Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i4.478

Затухание высокочастотных акустических волн в кристаллах хлорида натрия

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

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

Получена 11.10.2023, revised 25.12.2023

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

Исследовано затухание высокочастотных акустических волн в кубических кристаллах хлорида натрия. Впервые определены все три независимых компонента комплексного тензора упругости и эффективные константы Грюнайзена в этих кристаллах. Показано, что наиболее сильная анизотропия затухания в кристаллах хлорида натрия наблюдается для квазипоперечных акустических волн, распространяющихся в плоскости (001).

Ключевые слова: кристаллы хлорида натрия, акустическая волна, анизотропия, коэффициент затухания.

Attenuation of high frequency acoustic waves in cubic crystals of sodium chloride has been investigated. For the first time, all three independent components of the complex elasticity tensor and the effective Gruneisen constants in these crystals have been determined. It is shown that the strongest attenuation anisotropy in lithium fluoride crystals is observed for quasi-transverse acoustic waves propagating in the plane (001).

Keywords: crystals of sodium chloride, acoustic wave, anisotropy, attenuation coefficient.

I. Введение

Кубические кристаллы хлорида натрия (NaCl) являются химически стабильными, оптически прозрачными в широком диапазоне длин волн и имеют высокую температуру плавления [1]. В последние годы проявляется интерес к их нелинейным свойствам, включая акустические и акустооптические свойства. Наиболее акустооптически добротные кристаллы, как правило, имеют большой коэффициент акустического затухания [1-4], который ограничивает область их применения в диапазоне высоких частот. В силу этого изучение механизмов акустического затухания и анизотропии акустических свойств кристаллов приобретает особенное значение. В частности, знание ориентационной зависимости коэффициента затухания позволяет выбрать наиболее оптимальные рабочие срезы используемого материала.

II. Образцы и методы исследования

Исследованные образцы хлорида натрия представляли собой прямоугольные параллелепипеды, ориентированные длинной стороной вдоль направлений [100], [110] и [111] с точностью до одного градуса. Продольные и поперечные акустические волны возбуждались пьезопреобразователями из кварца соответственно по X- и Y-срезам с резонансными частотами 40 и 50 МГц.

Измерения проводили при комнатной температуре методом брэгговской дифракции света [4]. Акустооптическая установка состояла из системы возбуждения акустических волн в диапазоне частот 0.4–1.6 ГГц и системы регистрации света (длина волны 632.8 нм), дифрагированного на акустической волне. Прием и усиление дифрагированного света проводили с помощью фотоэлектронного умножителя, в котором импульсы дифрагированного света преобразовывались в электрические импульсы. Соблюдалось условие линейности преобразования сигналов,

когда амплитуда электрического импульса на выходе фотоумножителя пропорциональна мощности акустической волны [5].

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 соответствующие промежутки времени между этими сигналами.

Коэффициент затухания акустической волны в исследуемом образце рассчитывали по формуле [6]:

$$\alpha = \frac{10\lg\left(I_1/I_2\right)}{\Delta t}, \qquad (1)$$

где Δt – промежуток времени между указанными сигналами.

Скорость звуковых волн V с точностью 0.2% определяли по углу брэгговской дифракции [6]:

$$V = \lambda_0 \nu / 2\sin\theta_Б, \qquad (2)$$

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

III. Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты измерений скорости распространения и коэффициента затухания акустических волн вдоль кристаллографических направлений [100], [110] и [111] приведены в таблице.

Таблица. Скорость и затухание акустических волн, эффективные упругие константы и параметр Грюнайзена в кристаллах NaCl.

q	η	V, 10^3 м/с	$c'_{эфф}$, 10^{10} Н/м^2	α, дБ/мкс	$c''_{эфф}$ 10^7 Н/м^2	γ
[100]	[100]	4.74	4.85	18	3.20	2.50
	[001]	2.45	1.30	2.0	0.09	0.51
			1.27		-0.2	
[110]	[110]	4.52	4.41	10	1.62	1.78
	$[1\bar{1}0]$	2.92	1.84	25	1.69	2.28
	[001]	2.45	1.30	2.0	0.09	0.53
[111]	[111]	4.41	4.20	7,5	1.16	1.48
	$[1\bar{1}0]$	2.78	1.67	14	1.05	1.94

В таблице используются следующие обозначения: q – волновой вектор, η – вектор поляризация, c' – действительная эффективная упругая константа, c'' – мнимая эффективная упругая константа, α – коэффициент затухания акустической волны, γ – эффективная константа Грюнайзена.

Феноменологически скорость и затухание акустических волн можно описывать действительной или мнимой частью тензора упругих констант c_{ijkl}. Для кристаллов кубической симметрии, к которым относится NaCl, необходимо знание трех независимых компонентов действительной и мнимой частей тензора упругости. Эффективные значения этих величин для акустических волн вдоль направлений [100], [110] и [111] определяли из измерений скорости и коэффициента затухания продольных и поперечных волн вдоль этих направлений. Полученные значения таких констант также приведены в таблице. Следует заметить, что некоторые из эффективных значений упругих констант равны одному из компонентов соответствующей части тензора упругости, что облегчает их определение.

