Анизотропия затухания акустических волн и тензор Грюнайзена в кристаллах фторида лития

Ф.Р. Ахмеджанов*, Ж.О. Курбанов, Н.М. Махаров

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова АН РУз, Дурмон йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

Received 07.10.2022, revised 09.12.2022

* Corresponding author: e-mail akhmedzhanov.f@gmail.com, Phone: +998-90-2121998

Исследована анизотропия затухания акустических волн по механизму Ахиезера в кубических кристаллах фторида лития. Определены компоненты тензора Грюнайзена, с помощью которых рассчитана зависимость эффективной константы Грюнайзена от направления распространения и поляризации акустических волн в плоскости (001). Показано, что эта зависимость хорошо объясняет сильную анизотропию затухания акустических волн в кристаллах LiF.

Ключевые слова: акустическая волна, анизотропия затухания, тензор Грюнайзена, кристаллы фторида лития, поляризация волны, эффективная константа ангармонизма.

The anisotropy of the attenuation of acoustic waves by the Akhiezer mechanism in cubic crystals of lithium fluoride is studied. The components of the Grüneisen tensor are determined, with the help of which the dependence of the effective Grüneisen constant on the direction of propagation and polarization of acoustic waves in the (001) plane is calculated. It is shown that this dependence explains well the strong anisotropy of the damping of acoustic waves in LiF crystals.

Keywords: acoustic wave, attenuation anisotropy, Grüneisen tensor, lithium fluoride crystals, wave polarization, anharmonicity effective constant.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v24i4.385

I. Введение

Основным параметром, характеризующим нелинейность сил межатомного взаимодействия в твердых телах, является константа ангармонизма Грюнайзена, которая определяется изменением частоты нормальных мод колебаний решетки в зависимости от изменения ее объема. Эту константу принято определять из уравнения Грюнайзена и экспериментальных значений коэффициента теплового расширения, модуля объемного сжатия и молярной теплоемкости кристалла. Полученное таким способом значение константы ангармонизма является усредненной эффективной величиной, которая характеризует ангармонические свойства изотропных тел [1-3].

В анизотропных средах для характеристики ангармонических свойств, строго говоря, необходимо использовать тензор Грюнайзена, коэффициенты которого зависят как от направления действия сил упругости, так и направления смещения частиц при деформации [4, 5]. Вопросы, связанные с тензором Грюнайзена, включая эффективный параметр Грюнайзена, впервые рассмотрены в работах [2, 3, 5], в которых показана связь упругих и тепловых свойств твердых тел.

В настоящей работе с помощью акустических исследований впервые определены компоненты тензора Грюнайзена в кубических кристаллах фторида лития (точечная группа симметрии m3m), для которых характерна сильная анизотропия затухания акустических волн [6].

II. Образцы и методы исследования

Исследованные образцы фторида лития имели форму параллелепипедов с размерами 5×5×20 мм. Образцы ориентированы длинной стороной вдоль одного из кристаллографических направлений [100], 110] или [111] с точностью до 1 градуса. Продольные и поперечные акустические волны в них возбуждались пьезоэлектрическими преобразователями соответственно X- и Y-срезов в виде пластинок толщиной от 30 до 70 мкм.

Измерения скорости и затухания акустических волн проводили при комнатной температуре методом брэгговской дифракции света (длина волны λ_0=632.8 нм) на звуке [7]. Исследования проводили в диапазоне частот акустических волн 0.4–1.8 ГГц в импульсном режиме. Для приема и усиления дифрагированного света использовали фотоэлектронный умножитель. Скорость акустических волн $V_{\mathbf{c}}$ точностью 0.2% определяли по углу брэгговской дифракции света, которую измеряли с помощью гониометра [8]:

$$V = \lambda_0 \cdot \nu / (2 \cdot \mathrm{Sin}\theta_Б), \qquad (1)$$

где ν – линейная частота акустической волны, $\theta_Б$ – внешний брэгговский угол дифракции.

Коэффициент затухания акустических волн определяли акустооптическим методом, подробно описанным в работе [7]. При этом в одной и той же точке образца вдоль направления распространения акустической волны измеряли интенсивность света, дифрагированного на прямой акустической волне (I_1), и интенсивность света, дифрагированного на отраженной от свободного торца образца волне (I_2). Измеряли также соответствующий промежуток времени между этими сигналами Δt. Коэффициент затухания акустической волны рассчитывали из соотношения [8]:

$$\alpha = \frac{10 \lg\left(I_1 / I_2\right)}{\Delta t}, \qquad (2)$$

Точность определения коэффициента затухания составляла примерно 10%.

