ISNN:2181-1296



SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ШАРОФА РАШИДОВА

SAMARKAND STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SHAROF RASHIDOV

ILMIY AXBOROTNOMA

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
SCIENTIFIC JOURNAL

ANIQ VA TABIIY FANLAR SERIYASI

Matematika, Mexanika, Informatika
Fizika, Kimyo, Biologiya, Geografiya

№ 5/1 (141)
2023

ISSN 2181-1296

ILMIY AXBOROTNOMA

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК **SCIENTIFIC JOURNAL**

2023-yil, 5-son (141) **ANIQ VA TABIY FANLAR SERIYASI**

Matematika, Mexanika, Informatika, Fizika, Kimyo, Biologiya, Geografiya

Samarqand viloyat matbuot boshqarmasida ro‘yxatdan o‘tish tartibi 09-25.
Jurnal 1999-yildan chop qilina boshlagan va OAK ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR **R. I. XALMURADOV, t.f.d., professor**
BOSH MUHARRIR O‘RINBOSARLARI: **H.A. XUSHVAQTOV, f-m.f.d., dotsent**
A. M. NASIMOV, t.f.d., professor

TAHRIRIYAT KENGASHI:

ANIQ FANLAR

SH.A.ALIMOV - O‘zFA akademigi
S.N.LAKAYEV - O‘zFA akademigi (SamDU)
M.M.MIRSAIDOV - O‘zFA akademigi
A.S.SOLEEV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
I.A.IKROMOV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
B.X.XO‘JAYAROV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
A.G.YAGOLA - f.-m.f .d., professor (Moskva davlat universiteti, Rossiya)
I.I.JUMANOV - f.-m.f .d., professor (SamDU)
X.X.XUDOYNAZAROV - t.f.d., professor (SamDU)
ALBERTO DEL BIMBO - Florensiya universiteti professori, Italiya
L.SABIROV - f.-m.f .d., professor (SamDU)
A.JUMABOYEV - f.-m.f .d., professor (SamDU)
N.N.NIZAMOV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
O.Q.QUVONDIQOV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
I.A.RAXMATULLAYEV - f.-m.f .d., professor
A.SH.YARMUXAMEDOV - f.-m.f.n., (SamDU)
X.S.XAYDAROV - f.-m.f.n., dotsent (SamDU)

TABIY FANLAR

M.X.ASHUROV - O‘zFA akademigi
N.B. FERAPONTOV - k.f .d., professor (Moskva davlat universiteti, Rossiya)
SH. M. TUGIZOV - professor, Koliforniya universiteti, AQSh
H. I. AKBAROV - k.f.d., professor (O'zMU)
E. A. ABDURAXMONOV - k.f.d., professor (SamDU)
N. K. MUXAMADIYEV - k.f.d., professor (SamDU)
L. A. BULAVIN - Kiev milliy universiteti professori, Ukraina
X. Q. XAYDAROV - b.f.d., professor (SamDU)
Z. I. IZZATULLAYEV - b.f.d., professor (SamDU)
Sh. T. XOLIQULOV - g.f.d., professor (SamDU)
S. B. ABBASOV - g.f.d., professor (SamDU)
Q. S. YARASHEV - g.f.d., professor (SamDU)
GUN-SIK PARK - Seul univeriteti professori, Koreya
D.B.XURSANOV - g.f.f.d., dotsent (SamDU)
M. S. QUZIYEV - b.f.f.d., dotsent (SamDU)

Obuna indeksi – yakka tartibdagi obunachilar uchun **- 5583,**
tashkilot, korxonalar uchun **- 5584**

