UO‘K 534.21.

GAMMA NURI BILAN NURLANGAN LITIY FTORID KRISTALLARIDA AKUSTIK TO‘LQINLARNING SO‘NISH MEXANIZMI

Axmedjanov Farxad Rashidovich,
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti
Ko‘p fazali tizimlarda molekulyar va to‘lqinli
jarayonlar laboratoriyasi mudiri
Tashkent 100125, Durmon Yuli ko‘chasi 33
akhmedzhanov.f@gmail.com
Tugalov Feruz Baxtiyorovich,
O‘zbekiston Respublikasi Maktabgacha va maktab ta’lim vazirligi,
Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi
Samarqand davlat pedagogika instituti Urgut fakulteti
o‘quv ishlari bo‘yicha dekan o‘rinbosari,
Samarqand viloyati Urgut tumani 141627, Vag‘ashti MFY 13-uy
tugalovferuz282@gmail.com

Annotatsiya. *Litiy ftorid kristallarida bo‘ylama akustik to‘lqinlarning so‘nish koeffitsiyenti va relaksatsiya vaqtining harorat va gamma nurlanish dozasiga bog‘liqligi birinchi marta o‘rganildi. Bo‘ylama akustik to‘lqinlar so‘nish koeffitsiyentining haroratga bog‘liqligida maksimum hosil bo‘lishi aniqlandi. Olingan natijalar akustik to‘lqinlar va nuqtaviy nuqsonlari o‘rtasidagi deformatsiya potensiali orqali o‘zaro ta’sirning akustoion mexanizmi bilan izohlanadi.*

Kalit so‘zlar: LiF kristali, akustik to‘lqin, to‘lqin tezligi, nurlanish dozasi, harorat, akustik xossalar, fonon, so‘nish koeffitsiyenti.

МЕХАНИЗМ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА ЛИТИЯ, ОБЛУЧЁННЫХ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Аннотация. *Впервые исследована зависимость коэффициента затухания и времени релаксации продольных акустических волн от температуры и дозы гамма облучения в кристаллах фторида лития. Показано, что в температурной зависимости коэффициента затухания продольных акустических волн наблюдается максимум. Полученные результаты объясняются акусто-ионным механизмом взаимодействия акустических волн с точечными дефектами через деформационный потенциал.*

Ключевые слова: *кристалл LiF, акустическая волна, скорость распространения, доза облучения, температура, акустические свойства, фонон, коэффициент затухания.*

MECHANISM OF ACOUSTIC WAVE ATTENUATION IN LITHIUM FLUORIDE CRYSTALS IRRADIATED WITH GAMMA RADIATION

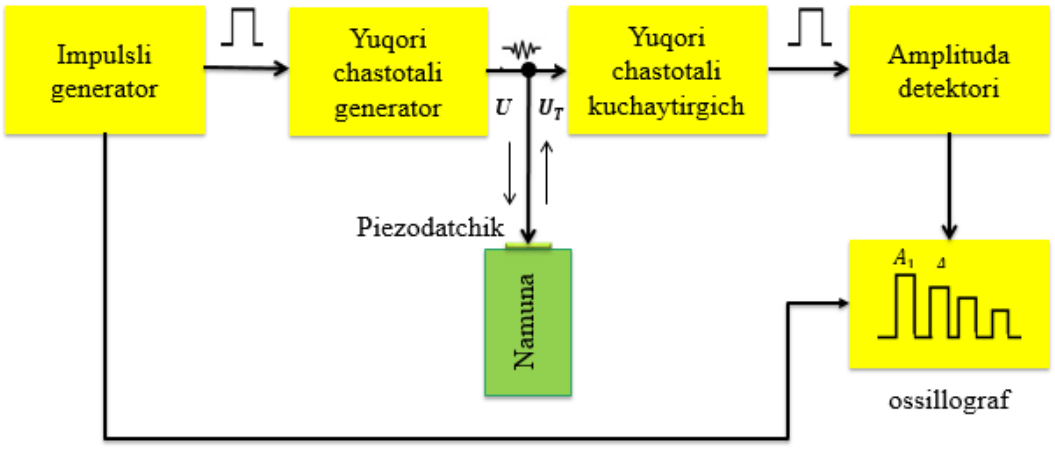
Abstract. *The dependence of the attenuation coefficient and relaxation time of longitudinal acoustic waves on temperature and gamma irradiation dose in lithium fluoride crystals was studied for the first time. It was shown that the temperature dependence of the attenuation coefficient of longitudinal acoustic waves exhibits a maximum. The obtained results are explained by the acousto-ionic mechanism of interaction between acoustic waves and point defects via deformation potential.*

