and A. S. Chirki 1974 Difference-frequency excitation in nonlinear optics and the conditions for Cerenkov-radiation emission **39**

[2] Makaryan A H and Sahakyan Y S 2021 Investigation of the Efficiency of Terahertz Radiation Generation in a Nonlinear Crystal Depending on the Parameters of Exciting Laser Beams *J. Contemp. Phys.* **56** 280–4

[3] Avetisyan Y, Sasaki Y and Ito H 2001 Analysis of THz-wave surface-emitted difference-frequency generation in periodically poled lithium niobate waveguide *Appl Phys B* **73** 511–4

[4] Avetisyan Y H and Makaryan A H 2024 Narrowband terahertz generation in a plane-parallel Rb:KTP crystal using a phase mask *J. Opt. Soc. Am. B* **41** 873

[5] Martirosian R M, Makaryan A H, Mekhitarian V M and Tadevosyan V R 2014 Optical detection in a ferromagnet *Jetp Lett.* **99** 435–40

[6] Mekhitarian V M 2012 The invariant representation of generalized momentum *J. Contemp. Phys.* **47** 249–56

СААКЯН ЮРИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВЫПРЯМЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФЕРРОМАГНИТНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено генерации и детектированию электромагнитного излучения СВЧ, терагерцового и оптического диапазонов с использованием нелинейно-оптических и магнитооптических материалов.

В первой главе исследованы особенности генерации разностной частоты и оптического выпрямления лазерного излучения в нелинейных кристаллах. Было показано, что если радиусы лазерных пучков значительно меньше длины волны генерируемого излучения, то в случае коллинеарных лазерных пучков, благодаря их широкому угловому спектру, происходит эффективное преобразование, а генерируемая волна распространяется под углом Черенкова. С увеличением радиусов пучков угловые спектры лазерных пучков концентрируются вокруг основного направления распространения пучков, и в случае коллинеарного распространения уменьшается вероятность синхронного взаимодействия, в результате чего снижается и эффективность генерации излучения.

Результаты исследования подтверждают, что в случае лазерных пучков с большими поперечными размерами эффективность преобразования может быть значительно увеличена, если пучки распространяются неколлинеарно относительно друг друга, под углом обеспечивающим фазовый синхронизм.

В случае генерации терагерцового излучения при оптимальном выборе этого угла можно обеспечить векторный синхронизм между основными спектральными компонентами лазерных пучков, благодаря чему эффективность может увеличиться на несколько порядков, и одновременно излучение становится узконаправленным. Таким образом, при оптимальном выборе угла для получения мощного ТГц-излучения можно использовать более широкие и мощные лазерные пучки, снижая вероятность оптического повреждения нелинейного кристалла, при этом сохраняя условия для эффективного преобразования.

Предложенные во второй главе диссертации схемы периодической поляризации нелинейного кристалла (PPLN) и искусственной периодической поляризации нелинейного кристалла (APPLN) могут служить эффективными методами генерации терагерцового излучения с однородным распределением интенсивности в пучке. В частности, реализация периодической поляризации только в отдельном прямоугольном сечении призмообразного нелинейного кристалла позволяет получить квазимонохроматическое ТГц-излучение с относительно равномерным распределением интенсивности в поперечном сечении пучка путем оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов.

В работе моделирована генерация ТГц излучения в плоскопараллельном искусственном кристалле APPLN. Показано, что ТГц-излучение, генерируемое при оптическом выпрямлении сверхкоротких лазерных импульсов, может быть извлечено из кристалла с высокой эффективностью (до 50%) путем покрытия выходной поверхности кристалла фазовой или амплитудной маской, соответствующей параметрам волны.

