

СВЯЗИ МЕЖДУ НЕКОТОРЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ И ОПТИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ И ИХ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СТЕХИОМЕТРИИ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ

А.В. ЕГАНЫН^{1*}, Н.Э. КОКАНЯН^{2,3}, Н.Э. БАБАДЖАНЫН¹, Э.П. КОКАНЯН¹

¹Армянский государственный педагогический университет, Ереван, Армения

²Chaire Photonique, Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes,
Centrale Supélec, Metz, France

³Université de Lorraine, Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes,
Centrale Supélec, Metz, France

*e-mail: aveganyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 26 августа 2024 г.)

Получены новые удобные для быстрой оценки соотношения, выражающие связи между некоторыми оптическими и акустическими величинами, а также стехиометрией монокристалла ниобата лития. Показано, что определяя коэффициенты затухания продольных или поперечных гиперзвуковых волн, можно с высокой точностью оценить показатели преломления в терагерцовом диапазоне, а также выяснить стехиометрический состав кристалла ниобата лития.

1. Введение

В настоящее время интенсивно развиваются исследования, направленные на изучение взаимодействий и взаимосвязи оптических (в частности терагерцовых оптических волн в диапазоне частот 10^{11} – 3×10^{11} Гц) и акустических (в частности, гиперзвуковых волн в диапазоне 10^9 – 10^{13} Гц) параметров в акустооптических кристаллах, что тесно связано с акустооптическим качеством [1–2]. Величина коэффициента акустооптического качества, являющегося важным критерием для применения данного кристалла, определяется выражением [3–4]:

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

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

Исследование дифракции света как на поперечных, так и на продольных акустических волнах в кристалле ниобата лития является актуальной задачей. Среди материалов особое место в акустооптике занимает кристалл ниобата лития (LiNbO_3 , НЛ, пространственная группа – $R3c$ [5–6]). Несмотря на то, что НЛ в качестве уругооптической среды известен достаточно давно, практическое использование его для реализации высокочастотной дифракции началось только с развитием технологии создания пьезоэлектрических СВЧ преобразователей [7–8]. Именно в области СВЧ управляющих сигналов НЛ обладает рядом преимуществ по сравнению с другими кристаллами, главными из которых являются

низкое затухание упругих СВЧ волн и относительно высокое уругооптическое качество как в отношении квазиизотропной, так и анизотропной дифракции.

Особенностью акустооптического кристалла НЛ является существование фазы НЛ в широком интервале (соотношения $C = \text{Li}/(\text{Li} + \text{Nb}) = 0.46\text{--}0.50$ [9]). В результате такие физические свойства НЛ, как параметры решётки, показатели преломления и другие параметры существенно зависят от величины C . Таким образом, для многих практических применений требуется количественный контроль величины C в кристалле НЛ.

2. Взаимосвязь некоторых акустооптических величин и их зависимость от стехиометрического состава кристалла ниобата лития

В работе [10] для монокристаллов НЛ при интервале частот 0.7–1 ТГц получены следующие эмпирические соотношения для коэффициентов преломления (соответственно для X -среза и Z -среза):

$$n_x = 7 \times 10^{-4} T + 4.8305, \quad (2)$$

$$n_z = 5 \times 10^{-4} T + 6.438. \quad (3)$$

Акустическая волна, распространяясь в кристалле НЛ, создает периодическое возмущение показателя преломления, образуя тем самым такой физический объект, который во многом сходен с дифракционной решеткой. Световое излучение, проходя сквозь такую структуру, испытывает дифракцию. Например, вдоль направления X в кристалле НЛ имеется два возможных варианта квазиортогональной анизотропной дифракции. Как видно из выражения $k_e \pm K = k_o$, акустооптическое взаимодействие происходит между оптическими волнами с векторами k_e и k_o с суммированием либо вычетом волнового вектора звука K . Индексы o , e соответствуют обыкновенному и необыкновенному световым лучам в кристалле НЛ [11].

Относительно частот можно записать следующее:

$$\omega_e \pm \Omega = \omega_o, \quad (4)$$

где ω_e и ω_o – частоты необыкновенного и обыкновенного оптических лучей; Ω – частота звука. Для зависимости частот от двулучепреломления ($\Delta n = n_o - n_e$) можно записать [11]:

$$\omega_o = \frac{\Omega c}{V \Delta n} \pm \frac{\Omega n_e}{\Delta n}, \quad (5)$$

$$\omega_e = \frac{\Omega c}{V \Delta n} \pm \frac{\Omega n_o}{\Delta n}, \quad (6)$$

где c – скорость света в вакууме, V – скорость звука в среде, n_o и n_e – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного световых лучей вдоль выбранного направления, соответственно.

В работе [12] из экспериментальных данных по определению двулучепреломления Δn в зависимости от C (для составов 47–50 мол% Li_2O при температурах 50–600 К в диапазоне длин волн 400–200 нм максимальная погрешность составляла $\Delta n \approx 0.005$) получено следующее выражение:

$$\Delta n = 1.0043(0.5 - C) - 0.09876. \quad (7)$$

Исследования показали, что изменение Δn при изменении стехиометрии НЛ практически полностью определяется изменением необыкновенного показателя преломления n_e , в то время как обыкновенный показатель преломления n_o остается почти постоянным.