MUNDARIJA

Икромов И.А, Баракаев А.М. *Об ограниченности максимальных операторов для выпуклых функций, не имеющих конечный линейный тип*…….....	3-10
Safarov A.N., Muzafarov A.M., To‘xtayev U.O‘., Tog‘ayev B.S., Salimov Sh.G‘., Esanov I.T. *Tabiiy suvlar tarkibidagi radionuklidlar miqdorini radiokimyoviy radiometriya usullari yordamida aniqlash metodikasi*……..	11-20
Ruziyev J.E., Abduraxmanov I.E., Suvonqulov Sh.B. *Analitik obyektlardagi bariy ionlarini ionometrik aniqlash*……..	21-25
O‘rozov S., Aslanov Q., Qo‘ldoshev O. *Oltingugurt qoplamali fosforli o‘g‘itlar olish*……..	26-30
Mamatov Sh., Omonov Sh. *Differensial tenglamalar misolida fanlararo bog‘lanish*……..	31-35
Ахмеджанов Ф.Р., Тугалов Ф.Б., Курбанов Ж.О. *$NaCl_xBr_{1-x}$ кристалларининг акустик хоссалари*……	36-40
Inxonova A., Eshtursunov D., Botirov S., Murtazaqulov M., Bekchanov D. *Oqava suvlarni biologik tozalashda pvc&pei asosida olingan mis polimer komlpleksining qo’llanilishi*……	41-48
Qurbonov P.R. *O‘zbekiston respublikasi urbanistik tarkibi rivojlanishining geografik jihatlari*.....	49-55
Ikromov I.A., Jo‘raqulov A.J. *Regulyarlashtirilgan o‘lchovning bahosi haqida*……	56-63
Байжуманов А.А., Бердимуродов М.А. *Метод решения систем нелинейных булевых уравнений на основе минимизации дизъюнкций сложных конъюнкций*……	64-70
Abdullayev J.U. *Uglevodorodlar asosida spirtlar sintezi*……	71-75
Boyqobilov D.B., Jumag‘ulov Sh.H., Ro‘zimuradov O.N. *Tartiblangan titan dioksid nanotrubkalarining shakllanishi*……	76-80
Ахмеджанов Ф.Р., Мустафаев Т.Ш., Эшниязов О.И., Нуждов Г.С., Авдиевич В.Н. *Лантан трифторид кристалларида ионларнинг харакатига эластик деформациянинг таъсири*……	81-85
Хайдаров И.К. *Моделирование переноса растворенного вещества в неоднородном пороупругом глинистом сланце*……	86-91
Urolov Sh.Z., Shaymardanov Z.Sh., Jalolov R.R., Rustamova B.N., Arziqulov E.U. *Rux oksidi nanostrukturalarining morfologik va kristallografik xossalarining sintez sharoitiga bog‘liqligi*……	92-99
Zufarov A.M., Sagdeyev D.O., Galyametdinov Yu.G., Muxamadiyev N.K. *Turli xil anion stabilizatorlar bilan stabillashgan* CdS *sintezi va uning fotokatalitik xossalari*……	100-108

UDK: 534.2: 58.4: 548.9. **DOI: https://doi.org/10.59251/2181-1296.2023.v5.141.1.2330**

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $NaCl_xBr_{1-x}$

Ф.Р.Ахмеджанов, Ф.Б.Тугалов, Ж.О.Курбанов
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий
E-mail: tugalovferuz282@gmail.com

Аннотация. Исследована зависимость скорости, эффективных упругих констант и затухания акустических волн от концентрации брома в кристаллах твердых растворов NaCl-NaBr. Показано, что эффективные упругие константы вдоль направления [100] изменяются линейно при изменении состава твердого раствора при комнатной температуре. Максимальное изменение этих величин в диапазоне концентраций от 6 до 30 моль% не превышает 10-15%. Обнаружено также сильное до 70% уменьшение затухания продольных и поперечных акустических волн, которое объясняется уменьшением времени фононной релаксации и уменьшением эффективной константы ангармонизма.

Ключевые слова: твердый раствор NaCl-NaBr, затухание акустических волн, эффективные упругие постоянные, концентрация примеси.

$NaCl_xBr_{1-x}$ kristallarining akustik xossalari

Annotatsiya. NaCl-NaBr qattiq eritmali kristallardagi akustik to‘lqinlarning tezligi, samarali elastik konstantalari va so‘nishini brom konsentratsiyasiga bog‘liqligi o‘rganildi. [100] yunalishi bo‘yicha samarali elastik konstantalar xona haroratida qattiq eritma tarkibidagi o‘zgarishlarga qarab chiziqli ravishda o‘zgarishi ko‘rsatilgan. Ushbu qiymatlarning 6 dan 30 mol % gacha bo‘lgan konsentratsiyadagi maksimal o‘zgarishi 10-15% dan oshmaydi. Buylama va ko‘ndalang akustik to‘lqinlarning so‘nishida 70% gacha kuchli pasayish ham aniqlandi, bu fanonning relaksatsiya vaqtining kamayishi va samarali angrmoniklik konstantasining pasayishi bilan aniqlanadi.

Kalit so’zlar: NaCl-NaBr kristall, akustik to‘lqinlarning so‘nishi, effektiv elastik konstantalar, aralashmaning konsentratsiyasi.

