



UDK: 534.535: 535.544.

Moxinur ELBOYEVA,

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti ilmiy xodimi

E-mail: elboeyvamoxinur1990@gmail.com,

Farxad AXMEDJANOV,

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti laboratoriya mudiri, f.-m.f.d., professor

Asror ULASHEV,

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti tayanch doktoranti

PKFI katta ilmiy xodimi, PhD M.Marasulov taqrizi asosida

EFFECT OF OPTICAL ACTIVITY ON THE PERFORMANCE OF BRAGG DIFFRACTION OF LIGHT IN ACOUSTIC WAVES IN BISMUTH GERMANATE CRYSTALS

Annotation

The influence of optical activity on the efficiency of Bragg light diffraction in transverse acoustic waves in bismuth germanate crystals has been investigated, taking into account the photoelastic constants and the M_2 acousto-optic figure of merit values, as well as the piezoelectric and electro-optic effects. The propagation directions of acoustic waves in the (110) plane, where the M_2 coefficient attains its maximum value, have been determined. The identified characteristics of Bragg light diffraction in transverse acoustic waves will be beneficial for the development of acousto-optic devices.

Key words: Bragg diffraction, bismuth germanate crystals, acoustic waves, photoelastic constants, acousto-optic quality factor.

ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНАТА ВИСМУТА

Аннотация

Исследовано влияние оптической активности на эффективность брэгговской дифракции света на поперечных акустических волнах в кристаллах германата висмута с учетом фотоупругих констант и значений акусто-оптического качественного коэффициента M_2 , а также пьезоэлектрического и электрооптического эффектов. Определены направления распространения акустических волн в (110) плоскости, при которых коэффициент M_2 достигает своего максимального значения. Выявленные особенности брэгговской дифракции света на поперечных акустических волнах будут полезны при разработке акусто-оптических устройств.

Ключевые слова: Брэгговская дифракция света, кристаллы германата висмута, акустические волны, фотоупругие константы, коэффициент акустооптического качества.

VISMUT GERMANATI KRISTALLARIDA OPTIK AKTIVLIKNING YORUG‘LIKNING AKUSTIK TO‘LQINLARDA BREGG DIFRAKSIYASI SAMARADORLIGIGA TA‘SIRI

Annotatsiya

Vismut germanat kristallaridagi ko‘ndalang akustik to‘lqinlardagi Bragg yorug‘lik difraksiyasining samaradorligiga optik faollikning ta‘siri fotoelastik konstantalar va M_2 akusto-optik sifat koeffitsienti qiymatlariga piezoelektrik va elektro-optik effekt hisobga olgan holda o‘rganildi. M_2 koeffitsientining qiymati maksimal qiymatga ega bo‘lgan (110) tekislikdagi akustik to‘lqinlarning to‘lqin vektorining yo‘nalishlari aniqlanadi. Ko‘ndalang akustik to‘lqinlardagi Bragg yorug‘lik difraksiyasining aniqlangan xususiyatlari akusto-optik qurilmalarni yaratishda foydali bo‘ladi.

Kalit so‘zlar: Bragg yorug‘lik difraksiyasi, vismut germanat kristallari, akustik to‘lqinlar, fotoelastik konstantalar, akusto-optik sifat koeffitsienti.

Kirish. Kubik singoniyali vismut germanati ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ – BGO) kristallari markaziy simmetriyaga ega bo‘lmagan 23-nuqtaviy guruhiga mansub bo‘lib, ular yuqori elektro-optik va piezoelektrik xususiyatlari bilan ajralib turadi. Ushbu xususiyatlari tufayli BGO kristallari akusto-optik modulyatorlar, elektro-optik sensorlar va golografik tizimlarda faol muhit sifatida keng qo‘llaniladi [1-5]. Biroq, ushbu kristallarning fotoelastik xususiyatlariga optik faollik hamda elektro-optik va piezoelektrik effektlarning umumiy ta‘siri yetarlicha o‘rganilmagan. Bunday tadqiqotlar BGO dan foydalanadigan akusto-optik qurilmalar parametrlarini yaxshilash va optimal kristall kesimlarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega [3, 6].

Ushbu ishda vismut germanat kristallarida optik faollikning Bragg yorug‘lik difraksiyasining samaradorligiga ta‘siri, shuningdek, piezoelektrik va elektro-optik effektlarning umumiy ta‘siri o‘rganildi. (001) va (110) kristallografik tekisliklardagi ko‘ndalang akustik to‘lqinlarning to‘lqin vektori yo‘nalishiga bog‘liq holda M_2 akusto-optik sifat koeffitsientining o‘zgarishi batafsil tahlil qilindi.