Keywords: *LiF crystal, acoustic wave, wave velocity, irradiation dose, temperature, acoustic properties, phonon, attenuation coefficient.*

Kirish. Litiy ftorid kristallari markazlashgan kubik tuzilishga ega ishqoriy galogen kristallari ichida kation (**Li^+**) va anion (**F^-**) radiuslarining mos ravishda **0,76** Å va **1,33** Å hamda orasidagi masofasining (**2,013** Å**)** eng qisqaligi bilan ajralib turadi [1]. Shuning uchun bu kristallar ajoyib optik va akustik xossalarga ega bo‘lgan dielektrik material bo‘lib, 1200 – 60000 Å shaffoflik diopozoni va nisbatan past sindirish ko‘rsatkichiga ega [2]. Bu kristallarning ionlashtiruvchi nurlanishga sezgirligi rang markazlari deb nomlanuvchi birlamchi va agregat nuqtaviy nuqsonlarni hosil qilish imkonini beradi, ularning ba’zilari xona haroratida hamda ko‘rinadigan va yaqin infraqizil nurlarda lazer faolligi bilan ajralib turadi [3, 4]. Nurlanish ta’sirida LiF kristallarida hosil bo‘ladigan nuqtaviy nuqsonlar va rang markazlari kristallning akustik, elastik hamda optik xossalarini o‘zgartiradi. Bu xossalar radiatsiyaga chidamli optik elementlar, radiatsion dozimetriya, lazer texnologiyalari hamda fotonik qurilmalarni yaratishda muhim ahamiyat kasb etadi.

Shuningdek, bunday kristallarda radiatsiya ta'sirida akustik xossalarini o'zgarishi, xususan, akustik to'lqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyenti batafsil o'rganilmagan.

Namunalar va tajriba usullari. Litiy ftorid namunalar [100], [110] va [111] kristallografik yo'nalishlar bo'ylab 1 gradus aniqlik bilan yo'naltirildi. Namunalarning o'lchamlari mos ravishda 15×12×10 mm, 14×10×5 mm va 14×10×8 mm ni tashkil etadi. Akustik to'lqinlarni hosil qilish uchun qalinligi 30 - 40 mkm bo'lgan, rezonans chastotasi 10 - 30 MHz diapazonidagi X- yoki Y-kesimli kvartsdan tayyorlangan piezoelektrik o'zgartirgichlar orqali hosil qilindi. Namunalarni nurlatish havoda, 320 K haroratda, ^{60}Co radioizotop manbadan chiqadigan gamma-nurlanish yordamida amalga oshirildi. Nurlanish tezligi 510 R/s bo'lib, umumiy doza 10^6 - 10^8 R ni tashkil etdi [5, 612-616b; 6, 22-27b]. Nurlantirilgan litiy ftorid namunalarida bo'ylama akustik to'lqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyenti "Impuls-ultratovush" usuli yordamida 290 - 450 K harorat oralig'ida o'lchandi (1-rasim). O'lchovlar silindrsimon shakldagi pech o'rnatilgan namuna yacheykasida, shuningdek, havoda o'tkazildi. Harorat 0,1 – 0,3 K/min tezlikda bosqichma-bosqich ko'tarilib borildi. Haroratni o'lchash aniqligi 0,05 K bo'lib, o'lchovlar xromel-alumen va xromel-kopil termojuftlari yordamida o'lchab olindi [9; 105-118b].