III. Результаты и обсуждение

Результаты измерения скорости и коэффициента затухания акустических волн в кристаллах фторида лития приведены в табл. 1.

Полученные значения коэффициента затухания акустических волн хорошо согласуются с данными работы [6], за исключением затухания продольных волн вдоль направления [111], что может быть обусловлено неправильной ориентацией образцов вдоль этого направления в работе этих авторов.

Таблица 1. Скорость и затухание акустических волн, и эффективные действительные и мнимые упругие константы в кристаллах LiF.

q	γ	V, 10^3 м·с$^{-1}$	$c'_{эфф}$, 10^{10} Н·м$^{-2}$	α, дБ·мкс$^{-1}$	$c''_{эфф}$ 10^7 Н·м$^{-2}$
[100]	[100]	6.51	11.2	6.16	2.53
	[001]	4.89	6.32	1.21	0.28
[110]	[110]	7.33	14.2	2.59	1.35
	[110]	3.55	3.32	12.0	1.46
	[001]	4.89	6.32	1.21	0.28
[111]	[111]	7.59	15.2	1.72	0.96
	[110]	4.05	4.32	6.75	1.07

Через **q** и **γ**, $c'_{эфф}$ и $c''_{эфф}$ в табл. 1 обозначены соответственно направления волнового вектора и поляризации акустических волн, действительные и мнимые эффективные константы.

Три независимых компонента действительной и мнимой частей тензора упругости для кристаллов LiF, которые необходимы для нахождения эффективных упругих констант, определялись нами из значений соответственно скорости и коэффициента затухания продольных и поперечных волн вдоль направления [100] и справочных данных из работы [9]. Для нахождения упругих констант c'_{12} и c''_{12} использовали такие же данные вдоль направления [110] и соотношения:

$$c'_{эфф} = \frac{c'_{11} - c'_{12}}{2} \qquad (3)$$

$$c''_{эфф} = \frac{c''_{11} - c''_{12}}{2} \qquad (4)$$

Определенные таким способом компоненты действительной и мнимой частей тензора упругих постоянных кристаллов LiF_2 в матричной записи представлены в табл. 2.

Таблица 2. Действительные (в единицах 10^{10}, Н/м^2) и мнимые (в единицах 10^7, Н/м^2) упругие постоянные кристаллов LiF.

c'_{11}	c'_{12}	c'_{44}	c''_{11}	c''_{12}	c''_{44}
11.2	4.56	6.32	2.53	–0.39	0.28

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

Точность определения этих констант совпадает с точностью определения, соответственно скорости и коэффициента затухания акустических волн.

Действительные c'_{ijkl} и мнимые c''_{ijkl} компоненты упругого тензора позволяют определить действительные и мнимые эффективные упругие константы через соотношения [10].

$$c'_{эфф} = c'_{ijkl}\kappa_j\kappa_l\eta_i\eta_k, \quad (5)$$

$$c''_{эфф} = c''_{ijkl}\kappa_j\kappa_l\eta_i\eta_k, \quad (6)$$

где κ_j и η_i – компоненты единичной волновой нормали $\boldsymbol{\kappa}$ и вектора поляризации $\boldsymbol{\eta}$.

В общем случае, направления этих векторов не совпадают. В частности, для квазипродольных волн в плоскости (110) при изменении направления волнового вектора относительно оси [110] на некоторый угол (φ) уравнения Грина-Кристоффеля позволяют определить угол отклонения вектора поляризации (ψ) от этой же оси [8, 10]:

$$\psi = \operatorname{arctg}\frac{\sqrt{2}}{2}\left(\frac{\Gamma'_{12}\Gamma'_{13} - \Gamma'_{23}\left(\Gamma'_{11} - \rho V^2\right)}{\Gamma'_{23}\Gamma'_{13} - \Gamma'_{12}\left(\Gamma'_{33} - \rho V^2\right)}\right). \quad (7)$$

Здесь Γ'_{ik} – действительные компоненты тензора Грина-Кристоффеля [9]:

$$\Gamma'_{ik} = c'_{ijkl}\kappa_j\kappa_l. \quad (8)$$

Результаты расчета показали, что в данной плоскости максимальное отклонение вектора поляризации от волнового вектора составляет 11.2 угловых градуса. Рассчитанные значения эффективных упругих констант $c'_{эфф}$ и $c''_{эфф}$ для кристаллографических направлений [100], [110] и [111] также представлены в табл. 1.

Знание действительных и мнимых эффективных констант позволяет определять коэффициент затухания акустических волн по механизму Ахиезера вдоль любого направления распространения акустических волн в кристаллах LiF, при условии $\omega\tau<<1$ (ω – частота акустических волн, τ – время релаксации тепловых фононов), с помощью выражения [10, 11]:

$$\alpha = \frac{1}{2}\omega\frac{c''_{эфф}}{c'_{эфф}}. \quad (9)$$

В то же время, согласно ряду работ, в которых рассматривалась теория затухания акустических волн по механизму Ахиезера [12-15], выражение для затухания может быть записано в следующем виде:

$$\alpha = \gamma^2\beta\frac{8.68\lambda T\omega^2}{2\rho V^2 V_D^2}. \quad (10)$$

Здесь β – численный множитель порядка единицы, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, γ – эффективная константа Грюнайзена (ангармонизма), зависящая от направления волнового вектора и типа акустической волны, V_D – средняя дебаевская скорость тепловых фононов, которая определяется через скорости продольных и поперечных волн вдоль выбранного направления [16]:

$$V_D = \left[\frac{1}{3}\left(\frac{2}{V_S^3} + \frac{1}{V_L^3}\right)\right]^{-1/3}. \quad (11)$$

Из выражения (10) видно, что анизотропия акустического затухания в основном определяется анизотропией эффективной константы Грюнайзена, величина которой определяется направлением волнового вектора и типом акустической волны в кристалле.

Используя выражения (9) и (10), можно выразить эффективную константу Грюнайзена через соотношение:

$$\gamma_{эфф} = \left(\frac{c''_{эфф}V_D^2}{2\lambda T\omega}\right)^{1/2}. \quad (12)$$

Соотношение (12) впервые введено нами и позволяет определить не только эффективные константы Грюнайзена для продольных и поперечных акустических волн вдоль любого направления в кристаллах кубической симметрии, но и независимые компоненты самого тензора Грюнайзена γ_{ik}.

Такой подход возможен в кубических кристаллах для всех направлений, совпадающих с осями симметрии четвертого порядка. В частности, для оси [100] значение эффективной константы Грюнайзена будет совпадать для продольных акустических волн с компонентом тензора γ_{11}, а для поперечных волн – с компонентом γ_{12}. В результате установлено, что в кристаллах LiF компоненты акустического

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

тензора Грюнайзена γ_{11} и γ_{12} равны соответственно 2.97 и 0.94.

Полученные значения γ_{ik} позволяют определить эффективные константы ангармонизма через свертку:

$$\gamma_{эфф} = \gamma_{ik}\eta_i\kappa_k . \qquad (13)$$

Анизотропия эффективной константы Грюнайзена для продольных волн в плоскости (001) в кристаллах LiF_2, рассчитанная с помощью значений акустического затухания и выражений (12) и (13) приведена на рисунке.

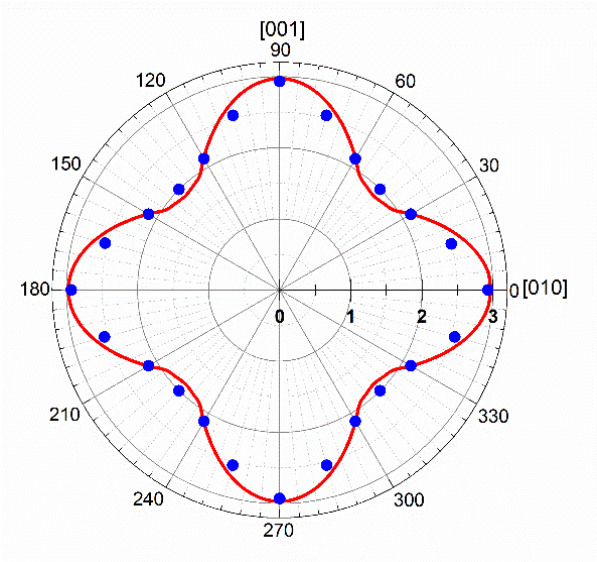


Рисунок. Анизотропия эффективной константы Грюнайзена для продольных волн в плоскости (001) в кристаллах LiF.

На рисунке сплошной линией показан результат расчета по формуле (12), точками – результат, полученный через компоненты тензора Грюнайзена с помощью выражения (13). Видно, что эффективные константы, определенные двумя способами, хорошо совпадают между собой. Наибольшая погрешность значений эффективных констант составляет 10% и сравнима с погрешностью определения коэффициента затухания акустооптическим методом.

Значения эффективных констант ангармонизма для акустических волн вдоль направлений [100], [110] и [111] в кристаллах фторида лития приведены также в табл. 1. Видно, что анизотропия акустического затухания в основном определяется анизотропией эффективной константы Грюнайзена.