Уравнения, позволяющие определить действительные и мнимые компоненты тензора упругости, и построить поверхности акустического затухания в кубических кристаллах, можно записать в виде [7, 8]:

$$\rho\ddot{u}_i = (c'_{ijkl} + ic''_{ijkl})\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j}, \qquad (3)$$

где u_i – компонент вектора смещения, ρ – плотность, а комплексный тензор упругости выражается как

$$c_{ijkl} = (c'_{ijkl} + ic''_{ijkl}). \qquad (4)$$

Для решения уравнения (3) обычно используется приближение плоской гармонической волны [4, 7]:

$$\vec{u}(\vec{r},t) = A\vec{\gamma}\exp\left[i\left(\vec{q}\vec{r} - \omega t\right)\right], \qquad (5)$$

где A – амплитуда волны, $\vec{\gamma}$ – единичный вектор поляризации, $\vec{q} = 2\pi\vec{\kappa}/\lambda$ – волновой вектор волны, $\vec{\kappa}$ – единичный вектор волновой нормали, ω – круговая частота акустических волн.

Подставляя (5) в (3) и проводя дифференцирование, получаем систему алгебраических уравнений Грина-Кристоффеля, которая для действительной части в компактной форме записывается в виде [4, 7]:

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

$$\left(\Gamma_{ik} - \rho V^2 \delta_{ik}\right)\gamma_k = 0, \qquad (6)$$

где V – скорость акустической волны, δ_{ik} – единичный тензор Кронекера, γ_k – компоненты вектора поляризации. Компоненты тензора Грина-Кристоффеля Γ_{ik} определяются из выражения [4]:

$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl}\kappa_j\kappa_l, \qquad (7)$$

где κ_i представляют собой направляющие косинусы волнового вектора акустических волн в рассматриваемой плоскости.

Для нахождения действительных компонентов тензора Грина-Кристоффеля Γ'_{ik} в выражение (7) надо подставить действительные компоненты упругих констант c'_{ijkl}, соответственно для нахождения мнимых компонентов тензора Грина-Кристоффеля Γ''_{ik} необходимо использовать мнимые компоненты упругих констант c''_{ijkl}.

Как известно, система уравнений (6) имеет нетривиальные решения в том случае, когда определитель системы равен нулю. Для нахождения действительной c'_{eff} или мнимой c''_{eff} эффективной упругой постоянной в этот определитель также надо подставить либо действительные Γ'_{ik} либо мнимые Γ''_{ik} компоненты тензора Грина-Кристоффеля.

Знание эффективных упругих постоянных позволяет решить и обратную задачу, то есть определить коэффициент затухания акустической волны вдоль заданного направления через выражение [8, 9]:

$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{c''_{eff}}{c'_{eff}}\omega. \qquad (8)$$

Отметим, что выражение (8) справедливо, если основным механизмом затухания акустических волн является фонон-фононный механизм Ахиезера [8]. Определенные с помощью выражений (6), (7) и (8) компоненты действительной и мнимой частей тензора упругих коэффициентов кристаллов хлорида натрия представлены в таблице.

На основании данных таблицы и уравнения (8) можно рассчитать и построить поперечное сечение поверхностей акустического затухания в кристаллах NaCl вдоль одной из кристаллографических плоскостей симметрии. Такое сечение плоскостью (100) приведено на рисунке. Видно, что сильная анизотропия акустического затухания наблюдается для квазипродольных волн и, особенно, для квазипоперечных волн, направление поляризации которых лежит в этой же плоскости сечения.

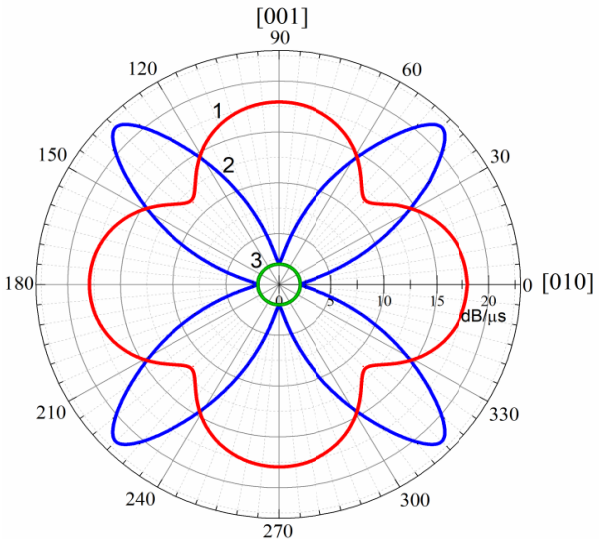


Рисунок. Сечение поверхностей затухания квазипродольных (1), квазипоперечных (2) и чистых поперечных (3) акустических волн плоскостью (001) в кристаллах NaCl.