Acoustic properties of $NaCl_xBr_{1-x}$ crystals

Abstract. The dependence of the velocity, effective elastic constants and attenuation of acoustic waves on the bromine concentration in crystals of NaCl-NaBr solid solutions has been studied. It is shown that the effective elastic constants along the [100] direction change linearly with changes in the composition of the solid solution at room temperature. The maximum change in these values in the concentration range from 6 to 30 mol% does not exceed 10-15%. A strong decrease of up to 70% in the attenuation of longitudinal and transverse acoustic waves was also discovered, which is explained by a decrease in the phonon relaxation time and a decrease in the effective anharmonicity constant.

Keywords: NaCl-NaBr solid crystal, attenuation of acoustic waves, effective elastic constants, impurity concentration.

Щелочно-галоидные кристаллы широко используются в различных областях техники, в том числе в акустических и акустооптических устройствах в относительно низкочастотной области акустических волн [1 - 4]. В качестве рабочей среды в этих устройствах часто применяются и щелочно-галоидные кристаллы хлорида и бромида натрия, обладающие высокими значениями упругих, а также фотоупругих констант, как в видимой, так и инфракрасной области электромагнитных волн

Скорость распространения и коэффициент затухания в них, в отличие от кристаллов более низкой симметрии, достаточно подробно исследованы в диапазоне низких ультразвуковых частот, в котором затухание зависит от частоты по квадратичному закону, согласно механизму Ахиезера [1, 2]. В то же время на высоких частотах такие исследования практически отсутствуют так как основным фактором, ограничивающим их, является большая величина коэффициента затухания.

Согласно имеющимся исследованиям примеси могут значительно уменьшать величину затухания в диэлектрических кристаллах [2, 5]. В связи с этим в настоящей работе

ультразвуковыми методами, а также методом Брэгговской дифракции света на акустических волнах исследовано влияние примеси брома на скорость распространения, эффективные упругие константы и коэффициент затухания продольных и поперечных акустических волн в чистых и смешанных кристаллах $NaCl_xBr_{1-x}$.

Концентрацию брома в исследованных образцах кристаллов определяли путем измерения плотности образцов, в предположении линейной зависимости плотности от концентрации одной из компонент в системе NaCl-NaBr. Все образцы представляли собой параллелепипеды, длинная сторона которых была ориентирована с точностью до 1 градуса вдоль главных кубических направлений [100] и [110] и [111]. Ориентация образцов осуществлялась с помощью плоскостей спаянности и последующей шлифовки и полировки кристаллических образцов.

Исследования проводились при комнатной температуре в диапазоне частот 30 – 1200 МГц. Продольные и поперечные акустические волны в образцах возбуждались пьезоэлектрическими преобразователями из кварца, соответственно, X или Y-среза, толщиной 30-40 микрон. Измерения скорости и коэффициента затухания акустических волн на относительно низких частотах (до 100 МГц) проводились модифицированным методом «импульсной интерференции» Вильямса–Лэмба [1, 6], особенность которого заключается в сравнении фаз акустических волн, прошедших различный путь в исследуемом образце.

Одним из основных модулей низкочастотной установки является амплитудный селектор, который открывается в определенный промежуток времени, являющийся окном пропускания. Длительностью такого окна пропускания можно управлять за счет длительности синхроимпульса, открывающего этот селектор. Таким образом, осуществляется селекция определенного импульса в серии эхо импульсов и измеряется его амплитуда с помощью вольтметра. По измеренным значениям амплитуд соседних импульсов A_1 и A_2 определялся коэффициент затухания акустических волн α [6, 7]:

$$\alpha = \frac{20\lg(\frac{A_1}{A_2})}{2L} \qquad (1)$$

где L – длина образца. Точность определения коэффициента затухания составляла ~5%, за счет многократного измерения амплитуд импульсов и последующего усреднения. Наблюдаемые при изменении частоты генератора непрерывных колебаний, интерференционные нули или максимумы амплитуды импульсов, позволяют определить значение скорости акустической волны в образце V из соотношения [7]:

$$V=2L\cdot\Delta\nu, \qquad (2)$$

где $\Delta\nu$ – разность двух соседних частот высокочастотного генератора, соответствующих противофазной интерференции. Указанная разность определялась по показаниям цифрового частотомера с абсолютной точностью ±10 Гц. Точность определения скорости акустической волны ограничивалась точностью измерения длины образца и составляла ~0,01%.