1-rasm. Impuls-ultratovush o'lchash tizimining blok-sxemasi

Yuqori chastotali generatorlar yordamida uzluksiz elektromagnit tebranishlar hosil qilinadi. Impulsli generator tomonidan hosil qilingan sinxron impulslar yuqori chastotali elektromagnit to'lqinlarni modulyatsiyalash orqali impulsli video signal ko'rinishiga keltiriladi va tadqiq qilinayotgan namunaga o'rnatilgan pyezoelektrik plastinkaga uzatiladi. Pyezoelektrik plastinkaga kelib tushgan elektromagnit signal pyezoelektrik o'zgartkichning teskari pyezoelektrik effekti asosida mexanik tebranishlarga, ya'ni akustik to'lqinlarga aylantiriladi. Hosil bo'lgan akustik to'lqin namuna ichida tarqalib, uning qarama-qarshi yuzasiga yetib boradi va qisman qaytadi. Namunaning qarama-qarshi tomonidan qaytgan akustik to'lqinlarning juda kichik qismi yana pyezoelektrik plastinkaga yetib keladi. Ushbu to'lqin pyezoelektrik plastinkada to'g'ri pyezoelektrik effekt natijasida kuchsiz elektr, ya'ni exo-impuls ko'rinishidagi elektromagnit signalga aylantiriladi [7; 1-6 b, 8; 9-14 b]. Hosil bo'lgan kuchsiz signal namunadan tashqariga chiqarilib, keyinchalik kuchaytirgich yordamida 10^4 – 10^5 marta kuchaytiriladi. Kuchaytirilgan signal ossillograf yordamida qayd etiladi. Ossillografda qayd etilgan akustik impulslar amplitudalarining kamayishi namunada akustik to'lqin energiyasining so'nishini ifodalaydi. Shu sababli, akustik to'lqinlarning namunada so'nish koeffitsiyenti α ketma-ket qayd etilgan, bir-biriga qo'shni bo'lgan A_1 va A_2 impulslar amplitudalarini o'lchash asosida aniqlanadi. Bunda impuls amplitudalarining namunadan o'tish jarayonida kamayishi akustik to'lqinlarning so'nish koeffitsiyentini tavsiflaydi va α qiymatini (1) ifoda yordamida hisoblash imkonini beradi:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} \cdot 20 \lg\left(\frac{A_1}{A_2}\right), \left[\frac{dB}{mks}\right] \quad (1)$$

Impuls amplitudalarining takroriy o'lchovlari va keyingi o'rtacha o'lchovlar tufayli so'nish koeffitsiyentini o'lchov aniqligi ~ 5% ni tashkil etdi. Akustik to'lqin tezligi, namuna uzunligini bilgan holda ketma – ket impulslar orasidagi Δt vaqtni o'lchash orqali (2) dan aniqlanadi [10; 465-500b]:

$$V = \frac{2L}{\Delta t}, \left[\frac{m}{s}\right] \quad (2)$$

Bu yerda L-namuna uzinligi, Δt – qarama – qarshi fazaga mos keladigan yuqori chastotali generatorning ikkita qo'shni amplitudalar orasidagi farq. Tezlikning o'lchov aniqligi ~ 1% ni tashkil qiladi [11; 1013-1015b].

Eksperimental natijalar va muhokama: Toza va gamma-nuri ta'sir qilgan litiy ftorid (LiF) kristallarida bo'ylama va ko'ndalang akustik to'lqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyentlari 30 MHz