Tadqiqot metodologiyasi. Vismut germanat kristallarining shakli o‘rtacha o‘lchamlari $15 \times 4,5 \times 4,5$ mm bo‘lgan parallelepiped ko‘rinishida tayyorlandi. Tadqiqot uchun olingan namunalarning kristallografik yo‘nalishi [100], [110] va [111] yo‘nalishlar bo‘ylab joylashtirilib, ular 1° atrofida aniqlik bilan yo‘naltirildi. Yuzani qayta ishlash jarayoni silliqlash va optik ishlov berish bosqichlarini o‘z ichiga oldi.

Bo'ylama va ko'ndalang akustik to'lqinlari 200–1500 MGts chastota diapazonida X- yoki Y-kesimli kvarts piezotransduserlar yordamida hosil qilindi. Ko'ndalang akustik to'lqinlarni generatsiya qilish uchun namunalarning kengligiga (taxminan 4,3 mm) yaqin bo'lgan aperturali piezoelektrik o'zgartirgich ishlatildi. Eksperimental tadqiqotlar akustik to'lqinlarda Bragg yorug'lik difraksiyasi usuli yordamida o'tkazildi [3, 7].

Tajribalarda manba sifatida to'lqin uzunligi $\lambda_0 = 0,6328$ mkm bo'lgan geliy-neon lazeridan foydalanildi. Optik faollikning difraksiya qilingan yorug'lik intensivligiga ta'sirini tahlil qilish uchun yorug'lik to'lqini polarizatsiyasi akustik to'lqin tarqalish yo'nalishiga nisbatan perpendikulyar, yoki parallel tarzda yo'naltirilgan difraksiya geometriyasi qo'llanildi.

Fotoelastik konstantalarni aniqlash modifikatsiyalangan Dikson-Koen usuli yordamida amalga oshirildi [7]. An'anaviy usuldan farqli o'laroq, ushbu metodda akustik to'lqinlarning uyg'otilishi nafaqat etalon namunasi, balki tadqiq etilayotgan namuna tomonida ham navbatma-navbat amalga oshirildi. O'lchovlar jarayonida etalon namuna (I_{1s}) va tadqiq etilayotgan namuna (I_{1x}) tomonidan difraksiyalangan yorug'lik intensivliklari qayd etildi. So'ngra, xuddi shunday o'lchovlar akustik to'lqin tadqiq etilayotgan namuna tomonidan yuborilganda I_{2x} va I_{2s} intensivliklari uchun bajarildi.

Ushbu dinamik usul orqali samarali fotoelastik konstantalarni (p_{eff}) aniqlashning batafsil tavsifi [7, 8] manbalarida keltirilgan. Natijada, Bragg yorug'lik difraksiyasi uchun qo'llangan geometriya sharoitida p_{eff} qiymati quyidagi ifoda orqali hisoblanishi mumkin [8]:

$$\left[\frac{p_{eff}^2 n^6}{\rho V^3 (n+1)^4} \right]_x = \left[\frac{p_{eff}^2 n^6}{\rho V^3 (n+1)^4} \right]_s \left(\frac{I_{1x} I_{2x}}{I_{1s} I_{2s}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

bu yerda ρ – kristallning zichligi, n – yorug'likning sinish ko'rsatkichi, V – akustik to'lqinlarning tarqalish tezligi. (1) ifodadagi "s" va "x" indeksleri mos ravishda standart va tadqiq etilayotgan namunalarning xususiyatlarini bildiradi.

(1) ifodadan ko'rinadiki, samarali fotoelastik doimiy kattalik nafaqat akustik to'lqinlarning tarqalish yo'nalishi va polarizatsiyasiga, balki namunaga tushayotgan yorug'likning yo'nalishi va polarizatsiyasiga ham bog'liqdir. Hisob-kitoblarda (1) ifodaga muvofiq $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ kristallarining sinish ko'rsatkichi n va zichligi ρ qiymatlaridan foydalanildi, bu qiymatlar [1] manbasida keltirilgan: $n = 2,55$, $\rho = 9,2 \times 10^3$ kg/m³.