Исследования на частотах выше 200 МГц до 1200 МГц производились с помощью Брэгговской дифракции света на акустических волнах, при комнатной температуре [8]. В качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны λ_0=632,8 нм. Относительные значения интенсивности дифрагированного света определялись с помощью фотоэлектронного умножителя, входящего в состав модуля фотоприемника. Электрический сигнал на выходе фотоэлектронного умножителя является результатом фотоэлектрического преобразования дифрагированного на звуке света в электрический импульс и представляет собой импульс с передним фронтом примерно 200 нс, вершиной 1мкс. и задним фронтом порядка 400 нс.

В целом, полезный сигнал состоит из серии таких импульсных сигналов, временной интервал между которыми меняется в зависимости от длины кристалла, а амплитуда импульсов в серии уменьшается по экспоненциальному закону. При этом амплитуда каждого импульса серии несет полезную информацию. Следовательно, фотоприемник должен обеспечивать селекцию определенного импульса серии и измерение его амплитуды. Выполнение указанного условия обеспечивается акустооптической установкой, так как частоту следования исследуемого сигнала можно уменьшить до нескольких десятков герц. Соответственно,

временное расстояние между зондирующими импульсами увеличивается до нескольких десятков миллисекунд. Это позволяло получать сигналы с фотоприемника, амплитуда которых превышала амплитуду шумов в несколько раз. Таким образом устранялся эффект накопления шумов в фотоэлектронном умножителе.

Скорость акустических волн V определялась по углу Брэгговской дифракции света [6]:

$$V = \lambda_0 \cdot \nu / (2 \cdot \mathrm{Sin}\, \theta_B), \quad (3)$$

где ν - линейная частота акустической волны, $\theta_Б$ - внешний Брэгговский угол. Точность определения скорости звука этим методом зависит от точности определения угла дифракции, и составляет ~ 0.2% [6]. Коэффициент затухания акустических волн α определялся методом Брэгговской дифракции света на звуке по зависимости интенсивности дифрагированного света *I*, от расстояния до преобразователя x_1 и x_2:

$$\alpha = \frac{10 \cdot \lg\left(I(x_1) / I(x_2)\right)}{x_2 - x_1} \quad (4)$$

Точность определения коэффициента затухания составляла около 5%.

Результаты исследования скорости и затухания продольных и поперечных акустических волн вдоль кристаллографического направлении [100] и значения рассчитанных эффективных упругих констант в кристаллах $NaCl_xBr_{1-x}$ при комнатной температуре приведены в таблице 1. В данной таблице концентрация брома в образцах указана в мольных единицах**.** Значения коэффициента затухания акустических волн приведены для частоты 1000 МГц.

Таблица 1. Коэффициенты теплопроводности и затухания акустических волн вдоль направления [100] на частоте 1000 МГц и эффективные упругие константы в кристаллах $NaCl_xBr_{1-x}$.

Br, моль %	λ, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$	Продольные волны		Поперечные волны	
		α, $дБ \cdot мкс^{-1}$	$c'_{эфф}$, 10^{10} $Н \cdot м^{-2}$	α, $дБ \cdot мкс^{-1}$	$c'_{эфф}$, 10^{10} $Н \cdot м^{-2}$
0	5.96	18	4.85	2.0	1.27
6	2.64	9.54	4.80	1.0	1.23
12	1.79	8.46	4.75	0.72	1.21
23	1.31	6.84	4.66	0.56	1.16
30	1.20	7.00	4.60	0.60	1.13
100	5.60	25	3.97	3.0	0.998

Измерения показали также, что в исследованном диапазоне коэффициент затухания как продольных, так и поперечных акустических волн зависит от частоты по квадратичному закону. Это указывает на то, что основным механизмом затухания акустических волн в кристаллах $NaCl_xBr_{1-x}$ является фонон-фононный механизм, впервые рассмотренный Ахиезером [9]. На рис. 1 в относительных единицах показаны зависимости эффективных упругих констант (зависимости 1 и 2) и коэффициента затухания продольных (зависимость 3) и поперечных (зависимость 4) акустических волн с частотой 1000 МГц от концентрации брома в исследованных смешанных кристаллах $NaCl_xBr_{1-x}$при комнатной температуре. Необходимые для расчета данные по плотности и коэффициенту теплопроводности использовались из работы [10]. Было найдено, что наибольшее относительное уменьшение затухания (α/α_0) в таких смешанных кристаллах при распространении акустических волн вдоль кристаллографического направления [100] составляет 0,38 для продольных акустических волн и 0,28 для поперечных акустических волн при концентрации брома 23 мол.%.