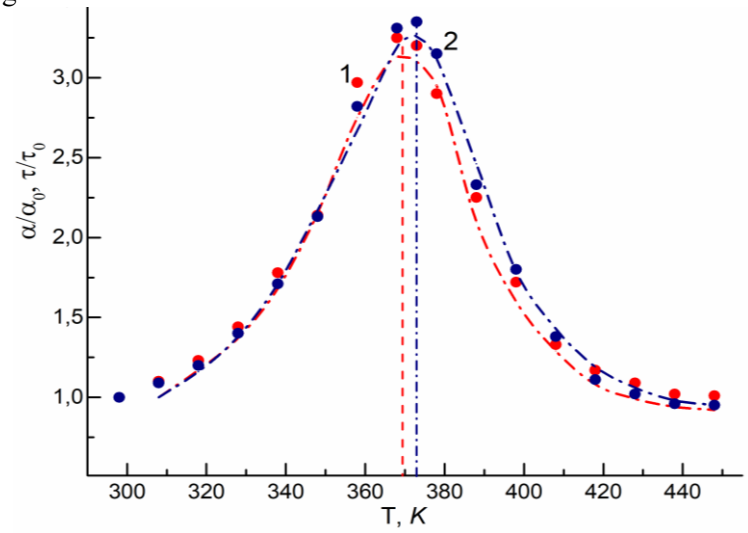
chastotada, xona haroratida o‘lchov natijalari 1-jadvalda keltirilgan. Bu jadvalda $\boldsymbol{q}$ akustik to‘lqin vektori va $\boldsymbol{\eta}$ akustik to‘lqin qutblanish (siljish) vektori yo‘nalishlarini ifodalaydi.

1-jadval.

Toza va gamma-nuri ta’sir qilgan LiF kristallarida bo‘ylama va ko‘ndalang akustik to‘lqinlar tezligi va so‘nish koeffitsiyenti

Kristall	Doza, R	$\boldsymbol{q}$	$\boldsymbol{\eta}$	V, 10^3 m/s	α, dB/μs
LiF	0	[100]	[100]	6.54	0.340
			[001]	4.90	0.035
	$1\cdot10^6$	[100]	[100]	6.52	0.097
			[001]	4.87	0.012
	$1\cdot10^7$	[100]	[100]	6.55	0.115
			[001]	4.91	0.014
	$8\cdot10^7$	[100]	[100]	6.55	0.124
			[001]	4.89	0.016
	$1\cdot10^8$	[100]	[100]	6.53	0.145
			[001]	4.88	0.019

Turli xil dozalarda nurlantirilgan LiF kristallari uchun [100] simmetriya o‘qida bo‘ylama akustik to‘lqinlar so‘nish koeffitsiyentlari 300-450 K temperatura oralig‘ida tadqiq qilindi (2-rasm). Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, temperaturaning ortishi bilan gamma-nuri ta’sir qilmagan litiy ftorid namunalaridan farqli ravishda gamma-nuri ta’sir qilgan namunalarda so‘nish maksimumlarining paydo bo‘lganligi kuzatildi. Bu so‘nish maksimumlari, nuqtaviy nuqsonlar mavjud ionli kristallarda (xususan, LiF) akustik to‘lqinlar so‘nishini tavsiflashda Akhiezer mexanizmi fonida **deformatsiya potensiali orqali** akustoion o‘zaro ta’sir mexanizmining ham mavjud ekanligi aniqlandi. Aynan ushbu mexanizm asosida so‘nish koeffitsiyentining temperaturaga bog‘liqligi orqali relaksatsion maksimumlar va aktivlanish energiyasini aniqlash imkonini beradi. Kristallda akustik to‘lqin tarqalganda panjara tugunlarida deformatsiyani vujudga keltiradi, natijada, gamma-nurlanish tufayli yuzaga keladigan nuqtaviy nuqsonlar atrofidagi harakatchan ionlar (Li^+) ning deformatsiya potensiali ta’sirida potensial to‘siqni yengib yangi vaziyatga o‘tishi uchun τ (relaksatsiya) vaqti talab etiladi. Bunda harakatchan ionlar akustik energiyaning ma’lum bir qismini issiqlik energiyasiga aylantiradi. Natijasida kristallda tarqaladigan akustik to‘lqinlarda so‘nish maksimumlarining hosil bo‘lishi kuzatiladi:



2-rasm. So‘nish koeffitsiyenti (nuqtalar) va ionlar harakatining relaksatsiya vaqti (uzlukli chiziq) ni temperaturaga bog‘liqligi. 1) - 10^7 R, 2) - $8\cdot10^7$ R