IV. Заключение

Предложен новый подход к определению тензора Грюнайзена и установлению однозначных связей между эффективной константой Грюнайзена и анизотропией акустического затухания. Впервые определены компоненты тензора Грюнайзена для кубических кристаллов фторида лития, с помощью которых определены эффективные (частные?) значения констант ангармонизма, объясняющие сильную анизотропию затухания акустических волн в них.

Метаданные

Anisotropy of attenuation of acoustic waves and Grüneisen tensor in lithium fluoride crystals

F.R. Akhmedzhanov, J.O. Kurbanov, N.M. Makharov

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Dormon Yuli 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

The anisotropy of the attenuation of acoustic waves by the Akhiezer mechanism in cubic crystals of lithium fluoride is studied. The components of the Grüneisen tensor are determined, with the help of which the dependence of the effective Grüneisen constant on the direction of propagation and polarization of acoustic waves in the (001) plane is calculated. It is shown that this dependence explains well the strong anisotropy of the damping of acoustic waves in LiF crystals.

Keywords: acoustic wave, attenuation anisotropy, Grüneisen tensor, lithium fluoride crystals, wave polarization, anharmonicity effective constant

Литература(References)

[1] K.L. Leontev. Akusticheskii Jurnal **17**, No.4, 554 (1981).
[2] B.N. Belomestnyh. Pis'ma v Jurnal Tekhnicheskoy Fiziki **30**, No.3, 14 (2004).
[3] D.S. Sanditov. Fizika Tverdogo Tela **64**, No.2, 241 (2022).
[4] Key Samuel. Journal of Applied Physics **38**, No.7, 2923 (1967).
[5] Qiancheng Liu, Xianming Zhou, Xiaolong Zeng, and S.N. Luo. Journal of Applied Physics **117**, 045901-6 (2015).
[6] V.Ya. Avdonin, V.V. Lemanov, I.A. Smirnov, V.V. Tikhonov. Fizika Tverdogo Tela **14**, No.3, 877 (1972).
[7] E.D. Delesan, D. Ruaye. Uprugiye Volny v Tverdykh Telakh. Primeneniye dlya Obrabotki Signalov (Nauka, Moskva, 1982).
[8] F.R. Akhmedzhanov, J.O. Kurbanov, A.F. Boltabaev. J. Sensors & Transducers **246**, No.7, 43 (2020).
[9] Akusticheskiye Kristally. Spravochnik, pod red. M.P. Shaskolskaya (Nauka, Moskva, 1982).
[10] F.R. Akhmedzhanov, V.V Lemanov, A.N. Nasyrov. Pis'ma v Jurnal Tekhnicheskoy Fiziki **6**, No.10, 589 (1980).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

[11] I.L. Bajac, A. McNab, J. Richter, C.D. Wilkinson. J. Acoust. Soc. Am. **69**, No.3, 689 (1981).
[12] Yu.A. Logachev, B.Ya. Moijes. Fizika Tverdogo Tela **16**, No.8, 2219 (1974).
[13] N.K. Yushin, A.N. Nasyrov, V.S. Kim. Jurnal Tekhnicheskoy Fiziki **56**, No. 8, 1643 (1986).
[14] R. Nava, M.P. Vecchi, J. Romero, and B. Fernandez. Phys. Rev. B **14**, No.2, 800 (1975).
[15] F.R. Akhmedzhanov, S.Z. Mirzaev, U.A. Saidvaliev. Ferroelectrics **556**, No.1, 23 (2020).
[16] Yu.G. Sirotin, M.P. Shaskolskaya. Osnovy Kristallofiziki. (Nauka, Moskva, 1979).

Литий фторид кристалларида акустик тўлқинларнинг сўниши ва Грюнайзен тензори

Ф.Р. Ахмеджанов, Ж.О. Курбанов, Н.М. Махаров

ЎзРФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Дўрмон йўли кўчаси 33, Тошкент, Ўзбекистон

Литий фторид кубик кристалларида Ахиезер механизми бўйича акустик тўлқинларнинг сўниш коэффициенти анизотропияси ўрганилди. Грюнайзен тензорнинг компонентлари аниқланди ва уларнинг ёрдамида самарали Грюнайзен константасининг (001) текисликда акустик тўлқинларнинг тарқалиш ва қутбланиш йўналишига боғлиқлиги ҳисобланди. Ушбу боғлиқлик LiF кристалларида акустик тўлқинлари сўнишининг кучли анизотропиясини яхши тушунтиради.

Калит сўзлар: акустик тўлқин, сўниш анизотропияси, Грюнайзен тензори, литий фторид кристаллари, тўлқин қутбланиши, самарали ангармониклик доимийси.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.