Теория затухания акустических волн по механизму Ахиезера развивалась в ряде работ, согласно которым выражение для коэффициента затухания может быть записано в следующем виде [10, 11]:

$$\alpha = G^2 \frac{\beta \cdot 8.68^2 \lambda T \omega^2}{2\rho V^2 V_D^2}, \qquad (9)$$

где β – численный множитель порядка единицы, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, G – эффективная константа Грюнайзена.

В выражении (9) присутствует квадрат эффективной константы Грюнайзена, величина которой определяется направлением волнового вектора и типом акустической волны в кристалле. С помощью экспериментально полученных величин акустического затухания и выражения (9) определены значения этих эффективных констант для продольного и поперечного типа волн вдоль направлений [100], [110] и [111] в кристаллах хлорида натрия, которые приведены в таблице.

IV. Заключение

Впервые одновременно определены эффективные константы ангармонизма и все

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

независимые действительные и мнимые компоненты комплексного тензора упругости кристаллов хлорида натрия, которые использованы для построения характеристических поверхностей затухания продольных и поперечных акустических волн. Показано, что наиболее сильная анизотропия затухания в кристаллах хлорида натрия наблюдается для поперечных акустических волн, распространяющихся в плоскости (001), с поляризацией в этой же плоскости, для которых значение коэффициента затухания с изменением направления распространения изменяется на порядок. Для этих волн наиболее сильно изменяется и эффективная константа ангармонизма.

Метаданные

Attenuation of high frequency acoustic waves in crystals of sodium chloride

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

Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of Uzbekistan, Durmon yili str. 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

Attenuation of high frequency acoustic waves in cubic crystals of sodium chloride has been investigated. For the first time, all three independent components of the complex elasticity tensor and the effective Gruneisen constants in these crystals have been determined. It is shown that the strongest attenuation anisotropy in lithium fluoride crystals is observed for quasi-transverse acoustic waves propagating in the plane (001).

Keywords: crystals of sodium chloride, acoustic wave, anisotropy, attenuation coefficient.

Литература (References)

[1] Akusticheskiye kristally. Spravochnik. Pod red. M.P. Shaskolskoi (Moscow, Nauka, 1982).
[2] V.Ya. Avdonin, V.V. Lemanov, I.A. Smirnov, V.V. Tikhonov. FTT **14**, No.3, 877 (1972).
[3] Qiancheng Liu, Xianming Zhou, Xiaolong Zeng, and S.N. Luo. Journal of Applied Physics **117**, 045901-6 (2015).
[4] E.D. Delesan, D. Ruaye. Uprugiye volny v tverdykh telakh. Primeneniye dlya obrabotki signalov (Nauka, Moskva, 1982).
[5] S.Z. Mirzayev, F.R. Akhmedzhanov, V.N. Avdiyevich, J.O. Kurbanov. Uzbek Journal of Physics **21**, No.6, 375-379 (2019).
[6] F.R. Akhmedzhanov, J.O. Kurbanov, A.F. Boltabaev. J. Sensors & Transducers **246**, No.7, 43 (2020).
[7] Yu.G. Sirotin, M.P. Shaskolskaya. Osnovy kristallofiziki (Moscow, Nauka, 1979).
[8] F.R. Akhmedzhanov, V.V. Lemanov, A.N. Nasyrov. Pis'ma v JTF **6**, No.10, 589 (1980).
[9] Yu.A. Logachev, B.Ya. Moijes. FTT **16**, No.8, 2219 (1974).
[10] R. Nava, M.P. Vecchi, J. Romero, B. Fernandez. Phys. Rev. B **14**, No.2, 800 (1975).
[11] F.R. Akhmedzhanov, S.Z. Mirzaev, U.A. Saidvaliev. Ferroelectrics **556**, No.1, 23 (2020).

Натрий хлор кристалларида юкори частотали акустик тўлкинларнинг сўниши

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

Ўзбекистон Фанлар академияси, У.А. Арифов номидаги Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Дўрмон йўли кўч., 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон

Натрий хлор кубик кристалларида юкори частотали акустик тўлқинларнинг сўниши тадқиқ қилинди. Биринчи марта бу кристалларида комплекс эластик тензорининг учта мустақил компонентлари ва эффектив Грюнайзен константалари аниқланди. Натрий хлор кристалларидаги енг кучли сўниш анизотропияси (001) текисликда тарқалувчи квази-кўндаланг акустик тўлқинлар учун кузатилиши кўрсатилган.

Калит сўзлар: натрий хлор кристаллар, акустик тўлқин, анизотропия, сўниш коэффициенти.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.