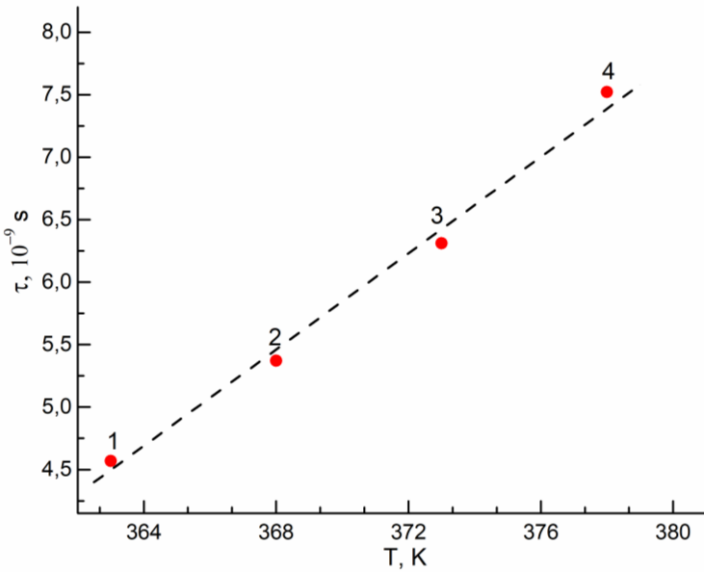
Bu jarayonni chuqurroq tahlil qilish maqsadida, akustik to‘lqinlarning so‘nish koeffitsiyentining temperaturaga bog‘liqligi hamda akustoion o‘zaro ta’sir mexanizmi (3) orqali harakatchan ionlarning relaksatsiya maksimumlari hisoblab topildi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, dielektrik kristallarda Axiezir so‘nish mexanizmiga qaraganda, deformatsiya potensiali orqali akustoion o‘zari ta’sir mexanizmining akustik to‘lqinlarlarning so‘nishiga ta’siri ko‘roq ekanligi aniqlandi va so‘nish koeffitsiyentida kuzatiladigan maksimumlar reloksatsiya mexanizmi yordamida tushuntirildi:

$$\Delta\alpha = \frac{NB^2}{2\rho V^3 k_B T}\frac{\omega^2\tau}{(1+\omega^2\tau^2)} = \frac{A}{T}\frac{\omega^2\tau}{(1+\omega^2\tau^2)} \quad (3)$$

$$A = \frac{NB^2}{2\rho V^3 k_B} \quad (4)$$

Bu yerda N - berilgan relaksatsiya jarayonda ishtirok etayotgan harakatchan ionlar soni, B - deformatsiya potensialining doimiysi, ρ - kristall zichligi, k_B - Boltsman doimiysi, V - akustik to‘lqin tezligi, τ – fononlar ketma-ket ikki marta sakrash oralig‘idagi vaqt. Tadqiqotlar jarayonida hisoblash uchun zarur bo‘lgan harakatchan ionlar soni va deformatsiya potensial konstantasining qiymatlari [7; 1-6, 12-13] dan olingan. N - harakatchan ionlar soni nurlanish dozasiga bog‘liq holda, $3{,}6\cdot10^{17}$ sm^{-3} dan $9{,}5\cdot10^{18}$ sm^{-3} gacha o‘zgaradi, B - deformatsiya potensial konstantasining qiymati 2,5 eV deb olindi, burchak tezlik $\omega = 1{,}88\cdot10^{8}$ s^{-1} ga teng. Olib borilgan tadqiqotlarga ko‘ra, so‘nish maksimumlari harakatchan ionlarning relaksatsiya vaqtining o‘zgarishi orqali yaxshi tavsiflanadi. (3) va (4) ifodalar ionlarning delokalizatsiyalangan harakati (ya’ni to‘liq ion o‘tkazuvchanlik holati) da ham lokalizatsiyalangan harakati (ya’ni polyarizatsion o‘tkazuvchanlik holati) da ham o‘rinlidir.