На рисунке 1 приведены также результаты измерения теплопроводности из [9]. Видно, что в кристаллах $NaCl_xBr_{1-x}$ теплопроводность (кривая 5) также сильно и нелинейно уменьшается с увеличением концентрации примеси и особенно хорошо коррелирует с данными по затуханию поперечных акустических волн в этих кристаллах. Так, в кристаллах $NaCl_{0.77}Br_{0.23}$ для поперечных волн отношение α/α_0=0.28, а отношение $к/к_0$=0.22 (значения с индексом «0» относятся к чистым кристаллам NaCl).

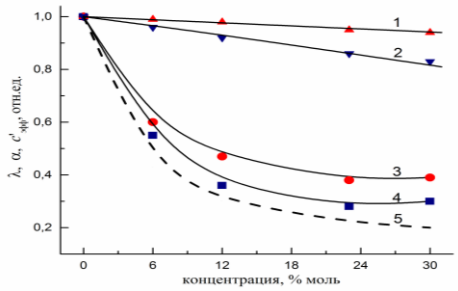

Рис. 1. Зависимость эффективных упругих констант (1 и 2), теплопроводности (5) и коэффициента затухания продольных (3) и поперечных (4) акустических волн с частотой 1000 МГц от концентрации брома в кристаллах $NaCl_xBr_{1-x}$

Анализ полученных результатов по затуханию акустических волн можно провести на основе механизма Ахиезера, согласно которому изменение затухания в кристаллах с примесями хорошо коррелирует с изменением теплопроводности κ и выражается соотношением [5, 11]:

$$\alpha = \gamma^2 \frac{\beta \cdot 8.68 \cdot \lambda T \omega^2}{2\rho V^2 V_D^2} \tag{5}$$

где β – множитель порядка единицы, ρ - плотность, T – температура, λ – коэффициент теплопроводности, ω - частота акустической волны, γ – эффективная константа Грюнайзена, зависящая от направления волнового вектора и типа акустической волны, V_D – средняя Дебаевская скорость.

Влияние примесей на затухание продольных и поперечных акустических волн в кристаллах было рассмотрено в работах [4, 10] при условии $\omega \cdot \tau << 1$. Для кристаллов с примесями принимается

$$\tau = (\tau_i^{-1}(k_T) + \tau_l^{-1}(k_T))^{-1}, \tag{6}$$

где k_T -волновой вектор тепловых фононов, τ_i - время релаксации, связанное с неупругим фонон-фононным рассеянием, τ_l - время релаксации**,** связанное с упругим рассеянием на примесях. При соотношении между указанными временами релаксации таком, что $\tau_i <= \tau_l(k_T)$, получено, что затухание поперечных упругих волн определяется выражением [10]:

$$\alpha = \beta \cdot (\omega^2 \cdot T / \rho \cdot V^2) \sum_{\vec{k},j} C(\vec{k}, j) \cdot \tau(\vec{k}, j) \cdot \gamma^2(\vec{k}, j) \tag{7}$$

ω и V - частота и скорость акустических волн, $C(\vec{k}, j)$ -теплоемкость фононной ветви (k, j), В соотношении (7) вместо значения τ, используемого для чистого кристалла, надо подставлять значение $\tau = (\tau_i + \tau_l)^{-1}$, которое является результирующим временем релаксации, определяемое как неупругим фонон-фононным рассеянием, так и упругим рассеянием акустических фононов на точечных дефектах атомного масштаба. В результате, для поперечных акустических волн изменение коэффициента затухания в примесных кристаллах полностью определяется изменением времени релаксации τ.

В то же время выражение для затухания продольных акустических волн получено в работе [10] для двух предельных случаев. В случае, когда коэффициенты Грюнайзена зависят только от направления волнового вектора фонона, но не зависят от частоты, выражение для затухания продольных волн принимает вид [11]:

$$\alpha_L \approx \sum_{\vec{k},j} C \cdot \tau \cdot (\gamma - \bar{\gamma})^2 \tag{8}$$

где эффективная константа фонон-фононного взаимодействия $<\gamma^2>$ равна [9, 11]:

$$<\gamma^2> = \sum_{\vec{k},j} \gamma^2(\vec{k}, j) \cdot C(\vec{k}, j) / C_V \tag{9}$$

и рассматривается в качестве варьируемого параметра, который определяется приравниванием экспериментального и расчетного значений затухания при определенной температуре. Таким образом, в этом случае затухание продольных акустических волн должно меняться при введении примесей так же, как и затухание поперечных волн.