Tushayotgan va difraksiya qilingan yorug'likning polarizatsiyasi polarizatsion analizator yordamida aniqlangan. Etalon namuna sifatida eritilgan kvarts namunasi qo'llanildi [1, 4]. Fotoelastik doimiyliklarning eritilgan kvartsga nisbatan o'lchash xatoligi taxminan 10% ni tashkil etdi. Akustik to'lqinlarning tadqiq etilgan yo'nalishlar bo'ylab tarqalish tezligi $V \sim 0,2\%$ aniqlik bilan quyidagi ifoda orqali hisoblandi [8, 9]:

$$V = \frac{\lambda_0 v}{2 \sin \theta_B}, \quad (2)$$

bu yerda v – akustik to'lqinning chiziqli chastotasi, θ_B – Bragg yorug'lik difraksiyasi burchagi. Vismut germanat kristallari markaziy simmetriyaga ega bo'lmagan va optik faol bo'lganligi sababli, ularda tarqaluvchi yorug'likning normal modlari doira polarizatsiyalangan modlar hisoblanadi [10–13].

Shunday qilib, difraksiya qilingan yorug'likning polarizatsiya tekisligi tushayotgan yorug'likning polarizatsiya tekisligiga nisbatan muayyan burchakka buriladi. Ushbu burchak α , yorug'lik namunadagi d masofani bosib o'tishi bilan aniqlanadi va quyidagi ifoda bilan beriladi [1, 2]:

$$\alpha = \delta \cdot d \quad (3)$$

bu yerda δ – polarizatsiya tekisligining o'ziga xos aylanishi. $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ kristallari uchun $0,6328$ mkm to'lqin uzunligida δ taxminan 22 grad/mm ni tashkil etadi [1, 11]. (1) va (3) ifodalardan ko'rinadiki, α burchagi d masofaga chiziqli bog'liq bo'lib, u samarali fotoelastik doimiy kattalikka ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Yorug'likning polarizatsiya tekisligi va akustik to'lqinning to'lqin vektori yo'nalishini tahlil qilish va nazorat qilish uchun difraksiya qilingan yorug'lik intensivligi polarizatsiya tekisligi burilishi bilan va burilmasdan qayd etildi. (110) tekislikda φ burchak ostida [110] o'qiga nisbatan tarqaluvchi ko'ndalang akustik to'lqinlarda Bragg yorug'lik difraksiyasi sodir bo'lganda, difraksiya qilingan yorug'likning polarizatsiya komponentalari quyidagi ifodalar bilan tavsiflanadi [14]:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\varphi + 0,5\delta d) \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \sin(\varphi + 0,5\delta d), \quad (5)$$

Ushbu (4) va (5) ifodalar optik faollikning difraksiyalangan yorug'likning polarizatsiya tekisligi yo'nalishiga ta'sirini hisobga oladi.

Eksperimental natijalar va muhokama. $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) kristallarida akusto-optik sifat koeffitsienti M_2 ni hisoblash uchun difraksiyalangan yorug'lik intensivliklari o'lchandi. Hisob-kitoblar turli tarqalish yo'nalishlari va polarizatsiya holatlari uchun, ya'ni ham akustik, ham yorug'lik to'lqinlari uchun bajarildi [6]:

$$M_2 = \frac{n^6 p_{eff}^2}{\rho V^3}. \quad (6)$$

Shundan so'ng, olingan M_2 koeffitsienti qiymatlari asosida samarali fotoelastik konstantalar p_{eff} quyidagi ifodalar yordamida aniqlandi [3, 8, 9]:

$$p_{eff}^E = (p_{ijkl} - \Delta p_{ijkl}) \alpha_i \beta_j \gamma_k \kappa_l, \quad (7)$$

bu yerda α_i , β_j , γ_k va κ_l – mos ravishda difraksiyalangan va tushayotgan yorug'likning polarizatsiyasini, akustik to'lqinning polarizatsiya vektorini hamda uning to'lqin vektorini tavsiflovchi yo'naltiruvchi kosinuslardir.

(7) ifodada fotoelastiklikning piezoelektrik tenzori komponentalari Δp_{ijkl} quyidagi ifoda orqali aniqlanadi [3]:

$$\Delta p_{ijkl} = \frac{r_{ijkl} \kappa_m \epsilon_{mkl}}{\epsilon_{mn} \kappa_m \kappa_n}, \quad (8)$$

bu yerda ϵ_{mkl} , r_{ijl} va ϵ_{mn} – mos ravishda piezoelektrik, elektro-optik va dielektrik tenzor komponentalaridir. BGO kristallarida matritsa shaklida nolga teng bo'lmagan komponentlar ϵ_{14} , r_{41} va ϵ_{11} qiymatlari bilan ifodalanadi. Shunday qilib, Δp_{ijk} tenzori komponentalari piezoelektrik va elektro-optik effektlarning birgalikdagi ta'siri natijasida shakllanadi.

Samarali fotoelastik doimiy p_{eff} va piezoelektrik-optik hissaning Δp_{eff} hisoblangan qiymatlari 1-jadvalda keltirilgan. Ushbu jadvalda vektorlar q , k , α va β mos ravishda akustik va yorug'lik to'liqlarining tarqalish yo'nalishini, shuningdek difraksiyalangan va tushayotgan yorug'likning polarizatsiya yo'nalishini bildiradi. Akustik to'liqlarning polarizatsiya yo'nalishi γ bilan belgilangan.

Xususan, [110] kristallografik yo'nalish bo'ylab tarqaluvchi ko'ndalang akustik to'liqlarda Bragg yorug'lik difraksiyasi sodir bo'lganda, piezoelektrik-optik hissa Δp_{eff} hisobga olingan holda samarali fotoelastik doimiy p_{eff} quyidagi ifoda bilan aniqlanadi [14]:

$$p_{eff}^E = \left| p_{44} - \frac{r_{41}e_{14}}{4 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}} \right|. \tag{9}$$

Hisob-kitoblar uchun zarur bo'lgan ϵ_{14} , r_{41} va ϵ_{11} komponentalarining qiymatlari vismut germanat kristallari uchun [1, 2, 5] manbalardan olingan.

1-jadval

Bi₁₂GeO₂₀ kristallari uchun samarali fotoelastik konstantalar piezoelektrik va elektro-optik effektlarning birgalikdagi hissasini hisobga olgan holda

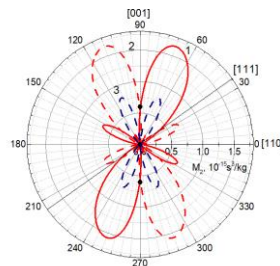
q	γ	k	β	α	p_{eff}^E	Δp_{eff}	p_{eff}^E	$M_2 \cdot 10^{-15}, s^3/kg$
[100]	[100]	[010]	[100]	[100]	p_{11}	0	0.12	8.34
	[001]	[010]	[100]	[001]	p_{44}	0	0.01	0.64
[110]	[110]	[001]	[110]	[110]	$0.25(2p_{11}+p_{21}+p_{12})+p_{44}$	0	0.118	10.9
	[110]	[001]	[110]	[110]	$0.25(p_{21}-p_{12})$	0	<0.01	0.015
	[001]	[110]	[110]	[001]	p_{44}	$\frac{r_{41} \cdot e_{14}}{4 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}}$	<0.01	0.35
[111]	[111]	[100]	[111]	[111]	$1/3(p_{11}+p_{21}+p_{12}+4p_{44})$	$\frac{4 \cdot r_{41} \cdot e_{14}}{3 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}}$	0.104	9.15
	[110]	[110]	[111]	[110]	$1/6(2p_{11}-p_{21}-p_{12}+2p_{44})$	0	0.012	0.43

Olingan akustik to'liqlar tezligi, samarali fotoelastik doimiylar va (6), (7) hamda (8) ifodalar asosida, (110) tekislikda ko'ndalang akustik to'liqlarning to'liq vektori yo'nalishiga bog'liq holda akusto-optik sifat ko'effitsienti M_2 ning o'zgarishi aniqlandi.

Hisob-kitoblarda BGO kristallari uchun quyidagi fotoelastik konstantalar ishlatildi: $p_{11} = 0.12$, $p_{12} = 0.10$, $p_{21} = 0.09$, $p_{44} = 0.01$. Ushbu qiymatlar [1, 12] manbalardagi ma'lumotlar bilan yaxshi mos keladi.

Hisoblash natijalari 1-rasmda taqdim etilgan bo'lib, unda tushayotgan yorug'likning polarizatsiyasi akustik to'liq vektoriga perpendikulyar bo'lganda (uzluksiz chiziq) va parallel bo'lganda (qisqa chiziq) M_2 ko'effitsientining o'zgarishi keltirilgan.

Tahlil shuni ko'rsatadiki, BGO kristallarida (110) tekislik bo'ylab tarqaluvchi ko'ndalang akustik to'liqlarda Bragg yorug'lik difraksiyasi sodir bo'lganda, M_2 ko'effitsientining maksimal qiymati $1.8 \times 10^{-15} s^3/kg$ ga teng bo'lib, u [110] o'qi bilan mos ravishda 70° (perpendikulyar polarizatsiya) va 110° (parallel polarizatsiya) burchak hosil qiluvchi yo'nalishlarda kuzatiladi.