Nurlanish dozasining ortishi bilan so‘nish maksimumlari yuqori temperaturalar tomon siljiganligini ko‘rishimiz mumkin (2-rasim). Ushbu jarayonni tushuntirish uchun bizga qushimcha tadqiqotlar zarur bo‘lgani uchun 3-rasmda harakatchan ionlar relaksatsiya maksimumlarining temperaturaga bog‘liqligi o‘rganildi.

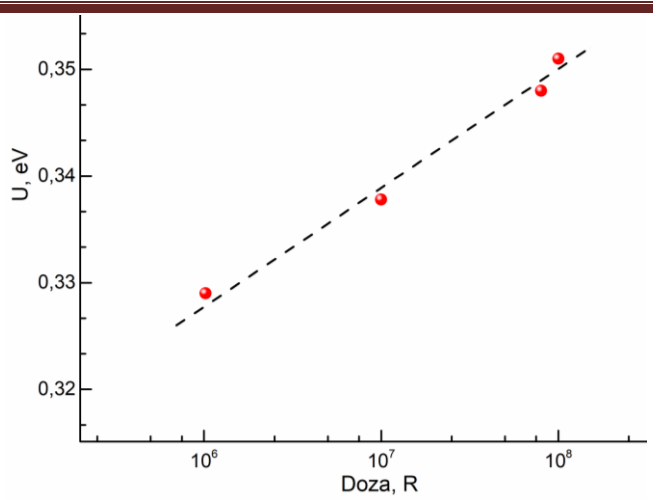


3-rasm. Harakatchan ionlar relaksatsiya vaqtining temperaturaga bog‘liqligi
(1;-10^6, 2; - 10^7, 3; - $8\cdot10^7$, 4; - 10^8) R

Turli dozalarda nurlantirilgan litiy ftorid kristallarida relaksatsiya vaqti dozaning ortishi bilan temperaturaga chiziqli holda o‘zgarishini ko‘rishimiz mumkin. Aakustoion o‘zari ta’sir mexanizmidan ko‘rinib turibdiki, akustik to‘lqinlarning so‘nishida relaksatsiya maksimumlari kuzatiladi, uning joylashuvi esa relaksatsiyalangan ionlar harakatining aktivlanish energiyasiga bog‘liq bo‘ladi. Agar bo‘ylama akustik to‘lqinlarning so‘nish koeffitsiyenti Axiezer va akustoion ta’sirlarning yig‘indisi deb qabul qilinsa va Axiezer ta’siri maksimumlar yaqinida harorat va nurlanish dozasiga chiziqli bog‘liqlik bilan o‘zgarsa, unda (5) ifodani 3-rasmdan T_{max} va relaksatsiya vaqti τ ni aniqlash orqali turli dozalarda nurlantirilgan kristallarda ion harakatining asosiy parametrini, jumladan ion harakatining aktivlanish energiyasi U ni hisoblash mumkin:

$$\tau^{-1} = \nu_0 e^{-U/k_B T} \quad (5)$$

Bu yerda $\nu = \tau^{-1}$ - potensial to‘siqni yengish uchun urinishlarning samarali chastotasi, ν_0 - relaksatsiyalanayotgan zarra (ion)ning muvozanat tebranish chastotasi, U - ion harakatining aktivlanish energiyasi. 3-rasmda gamma-nuri ta’sir qilgan LiF kristallarida aktivlanish energiyasini nurlanish dozasiga bog‘liqligi keltirilgan. Nuqsonlar konsentratsiyasining ortishi, harakatchan ionlar soninig ortishiga olib keladi, bu esa, o‘z navbatida, aktivlanish energiyasining qiymatlarini 0,33 dan 0,36 eV gacha o‘zgartiradi.



