Известия НАН Армении, Физика, т.58, №1, с.113–117 (2023) УДК 534.2 DOI:10.54503/0002-3035-2023-58.1-113

ПОГЛОЩЕНИЕ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

А.В. ЕГАНЯН^{1,2*}, Н.Э. КОКАНЯН^{3,4}, М. АЙЛЛЕРИ⁴, 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, CentraleSupélec, Metz, France ⁴Université de Lorraine, Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes, CentraleSupélec, Metz, France

*e-mail: aveganyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 10 сентября 2022 г.)

Получены новые простые выражения для быстрой оценки коэффициентов поглощения продольных и поперечных гиперзвуковых волн в монокристаллах ниобата лития в режиме Ахиезера. Показано, что при комнатных температурах коэффициенты затухания гиперзвуковых волн, рассчитанные по полученным выражениям, и определенные экспериментально их значения, хорошо согласуются.

1. Введение

Исследования поглощения звука различных частот (ультразвуковой диапазон $-2 \times 10^4 - 10^9$ Гц, гиперзвуковой диапазон $-10^9 - 10^{13}$ Гц) в акустооптических кристаллах, таких как ниобат лития (LiNbO₃, пространственная группа – R3c), в настоящее время представляют как научный, так и прикладной интерес [1].

Поглощение звука (явление необратимого перехода энергии звуковой волны в другие виды энергий, в частности в тепло) характеризуется коэффициентом поглощения α (выражается в неперах на сантиметр, Неп/см, или децибелах на сантиметр: 1 дБ/см = 0.115 Неп/см), определяемым как обратная величина расстояния, на котором амплитуда звуковой волны уменьшается в е раз. В предположении постоянства α при всех *x* (длина участка среды) имеет место соотношение [2]:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}, \tag{1}$$

где I_0 и I – интенсивности звуковой волны соответственно на входе и выходе материала. Поглощение звука характеризуется также безразмерным коэффициентом потерь ε :

$$\varepsilon = \alpha \lambda / \pi$$
, (2)

где λ – длина волны звуковой волны, и добротностью Q [2]:

$$Q = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\pi}{\alpha \lambda} \,. \tag{3}$$

В твердых телах механизм фонон-фононного затухания в случае сравнительно низких частот (при $\omega \tau < 1$, где τ – время термической релаксации фононов, $\omega = 2\pi f$, где f – частота звука) был предложен Ахиезером [2], который показал, что

$$\alpha \sim \frac{f^2 \gamma^2 T}{V^3} \,. \tag{4}$$

Здесь V – скорость акустической волны в среде, γ – параметр Грюнайзена и T – абсолютная температура. В режиме затухания Ландау–Румера ($\omega \tau > 1$) [2]:

$$\alpha \sim \frac{f\gamma^2 T^4}{V^6}.$$
(5)

Дальнейшее развитие теории акустического затухания [3–5] приводило к уточнению расчетных формул, а также к более точному учету параметра Грюнайзена.

2. Оценка коэффициентов затухание продольных и поперечных гиперзвуковых волн в кристаллах ниобата лития (LiNbO₃)

В работе [4] приведена следующая формула для определения коэффициента поглощения звука (α измеряется в дБ/см) в кристаллах в режиме Ахиезера (случай, который нас больше интересует в настоящей работе, когда коэффициент поглощения звука в основном определяется скоростью распространения продольных акустических волн):

$$\alpha = \frac{8.68\pi C_{\rm v} \gamma^2 T \tau}{\rho V^3 \left[1 + \left(2\pi f \tau \right)^2 \right]} f^2, \tag{6}$$

где C_v – теплоемкость единицы объема, ρ – плотность среды. В этой и существующих подобных формулах (например, см. работу [3]) в основном из-за приближенного определения величины

$$\tau \approx \frac{6\chi}{CV_D^2},\tag{7}$$

где χ [Вт/мК] – коэффициент теплопроводности, C [Дж/м³К] – удельная теплоемкость единицы объема и V_D – дебаевская скорость, расчетные значения существенно (иногда даже на порядок) отличаются от результатов измерений.

Для определения коэффициента затухания звука в кристаллах в работе [6] приведено следующее выражение:

$$\alpha = \frac{\gamma^2 \omega^2 \chi T}{\rho V^5},\tag{8}$$

которое хотя и удобно для быстрой оценки, но дает неточные результаты особенно вблизи области перехода от режима Ахиезера к режиму Ландау–Румера. По этой причине в работе [7] были введены некоторые поправки и показано, что коэффициенты затухания продольных α_L и поперечных α_S фононов можно записать в виде

$$\alpha_L = \frac{2\gamma^2 \chi T \omega^2}{\rho V_L^{\ 3} V_D^{\ 2}},\tag{9}$$

$$\alpha_s = \frac{\gamma^2 \chi T \omega^2}{\rho V_s^3 V_D^2},\tag{10}$$

где $V_{\rm L}$ и $V_{\rm S}$ – скорости распространения соответственно продольной и поперечной акустических волн в данной кристаллической среде. Приведем формулы (9) и (10) к более удобному для расчетов виду. Учитывая указанное выше выражение $\omega = 2\pi f$ и размерность величин, а также используя связь между дебаевской температурой $T_{\rm D}$ и скоростью $V_{\rm D}$ [7]

$$T_D = 251.2 < M >^{-1/3} \rho^{1/3} V_D, \qquad (11)$$

где <M> – средний молекулярный вес (<M>=M/m, здесь m – количество ионов в соединении или в молекуле, например, для LiNbO₃ m = 5), получим, что

$$\alpha_L = \frac{5 \times 10^4 \gamma^2 Z \chi T f^2}{\rho^{1/3} < M >^{2/3} V_L^3 T_D^2},$$
(12)

$$\alpha_{s} = \frac{2.5 \times 10^{4} \gamma^{2} Z \chi T f^{2}}{\rho^{1/3} < M >^{2/3} V_{s}^{3} T_{D}^{-2}},$$
(13)

где Z – число формульных единиц, содержащихся в элементарной ячейке решетки (например, в случае LiNbO₃ Z = 2). Величины в приведенных формулах (12) и (13) имеют следующие размерности (ниже представлены значения соответствующих величин для кристалла ниобата лития): $[\chi] = 5.234$ Вт/мК [8], [f] = 1 ГГц, $[\rho] = 4.64$ г/см³ [8], [<M>] = 29.57 г/моль, $[V_L (L[100])] = 6.57$ км/с [6], $[V_S (S[001])] = 3.59$ км/с [6], $[T_D] = 503$ К [9].

3. Результаты и обсуждение

Основное преимущество полученных выражений (12) и (13) по сравнению с выражением (6) заключается в обходе трудно определяемой величины т, а по сравнению с выражениями (9) и (10) удобнее, так как температуру Дебая можно быстро оценить по формуле [10]

$$T_D = \frac{h\upsilon_{\rm m}}{k_{\rm B}} \left[\frac{3m}{4\pi} \left(\frac{N_{\rm A}\rho}{M} \right) \right]^{1/3}, \qquad (14)$$

где $k_{\rm B}$ – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка, $N_{\rm A}$ – число Авогадро и ρ – плотность вещества.

Среднюю скорость звука v_m можно определить по формуле: $3/v_m^3 = 1/v_L^3 + 1/v_S^3$, а постоянная Грюнайзена связана с коэффициентом Пуассона

[11] выражением

$$\gamma = \frac{3}{2} \frac{1+\mu}{2-3\mu} \,. \tag{15}$$

Для ниобата лития $\mu = 0.28$ [12], следовательно $\gamma = 1.7$. Подставляя все указанные величины в формулы (12) и (13), получим следующие простые выражения для коэффициентов затухания, а также нормированных коэффициентов затухания ($\Gamma = \alpha/f^2$, измеряется в дБ/см $\Gamma \Gamma \mu^2$) продольной и поперечной гиперзвуковых волн:

$$\alpha_L \cong 1.32 \times 10^{-3} T f^2, \tag{16}$$

где, как было указано выше, частота f измеряется в ГГц, а абсолютная температура T в К. Следовательно, получим, что

$$\Gamma_L \cong 1.32 \times 10^{-3} T . \tag{17}$$

Для поперечных волн

$$\alpha_s \cong 4.05 \times 10^{-3} T f^2, \tag{18}$$

$$\Gamma_s \cong 4.05 \times 10^{-3} T$$
 (19)

При комнатных температурах (T = 300 K), когда f = 1; 2; 4.5 ГГц из формулы (16) соответственно получим α_L (дБ/см) = 0.396; 1.584; 8.019. Для поперечных волн при комнатной температуре и частоте 1.5 ГГц из формулы (18) получается α_S (дБ/см) = 2.73. Сравнивая с результатами измерений в тех же условиях α'_L (дБ/см) = 0.4; 1.5; 8 ([4] и α'_S (дБ/см) = 2.6 [13]), видим, что имеется достаточно хорошее соответствие между значениями, оцениваемыми по полученным выражениям и измеренными в экспериментах.

4. Заключение

С учетом размерности величин и наблюдаемых между ними экспериментальных зависимостей, путем преобразования формул для определения коэффициентов затухания продольных и поперечных акустических волн в режиме Ахиезера получены удобные выражения для быстрой и более точной оценки этих коэффициентов в кристаллах. Получены также простые выражения, описывающие поглощения продольных и поперечных гиперзвуковых волн в монокристаллах ниобата лития в режиме Ахиезера. Показано, что при комнатных температурах значения коэффициентов поглощения продольных и поперечных гиперзвуковых волн, оцененные по полученными выражениями, достаточно хорошо согласуются с измеренными экспериментально значениями.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Y. Cang, Y. Jin, B. Djafari-Rouhani, G. Fytas. J. Phys. D: Appl. Phys., 55, 193002 (2022).
- 2. Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. Москва, Мир, 1972.

- 3. Ю.В. Илисавский, В.М. Стернин. ФТТ, 27, 385 (1985).
- 4. Б.П. Сорокин, А.В. Теличко, Г.М. Квашнин, В.С. Бормашов, В.Д. Бланк. Акуст. журн., 61, 705 (2015).
- 5. А.Л. Пирозерский, Е.В. Чарная. Акуст. журн., 52, 87 (2006).
- 6. Г.М. Григорович, Ю.В. Илисавский, М.А. Рувинский, В.П. Щетинин. ФТТ, 25, 3671 (1983).
- 7. **И.А.** Андреев. Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, **6**, 15 (2006).
- 8. Y. Shuhua, L. Hong, H. Xiaobo. J. Alloys and Compounds, 455, 501 (2008).
- 9. N. Kokanyan, N. Mkhitaryan, G. Demirkhanyan, A. Kumar, M. Aillerie, D. Sardar, E. Kokanyan. Crystals, 11, 50 (2021).
- 10. A.V. Yeganyan, T.I. Butaeva, E.P. Kokanyan. J. Contemp. Phys., 52, 387 (2017).
- 11. A.V. Yeganyan, A.S. Kuzanyan, V.N. Stathopoulos. J. Contemp. Phys., 50, 79 (2015).
- 12. V. Saleev, A. Shipilova. Mod. Phys. Lett. B, 32, 1850063 (2018).

ՀԻՊԵՐՁԱՅՆԱՅԻՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ԿԼԱՆՈՒՄԸ ԼԻԹԻՈՒՄԻ ՆԻՈԲԱՏԻ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ

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

Ստացվել են լիթիումի նիոբատի միաբյուրեղներում՝ Ախիեզերի ռեժիմում երկայնական և լայնական հիպերձայնային ալիքների կլանման գործակիցների արագ գնահատման համար նոր, պարզ արտահայտություններ։ Ցույց է տրված, որ սենյակային ջերմաստիճաններում հիպերձայնային ալիքների մարման գործակիցների ստացված արտահայտություններով հաշված և գիտափորձերում չափված արժեքները լավ համապատասխանության մեջ են։

ABSORPTION OF HYPERSONIC WAVES IN SINGLE CRYSTALS OF LITHIUM NIOBATE

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

New and simple expressions are obtained for a quick assessment of the absorption coefficients of longitudinal and transverse and hypersonic waves in lithium niobate single crystals in the Akhiezer regime. It is shown that at room temperature the attenuation coefficients of hypersonic waves calculated from the obtained expressions and the values determined experimentally are in good agreement.