1-rasm. Bi₁₂GeO₂₀ kristallarida akusto-optik sifat ko'effitsienti M₂ ning (110) tekislikdagi ko'ndalang akustik to'liqlarning to'liq vektori yo'nalishiga bog'liqligi.

Yorug'lik to'liqni polarizatsiyaning turli yo'nalishlari uchun: 1 - to'liq vektoriga perpendikulyar; 2, 3 — to'liq vektoriga parallel (3 - optik faollik hisobga olinmagan holda).

Xulosa. Vismut germanati kristallarida ko'ndalang akustik to'liqlardagi Bragg yorug'lik difraksiyasini tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, akusto-optik sifat ko'effitsientini baholashda optik faollik va piezoelektrik-optik effekt hissasini hisobga olish zarur. Aniqlanishicha, ushbu omillar akusto-optik sifat ko'rsatkichining anizotropiyasiga ta'sir qiladi, bu esa ushbu kristallarda Bragg difraksiyasining optimal geometrik konfiguratsiyalarini belgilash imkonini beradi. Optik faollikning yorug'lik difraksiyasi parametrlariga ta'sir etish qonuniyatlari vismut germanatini ish muhit sifatida qo'llovchi akusto-optik qurilmalar ishlab chiqishda qo'llanilishi mumkin.

ADABIYOTLAR

1. Шаскольская М.П (ред.) Акустические кристаллы. Справочник. М., Наука, 1982, 632с.
2. Venturini E. L., Spencer E. G., Ballman A. A. Elasto-Optic Properties of Bi₁₂GeO₂₀, Bi₁₂SiO₂₀, and Sr_xBa_{1-x}Nb₂O₆. J. Appl. Physics. 1969, 40(4): 1622–1624.
3. Дьелесан Э.Д., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. - М., Наука, 1982, 342 с.

4. Ganeev R.A., Rysnyansky A.I., Tugushev R.I., Kodirov M.K., Akhmedzhanov F.R., Usmanov T. Study of nonlinear-optical characteristics of photorefractive BSO and BGO crystals. *Quantum Electronics*. 2004, 34(2): 156-160.
5. Shen C., Zhang H., Zhang Y., Xu H., Y H., Wang, J., Zhang S. Orientation and Temperature Dependence of Piezoelectric Properties for Sillenite-Type $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ Single Crystals. *Crystals*. 2014, 4(2): 141-151.
6. Dixon R.W. Photoelastic properties of selected materials and their relevance for applications to acoustic light modulators and scanners. *J. Appl. Phys.* 1967, 38: 5149-5152.
7. Dixon R. W., Cohen M. G. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate. *Appl. Phys. Lett.* 1966, No. 8: 205-207.
8. Балакший В.И., Зотов Е.И., Парьгин В.Н. Анизотропная дифракция света в среде с искусственной анизотропией. *Квантовая электроника*. 1976, 3(10):2197–2204.
9. Akhmedzhanov F.R., Mirzaev S.Z., Saidvaliev U.A. Parameters of elastic anisotropy in bismuth silicate crystals. *Ferroelectrics*. 2020, 556(1): 23–28.
10. Amanova M.A., Shepelevich V.V, Makarevich V.V, Navnyk V.N. Influence of Inverse Piezoelectric Effect, Photoelasticity, and Optical Activity on the Diffraction Efficiency of Transmitting Holograms in Photorefractive Crystal $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. *Journ. of Appl. Spectroscopy*. 2020, 87(2): 349–356.
11. Кизель В.А., Бурков В.И. Гиروتропия кристаллов. М., Наука, 1980, 281 с.
12. Belyi V.N., Kulak G.V. Diffraction of light on ultrasound in gyrotropic cubic crystals in Bragg conditions. *Journ. of Appl. Spectroscopy*. 1991, 54(5): 484–488.
13. Akhmedzhanov F.R. Dispersion of acoustical activity and anisotropy of acoustical attenuation in bismuth silicate crystals. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2018, 34(S16-4) 045046: 1-6.
14. Akhmedzhanov F.R., Elboyeva M.I. Bragg Light Diffraction by Piezoactive
15. Acoustic Waves in Bismuth Germanate and Bismuth Silicate Crystals. *RENSIT*. 2025, Vol. 17, No 1, P. 77-82.