В другом предельном случае, когда коэффициенты Грюнайзена зависят от частоты и не зависят от направления волнового вектора и поляризации фонона, выражение для коэффициента затухания имеет вид [10]:

$$\alpha_L \approx \sum_{\vec{k},j} C \cdot \tau_i \cdot (\gamma - \bar{\gamma})^2 \cdot \qquad (10)$$

То есть в выражение для затухания входит время релаксации τ_i, описывающее только неупругое фонон-фононное рассеяние. В результате в кристаллах с примесями затухание продольных акустических волн будет уменьшаться менее сильно по сравнению с затуханием поперечных волн.

Таким образом уменьшение затухания продольных и поперечных акустических волн в кристаллах $NaCl_xBr_{1-x}$ может быть обусловлено как дополнительным упругим рассеянием фононов на примесях, т.е. уменьшением времени релаксации τ, так и уменьшением эффективной константы ангармонизма γ под влиянием дефектов кристаллической решетки. Для разделения вкладов рассмотренных механизмов в затухание акустических волн необходимы акустические исследования в широком температурном диапазоне.

Результаты исследования показали, что в кристаллах твердых растворов $NaCl_xBr_{1-x}$ эффективные упругие константы, определяющие скорость продольных и поперечных волн вдоль направления [100] изменяются линейно при изменении состава твердого раствора при комнатной температуре. При этом в исследованном диапазоне концентраций максимальное изменение этих величин не превышает 10-15%.

В то же время затухание как продольных, так и поперечных акустических волн при изменении состава твердого раствора изменяется нелинейно с наличием минимума в зависимости коэффициента затухания от концентрации брома. Обнаружено что примесь брома в твердых растворах NaCl-NaBr сильно уменьшает затухание продольных (на 60%) и поперечных (на 70%) акустических волн, которое объясняется как дополнительным упругим рассеянием фононов на примесях, так и соответствующим уменьшением времени релаксации, так и уменьшением эффективной константы ангармонизма.

Литература

1. E. Dieulesain, D. Royer. Elastic waves in solids. Application for treatment of signals. M. Nauka 1982, 342 p.
2. У Мэзон. Влияние примесей и фононных процессов на затухание ультразвука в германии, кварце и кремнии. // Сб. Физическая акустика. Под редакцией У. Мэзона. М.: Мир, - Т. 3, Часть Б. - Гл. 6. -1968. - С. 285-341.
3. И.Г. Кулеев, И.И. Кулеев. Анизотропия поглощения продольного ультразвука в ангармонических процессах рассеяния в кубических кристаллах Ge, Si, InSb, MgO и KCl: роль затухания фононных состояний. // ФТТ, 2010. - Т. 52. - Вып 7. - С. 1377-1391.
4. Ф.Р. Ахмеджанов, Ф.Б. Тугалов. Температурная зависимость скорости и затухания акустических волн в гамма облученных кристаллах фторида лития. Научный Вестник СамГУ, №3, 2023, с. 99-103.
5. R. Nava, M. P. Vecchi, J. Romero and B. Fernandez. Akhiezer damping and the thermal conductivity of pure and impure dielectrics. Phys. Rev. B. Vol. 14, No 2. 1975, pp. 800-807.
6. Ф.Р. Ахмеджанов, Ж.О. Курбанов, Н.М. Махаров. Затухание акустических волн в кубических кристаллах фторида лития. УзРФАМ.5-2021. с. 11-15.
7. F.R. Akhmedzhanov, S.Z. Mirzaev, U.A. Saidvaliev., Singularities of anisotropy of acoustic attenuation in paratellurite crystals. Vol. 34, 045045 (2018)
8. N.V. Polikarpova, E.A. Dyakonov, V.B. Voloshinov. Acousto-optic investigation of acoustic wave's propagation in anisotropic medium. AIP, 2009. V. 1433, p. 110-113.
9. A. Akhiezer. About Sound Absorption in Solids, J. of Experimental and Theoretical Physics (SU). - Moscow, 1938. - No 8, - pp. 1318-1329.
10. Акустические кристаллы. Справочник /Под ред. М. П. Шаскольской. – М. Наука, 1982, 632 с.
11. Ю.А. Логачев, Б.Я Мойжес. К теории поглощения звука по Ахиезеру. – ФТТ. - Санкт-Петербург, 1974, - Т. 16. - № 8, - С. 2219-2223.