4-rasm. Ion harakatining aktivlanish energiyasini nurlanish dozalarid bog‘liqligi

Natijada, so‘nish koeffitsiyentining temperaturaga bog‘liqlik grafigida kuzatiladigan maksimumlarning yuqori temperaturalar sohasi tomon siljishi yuzaga keladi. Bunday siljish kristall tarkibidagi nuqsonlar konsentratsiyasining ortishi natijasida akustik to‘lqinlarning so‘nishda ishtirok etuvchi relaksatsion mexanizmlarning o‘zgarishi bilan bog‘liq bo‘ladi.

Xulosa. O‘tkazilgan tadqiqotlar natijasida gamma-nurlanish ta’siriga uchragan LiF kristallarida [100] simmetriya o‘qida bo‘ylama akustik to‘lqinlarning so‘nish koeffitsiyentida kuzatilgan maksimumlar Axiezer mexanizmidan tashqari, deformatsiya potensiali orqali akustoion o‘zaro ta’sir bilan bog‘liq qo‘shimcha relaksatsion so‘nish mexanizmi mavjudligini ko‘rsatdi. Nuqtaviy nuqsonlar konsentratsiyasining ortishi bilan so‘nish maksimumlarining yuqori temperaturalar tomon siljishi ionlar harakatining aktivlanish energiyasi gamma-nurlanish dozasi ortishi bilan chiziqli ravishda oshishi bilan izohlandi. Olingan natijalar fonon-nuqson o‘zaro ta’sirining akustik to‘lqinlar so‘nishidagi muhim rolini ko‘rsatdi.

ADABIYOTLAR:

1. Rosa Maria Montereali, Valentina Mussi, Enrico Nichelatti., Photonics in wide-band-gap materials: The challenge of color-center waveguides in lithium fluoride. Optical Materials. 160(2025) 116719.

2. Palik E.D., Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, New York, 1997, 98. ISBN 0125444230.

3. Dieulesan E., Royer D., “Elastic Waves in Solids”. Masson & Cie, Paris (1974). Distributed by Wiley, New York, 1980.

4. Шаскольской М. П., Акустические кристаллы. Справочник /Под ред. - М. Наука, 1982, 632 с.

5. М.А. Муссаева, Э.М. Ибрагимова, Ш.Н. Бузриков., “Оптические спектры гамма-облучённых кристаллов LiF с анизотропными наночастицами лития”. Оптика и спектроскопия, 2018, том 124, вып. 5, С. 612-616.

6. М.А. Муссаева, В.Н. Сандалов, Э.М. Ибрагимова, “Транспорт носителей заряда в облучённых LiF с наночастицами Li” Докл. АН РУз. 2013. №2. С. 22-27.

7. Vincenti M. A., Baldacchini G., Kalinov V. S., Montereali R.M. and Voitovich A. P. Spectroscopic investigation of F, F_2 and F_3^+ color centers in gamma irradiated lithium fluoride crystals. // (EURODIM 2010) 8. P. 1-6. doi:10.1088/1757-899X/15/1/012053

Izerrouken M., Guerbous L., Meftah A. Thermal annealing study of F center clusters in LiF single crystals. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2010. A613. P. 9-14.

9. L.E. Jones., “High-temperature behaviour of the elastic moduli of LiF and NaF: Comparison with MgO and CaO”. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 13 (1976) P.105-118.

10. В. И. Леманов, Г. А. Смоленский, “гиперзвуковые волны в кристаллах” 1972 г. Том 108, вып. 3. С. 465-500.

11. В.В. Леманов, Б.С. Ким, А.Н. Насыров. “Поверхности акустического затухания в кубических кристаллах”. ФТТ Том 26, в. 4, 1984г. С 1013-1015.

12. F.R. Akhmedzhanov, J.O. Kurbanov. “Attenuation of acoustic waves and Grüneisen tensor in lithium fluoride crystals”. The Journal of the Acoustical Society of America. – Acoustical Society of America (USA), 2022. Vol. 151. – P. A273-A275

13. Ф.Р. Ахмеджанов, Ж.О. Курбанов, Н.М Махаров., “Затухание акустических волн в кубических кристаллах фторида лития”. Доклады Академии наук Республики Узбекистан. 2021. – № 5. – С. 11-15.