

ПОГЛОЩЕНИЕ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЛЕГИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

А.В. ЕГАНЫН^{1,2*}, Н.Э. КОКАНЯН^{3,4}, Э.П. КОКАНЯН^{1,2}

¹Армянский государственный педагогический университет, Ереван, Армения

²Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

³Chaire Photonique, Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes,
Centrale Supélec, Metz, France

⁴Université de Lorraine, Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes,
Centrale Supélec, Metz, France

*e-mail: aveganyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 26 июня 2023 г.)

В рамках изотопической модели дефекта получены новые выражения для быстрой оценки коэффициентов затухания продольных и поперечных гиперзвуковых волн в легированных монокристаллах ниобата лития в режиме Ахиезера. Показано, что введение в кристалл примесей приводит к изменению как величины коэффициента затухания звука, так и его температурной зависимости.

1. Введение

В настоящее время интенсивно развиваются исследования, направленные на изучение влияния примесей на поглощение акустических волн (в частности, гиперзвуковых волн, диапазон 10^9 – 10^{13} Гц) в акустооптических кристаллах, таких как ниобат лития [1–2] (LiNbO_3 , пространственная группа – $R3c$ [3]). Причиной этому служит возможность уменьшения абсолютной величины коэффициента поглощения акустических волн путем внедрения примесей в кристаллическую решетку. Последнее тесно связано с так называемым акустооптическим качеством, являющимся важным критерием для применения материалов. Величина коэффициента акустооптического качества данного кристалла определяется выражением [4–6]:

$$M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho V^3}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления среды, p – эффективная фотоупругая постоянная, ρ – плотность материала, V – скорость звука в среде.

2. Оценка коэффициентов затухания продольных и поперечных гиперзвуковых волн в легированных кристаллах ниобата лития

В нашей предыдущей работе [7] было показано, что коэффициенты поглощения поперечных (α_L) и продольных (α_S) гиперзвуковых волн в режиме затухания Ахиезера (при $\omega\tau < 1$, где τ – время термической релаксации фононов,

$\omega = 2\pi f$, где f – частота звука) в чистых (без примесей) монокристаллах ниобата лития могут быть оценены с высокой точностью из следующих простых выражений:

$$\alpha_L \cong 1.32 \times 10^{-3} T f^2, \quad (2)$$

$$\alpha_S \cong 4.05 \times 10^{-3} T f^2, \quad (3)$$

где α измеряется в дБ/см, частота f измеряется в ГГц, а абсолютная температура T в К.

Внедрение примесей может существенно изменить как спектральные характеристики фоновой системы, так и характеристики рассеяния квазичастиц. Это означает, что даже в рамках простейших моделей теория должна принимать во внимание большую группу факторов. Если при внедрении примесей изменение силовых постоянных незначительно, что оказывается применимым к целому ряду кристаллов, можно рассматривать примесь как изотопическую модель дефекта (понимается просто дефект массы) [8–9]. В рамках указанной модели, в режиме Ахиезера при температурах ниже температуры Дебая ($T < T_D$) коэффициент поглощения звука в чистом кристалле ($\alpha_{L,S}$) больше того же от примесного кристалла ($\alpha_{L',S'}$) в отношении [8, 10]:

$$\frac{\alpha_{L,S}}{\alpha_{L',S'}} = \left[\frac{kT}{MV^2 \varepsilon^2 c(1-c)} \right]^{2/3}, \quad (4)$$

где $\varepsilon = |\Delta M|/M$ – безразмерный параметр, характеризующий возмущение, создаваемое примесным атомом (ионом), ΔM – разность масс атома (иона), находящегося в данном узле кристаллической решетки, и замещающего его атома (иона) примеси, c – относительная концентрация примеси, k – постоянная Больцмана.

Отметим, что M удобнее считать молярной массой матрицы без примесей, а ΔM – разностью молярных масс данного соединения в случае легирования. Выражение (4) выполняется до $\varepsilon \approx 1$ и $c = 1/2$ [8].

Учитывая указанное выше, в режиме Ахиезера при ($T < T_D$) в легированных монокристаллах ниобата лития (когда ион примеси замещается преимущественно в одном кристаллографическом положении) коэффициенты поглощения продольных и поперечных гиперзвуковых волн исходя из формул (2)–(4) можно оценить из следующих выражений:

$$\alpha'_L \cong 1.32 \times 10^{-3} T^{1/3} f^2 \left(\frac{\Delta M^2 V_L^2 c(1-c)}{Mk} \right)^{2/3}, \quad (5)$$

$$\alpha'_S \cong 4.05 \times 10^{-3} T^{1/3} f^2 \left(\frac{\Delta M^2 V_S^2 c(1-c)}{Mk} \right)^{2/3}, \quad (6)$$

где V_L и V_S – соответственно скорости продольной и поперечной акустических волн в среде.

Подставляя значения постоянной Больцмана и молярной массы ниобата лития ($M = 147.85$ г/моль) в (5) и (6), а также учитывая размерности величин (для счета f в ГГц), умножив указанные выражения на 10^{-18} , получим:

$$\alpha'_L \cong 8.23 \times 10^{-2} T^{1/3} f^2 \left[\Delta M^2 V_L^2 c(1-c) \right]^{2/3}, \quad (7)$$

$$\alpha'_S \cong 0.25 T^{1/3} f^2 \left[\Delta M^2 V_S^2 c(1-c) \right]^{2/3}. \quad (8)$$

3. Результаты и обсуждение

При комнатных температурах ($T = 300$ К) в легированных монокристаллах ниобата лития из (7) и (8) для нормированных коэффициентов затухания ($\Gamma = \alpha/f^2$, измеряется в дБ/смГГц² [11]) продольной и поперечной гиперзвуковых волн получаем выражения:

$$\Gamma'_L \cong 0.55 [\Delta M^2 V_L^2 c (1-c)]^{2/3}, \quad (9)$$

$$\Gamma'_S \cong 1.67 [\Delta M^2 V_S^2 c (1-c)]^{2/3}. \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует, что для оценки нормированных коэффициентов затухания продольной и поперечной гиперзвуковых волн в легированных монокристаллах ниобата лития при комнатных температурах необходимо знать скорости распространения акустических волн, которые отличаются в зависимости от кристаллографических направлений, а также необходимо выяснить концентрацию примеси в веществе. Если введение данной примеси не приводит к большому изменению указанных скоростей по сравнению с кристаллом без примеси, то можно применить их измеренные значения в чистой матрице. Например, при $[V_L (L[100])] = 6.57$ км/с, $[V_S (S[001])] = 3.59$ км/с [12], из (9) и (10) будем иметь:

$$\Gamma'_L \cong 1.93 [\Delta M^2 c (1-c)]^{2/3}, \quad (11)$$

$$\Gamma'_S \cong 3.91 [\Delta M^2 c (1-c)]^{2/3}. \quad (12)$$

Например, из выражений (11) и (12) следует, что при $T = 300$ К, $\varepsilon \approx 1$ и $c = 1/2$ нормированные коэффициенты поглощения гиперзвуковых волн в легированном кристалле ниобата лития на порядок ниже по сравнению с кристаллом без примеси.

4. Заключение

На основе выражений для оценки затухания гиперзвуковых волн в монокристаллах ниобата лития, в рамках изотопической модели дефекта, получены новые выражения для оценки коэффициентов затухания продольных и поперечных гиперзвуковых волн в легированных монокристаллах ниобата лития в режиме Ахизера при температурах ниже температуры Дебая.

Показано, что в режиме затухания Ахизера в легированных кристаллах ниобата лития по сравнению с кристаллом без примеси изменяется температурная зависимость коэффициентов поглощения гиперзвука. На основе полученных выражений показано также, что введение в кристалл примесей может приводить к значительному изменению величин коэффициентов затухания гиперзвуковой волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Yudistira, A. Boes, B. Graczykowski, F. Alzina, L.Y. Yeo, C.M. S. Torres, A. Mitchell. Phys. Rev. B, **94**, 094304 (2016).
2. Y. Cang, Y. Jin, B. Djafari-Rouhani, G. Fytas. J. Phys. D: Appl. Phys., **55**, 193002 (2022).

3. N. Kokanyan, N. Mkhitarian, G. Demirkhanyan, A. Kumar, M. Aillerie, D. Sardar, E. Kokanyan. Crystals, **11**, 50 (2021).
4. A. Korpel. Acousto-Optics, New York, Marcel Dekker, 1996.
5. П.А. Никитин. Изв. РАН, Серия Физическая, **81**, 93 (2017).
6. J. Streque, T. Aubert, N. Kokanyan, F. Bartoli, A. Taguett, V. Polewczyk, E. Kokanyan, S. Hage-Ali, P. Boulet, O. Elmazria. IEEE Sensors Letters, **3**, 2501204 (2019) doi:10.1109/LSENS.2019.2908691.
7. A.V. Yeganyan, N.E. Kokanyan, M. Aillerie, E.P. Kokanyan. J. Contemp. Phys., **58**, 81 (2023).
8. Г.М. Григорович, Ю.В. Илизавский, М.А. Рувинский, В.П. Щетинин. ФТТ, **25**, 3671 (1983).
9. Ю.В. Илизавский, В.М. Стернин. ФТТ, **27**, 385 (1985).
10. Л.Э. Гуревич, Б.И. Шкловский, ЖЭТФ, **53**, 1726 (1967).
11. V. Saleev, A. Shipilova. Mod. Phys. Lett. B, **32**, 1850063 (2018).
12. Y. Shuhua, L. Hong, H. Xiaobo. J. Alloys and Compounds, **455**, 501 (2008).

ՀԻՊԵՐՉԱՅՆԱՅԻՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ԿԼԱՆՈՒՄԸ ԼԵԳԻՐՎԱԾ
ԼԻԹԻՈՒՄԻ ՆԻՈԲԱՏԻ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ

Ա.Վ. ԵԳԱՆՅԱՆ, Ն.Է. ԿՈԿԱՆՅԱՆ, Է.Պ. ԿՈԿԱՆՅԱՆ

Արատի իզոտոպական մոդելի շրջանակներում ստացվել են լեգիրված լիթիումի նիոբատի միաբյուրեղներում՝ Ախիեզերի ռեժիմում երկայնական և լայնական հիպերձայնային ալիքների կլանման գործակիցների արագ գնահատման համար նոր արտահայտություններ: Ցույց է տրված, որ բյուրեղում խառնուկների ներմուծումը բերում է ինչպես ձայնի մարման գործակցի մեծության, այնպես էլ դրա ջերմաստիճանային կախվածության փոփոխությանը:

ABSORPTION OF HIPERSONIC WAVES IN DOPED
LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS

A.V. YEGANYAN, N.E. KOKANYAN, E.P. KOKANYAN

Within the framework of the defect isotopic model, new expressions for the rapid estimation of the absorption coefficients of longitudinal and transverse hypersonic waves in the alloyed lithium niobate single crystals in the Akhiezer regime have been obtained. It is shown that the introduction of impurities in the crystal leads to a change in both the magnitude of the sound attenuation coefficient and its temperature dependence.