В третьей главе исследовано детектирование лазерных импульсов в ферромагнитных кристаллах. Результаты исследования подтверждают, что прозрачные ферромагнитные кристаллы могут использоваться в качестве высокоскоростных детекторов лазерного излучения и в качестве нелинейных элементов для генерации ТГц-излучения путем нелинейного преобразования лазерного излучения. Исследование показывает, что детектируемый сигнал получается только в намагниченном образце. Зависимость амплитуды детектируемого сигнала от внешнего намагничивающего поля хорошо соответствует статической кривой намагничивания ферромагнитного образца, что подтверждает гипотезу о том, что эффективность детектирования обусловлена нелинейностью статической кривой намагничивания. Эту гипотезу подтверждает также характер зависимости от магнитного поля амплитуды ТГц-излучения, полученного вследствие оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в монокристалле YIG,

Результаты исследования, проведенного в рамках диссертации, могут найти различное применение. В частности, они могут способствовать повышению эффективности систем генерации ТГц-излучения, полученного путем преобразования лазерного излучения, и формирования высококачественных ТГц-пучков. Результаты исследований нелинейного преобразования лазерного излучения в ферромагнитных кристаллах могут быть использованы для разработки высокоскоростных магнитооптических и СВЧ детекторов излучения, источников ТГц-излучения и в других областях.

SAHAKYAN YURI

INVESTIGATION OF OPTICAL RECTIFICATION OF LASER RADIATION IN DIELECTRIC AND FERROMAGNETIC NONLINEAR MEDIA

ANNOTATION

This study focuses on the generation and detection of microwave, terahertz, and optical electromagnetic radiation using nonlinear optical and magneto-optical materials.

The first chapter examines the features of difference frequency generation and optical rectification of laser radiation in nonlinear crystals. It is shown that if the radii of the laser beams are significantly smaller than the wavelength of the generated radiation, then, in the case of collinear laser beams, due to their wide angular spectrum, efficient conversion occurs, and the generated wave propagates at the Cherenkov angle. As the beam radii increase, the angular spectra of the laser beams become concentrated around the main direction of beam propagation. In the case of collinear propagation, the probability of synchronous interaction decreases, leading to a decrease in the radiation generation efficiency.

The results of the study confirm that for laser beams with large transverse dimensions, conversion efficiency can be significantly increased if the beams propagate noncollinearly relative to each other at an angle that ensures phase matching. When generating terahertz radiation, optimal selection of this angle can ensure vector matching between the main spectral components of the laser beams, thereby increasing efficiency by several orders of magnitude while simultaneously making the radiation highly directional. Thus, with an optimal angle, wider and more powerful laser beams can be used to generate high-power terahertz radiation, reducing the likelihood of optical damage to the nonlinear crystal while maintaining conditions for efficient conversion.

The periodic polarization of a nonlinear crystal (PPLN) and artificial periodic polarization of a nonlinear crystal (APPLN) schemes proposed in Chapter 2 of the dissertation can serve as effective methods for generating terahertz radiation with a uniform intensity distribution within the beam. In particular, implementing periodic polarization in only one rectangular cross-section of a prismatic nonlinear crystal enables the generation of quasi-monochromatic terahertz radiation with a relatively uniform intensity distribution across the beam cross-section through optical rectification of femtosecond laser pulses. This paper simulates the generation of terahertz radiation in an artificial plane-parallel crystal (APPLN). It is shown that THz radiation generated by optical rectification of ultrashort laser pulses can be extracted from the crystal with high efficiency (up to 50%) by applying a phase or amplitude mask corresponding to the wave parameters to the crystal's output surface.

The third chapter examines the detection of laser pulses in ferromagnetic crystals. The results of this study confirm that transparent ferromagnetic crystals can be used as high-speed laser detectors and as nonlinear elements for generating THz radiation through nonlinear conversion of laser radiation. The study demonstrates that a detectable signal is only obtained in a magnetized sample. The dependence of the detected signal amplitude on the external magnetizing field corresponds well to the static magnetization curve of the ferromagnetic sample, confirming the hypothesis that the detection efficiency is due to the nonlinearity of the static magnetization curve. This hypothesis is also supported by the dependence of the THz radiation amplitude on the magnetic field, obtained by optical rectification of femtosecond laser pulses in an YIG single crystal.

The results of this dissertation have various potential applications. In particular, they can contribute to increasing the efficiency of THz radiation generation systems through laser conversion and the production of high-quality THz beams. The results of research on nonlinear conversion of laser radiation in ferromagnetic crystals can be used to develop high-speed magneto-optical and microwave radiation detectors, THz radiation sources, and other applications.