3. Результаты и их обсуждение

В нашей работе [13] было показано, что коэффициенты затухания (Γ_L , Γ_S), или 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, $\omega = 2\pi f$ и f – частота звука) в чистых (без примесей) монокристаллах НЛ могут быть оценены с высокой точностью из следующих простых выражений:

$$\Gamma_L = \frac{\alpha_L}{f^2} \cong 1.32 \times 10^{-3} T, \quad (8)$$

$$\Gamma_S = \frac{\alpha_S}{f^2} \cong 4.05 \times 10^{-3} T, \quad (9)$$

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

Из выражений (2), (3) и (8), (9) для (X -среза) получим:

$$n_x = 0.5303\Gamma_L + 4.8305, \quad (10)$$

$$n_x = 0.1728\Gamma_S + 4.8305, \quad (11)$$

а для Z -среза:

$$n_z = 0.3788\Gamma_L + 6.438, \quad (12)$$

$$n_z = 0.1235\Gamma_S + 6.438. \quad (13)$$

Соотношения (10), (11) и (12), (13) выражают связь между показателями преломления в терагерцовом диапазоне в кристалле НЛ по осям X и Z с коэффициентами затухания соответственно поперечных и продольных гиперзвуковых волн вдоль указанных осей.

Из формул (5)–(7) получим следующие выражения:

$$\frac{\omega_o}{\Omega} = \frac{c/V \pm n_e}{1.0043(0.5 - C) - 0.09876}, \quad (14)$$

$$\frac{\omega_e}{\Omega} = \frac{c/V \pm n_o}{1.0043(0.5 - C) - 0.09876}. \quad (15)$$

Полученные выражения устанавливают связь между стехиометрией кристалла НЛ и акустооптическими параметрами.

4. Заключение

В терагерцовом диапазоне для кристалла НЛ в направлениях $[100]$ и $[001]$ на основе анализа литературы и нашей работы [13] были получены простые выражения, устанавливающие связь между показателями преломления и коэффициентами затухания продольных и поперечных гиперзвуковых волн в указанных направлениях.

Получены также новые выражения, устанавливающие связь между

стехиометрическим составом кристалла НЛ и соотношениями частот видимого и гиперзвукового диапазона, что полезно с точки зрения прогнозирования состава кристалла для применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Li, J. Ling, Y. He; Javid, U.A. Javid, S. Xue, Q. Lin. Nat. Commun., **11**, 4123 (2020).
2. L. Cai, A. Mahmoud, M. Khan, M. Mahmoud, T. Mukherjee, J. Bain, G. Piazza. Photon. Res., **7**, 1003 (2019).
3. П.А. Никитин. Изв. РАН. Серия Физическая, **81**, 93 (2017).
4. J. Streque, T. Aubert, N. Kokanyan, F. Bartoli, A. Taguett, V. Polewczyk, E. Kokanyan, S. Hage-Ali, O. Elmazria. IEEE Sensors Letters, **3**, 2501204 (2019).
5. Y. Cang, Y. Jin, B. Djafari-Rouhani, G. Fytas. J. Phys. D: Appl. Phys., **55**, 193002 (2022).
6. N. Kokanyan, N. Mkhitarian, G. Demirkhanyan, A. Kumar, M. Aillerie, D. Sardar, E. Kokanyan. Crystals, **11**, 50 (2021).
7. В.А. Суторихин, Н.Д. Малютин, В.С. Поздняков. Письма ЖТФ, **48**, 14 (2022).
8. Y. Xue, Z. Ruan, L. Liu. Opt. Lett., **47**, 2097 (2022).
9. М.П. Палатников, Н.В. Сидоров, С.Ю. Стефанович, В.Т. Калинин. Неорганические Материалы, **34**, 903 (1998).
10. В.В. Галуцкий, С.С. Ивашко. Оптический журнал, **87**, 62 (2020).
11. A.N. Yulaev, Y.A. Zyuryukin. Applied Optics, **48**, 112 (2009).
12. U. Schlarb, K. Betzler. Phys. Rev., **48**, 15613 (1993).
13. A.V. Yeganyan, N.E. Kokanyan, M. Aillerie, E.P. Kokanyan. J. Contemp. Phys., **58**, 81 (2023).

RELATIONS BETWEEN SOME ACOUSTIC AND OPTICAL QUANTITIES AND THEIR DEPENDENCE ON THE STOICHIOMETRY OF THE LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

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

New relationships suitable for rapid estimation have been obtained, which express the relationships between some optical and acoustic quantities, as well as the stoichiometry of the lithium niobate single crystal. It is shown that from the determination of the damping coefficients of transverse and longitudinal hypersonic waves, it is possible to estimate with great accuracy the refractive indices in the terahertz range or vice versa, as well as the stoichiometric composition of the lithium niobate crystal to determinate.

ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԵՎ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՈՐՈՇ ՄԵԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ
ԿԱՊԵՐՐ ԵՎ ԴՐԱՆՅ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԼԻԹԻՈՒՄԻ
ՆԻՈԲԱՏԻ ԲՅՈՒՐԵՂԻ ՍՏԵԽԻՈՄԵՏՐԻԱՅԻՑ

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

Ստացվել են նոր, արագ գնահատման համար հարմար առնչություններ, որոնք արտահայտում են որոշ օպտիկական և ակուստիկ մեծությունների, ինչպես նաև լիթումի նիոբատի միաբյուրեղի ստեխիոմետրիայի միջև կապերը: Ցույց է տրված, որ լայնական և երկայնական հիպերձայնային ալիքների մարման գործակիցների որոշումից կարելի է մեծ ճշտությամբ գնահատել տերահերցային տիրույթի բեկման ցուցիչները, ինչպես նաև լիթումի նիոբատի բյուրեղի ստեխիոմետրիկ կազմությունը: