Анизотропия акустооптических свойств кристаллов $PbMoO_4$

Ф.Р. Ахмеджанов*, М.И. Элбоева

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, ул. Дурмон йули 33, 100125 Ташкент, Узбекистан

Получена 28.04.2022, revised 10.06.2022

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

Методом Диксона в режиме брэгговской дифракции света на звуке определена анизотропия акустооптических свойств кристаллов молибдата свинца при изменении направления волнового вектора продольных акустических волн. Выявлены геометрии дифракции света для получения максимального значения коэффициента акустооптического качества. Впервые показана возможность управления эффективностью брэгговской дифракции света путем изменения направления волнового вектора акустической волны.

Ключевые слова: акустическая волна, поляризация, коэффициент акустооптического качества, брэгговская дифракция света, кристаллы молибдата свинца, скорость акустических волн.

The anisotropy of the acoustical-optical properties of lead molybdate crystals is determined by the Dixon method in the mode of Bragg diffraction of light by sound with a change in the direction of the wave vector of longitudinal acoustic waves. Light diffraction geometries reveal to obtain the maximum value of the acoustical-optical quality factor. The possibility of controlling the efficiency of Bragg light diffraction by changing the direction of the wave vector of an acoustic wave is shown for the first time.

Keywords: acoustic wave, polarization, acousto-optic quality factor, bragg light diffraction, lead molybdate crystals, acoustic wave velocity.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v24i2 331

I. Введение

Исследования акустооптических свойств и их анизотропии в кристаллах необходимы для определения наиболее эффективных срезов при применении этих кристаллов в качестве рабочих сред в акустооптических устройствах [1-3]. В общем случае, эти исследования чрезвычайно сложны. Согласно теории Поккельса, для нахождения направлений в кристалле, обеспечивающих максимальное значение эффективной фотоупругой постоянной требуется решение системы из 21 нелинейного уравнения 4-го, 3-го и 2-го порядков с тензорами высокого ранга [1, 2]. В связи с этим обычно исследуются акустооптические свойства кристаллов для конкретных геометрий акустооптического взаимодействия и для определенных срезов кристалла [3-5].

В настоящей работе исследованы акустические и акустооптические свойства кристаллов $PbMoO_4$, которые широко используются в акустооптике [6-8]. В отличие от имеющихся в литературе исследований нами изучена зависимость коэффициента акустооптического качества M_2 от направления распространения продольных акустических волн в кристаллографической плоскости (001). Как известно, этот коэффициент был введен Диксоном в качестве характеристики, определяющей интенсивность дифрагированного света в материале независимо от размеров пьезопреобразователя и мощности акустической волны [3]:

$$M_2 = \frac{n_1^3 n_2^3 p_{эфф}^2}{\rho V^3}, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 – коэффициенты преломления соответственно падающего и дифрагированного света, ρ – плотность кристалла, V – скорость акустической волны.

Эффективная фотоупругая постоянная $p_{эфф}$ в выражении (1) является сверткой значений компонентов тензора фотоупругости p_{ijkl} [1, 3]:

$$p_{эфф} = p_{ijkl}\alpha_i\beta_j\gamma_k\kappa_l, \quad (2)$$

где α_i, β_j, γ_k и κ_l – направляющие косинусы соответственно поляризации дифрагированного и падающего света, поляризации и волнового вектора акустической волны.

Таким образом, коэффициент M_2 зависит от геометрии дифракции света на звуке, в частности, от направления распространения акустической волны. Это позволяет определить зависимость как эффективной фотоупругой постоянной, так и коэффициента акустооптического качества кристалла от направления волнового вектора звука в кристалле. В конечном итоге можно получить возможность управления эффективностью брэгговской дифракции света и выявить наиболее оптимальные геометрии для получения наибольшей интенсивности дифрагированного света [5, 6].

II. Образцы и методы исследования

Исследованные образцы $PbMoO_4$ ориентированы вдоль кристаллографических осей [100] и [001]. Измерения проводили при комнатной температуре методом брэгговской дифракции света на акустических волнах с частотами 400–1200 МГц, которые возбуждались кварцевыми пьезопреобразователями X-среза [9]. Источником света служил гелий-неоновый лазер (λ_0=632.8·нм). Направление поляризации падающего на образец светового пучка относительно волнового вектора и поляризации акустической волны определяли с помощью поляризационного анализатора.

Эффективные фотоупругие константы, а затем и компоненты тензора фотоупругости определяли модифицированным методом Диксона-Коэна, в котором пьезопреобразователи приклеиваются как на эталонный образец, так и на исследуемый образец [10]. При возбуждении акустических волн со стороны эталона измеряли значения интенсивности света, дифрагированного в эталонном $I_{1э}$ и исследуемом образце I_{1x}. Затем акустические волны возбуж-дали со стороны образца и снова измеряли интенсивности света в образце I_{2x} и в эталоне $I_{2э}$.

Схема метода при возбуждении акустических волн со стороны эталонного образца приведена на рис. 1.

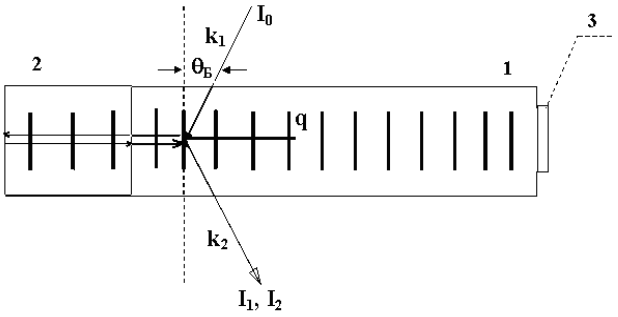


Рисунок 1. Схема определения фотоупругих констант методом Диксона. 1 –эталонный образец, 2 – исследуемый образец, 3 – пъезодатчик, q – волновой вектор акустической волны, k_1 и k_2 – волновые векторы падающего и дифрагированного света соответственно, I_0 – интенсивностъ падающего света, $\theta_Б$ – внешний угол брэгговской дифракции.

Значение эффективной фотоупругой константы для каждой исследованной геометрии брэгговской дифракции света определяли из соотношения [10]:

$$\left[\frac{p_{эфф}^2 n^6}{\rho V^3}\frac{n^2}{(n+1)^4}\right]_x = \left[\frac{p_{эфф}^2 n^6}{\rho V^3}\frac{n^2}{(n+1)^4}\right]_э \left(\frac{I_{1x}I_{2x}}{I_{1э}I_{2э}}\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Необходимые для расчета значения скорости акустических волн вдоль осей [100] и [001] определяли по углу брэгговской дифракции света на этих волнах с точностью примерно 0.2% [9].

III. Результаты и обсуждение

На основе измеренных значений интенсивностей дифрагированного света для различных направлений и поляризаций света и акустической волны и соотношения (3) были определены значения эффективных фотоупругих констант $p_{эфф}$ в кристаллах молибдата свинца. Затем с помощью соотношения (1) и экспериментальных значений скорости акустических волн и данных по плотности и показателям преломления из [11] были

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

рассчитаны коэффициенты акустооптического качества M_2.

Полученные результаты для основных кристаллографических направлений в кристаллах молибдата свинца представлены в таблице. Векторы **q** и **γ** в таблице указывают соответственно направления распространения и поляризации акустических волн в кристаллах молибдата свинца.

Таблица. Скорость акустических волн, эффективные фотоупругие константы и акустооптическая добротность в кристаллах $PbMoO_4$.

q	**γ**	V, 10^3, м/с	$p_{эфф}$	M_2, 10^{-15}, с^3/кг
[100]	[100]	3.78	p_{11}=0.240	24.1
	[001]	2.46	p_{44}=0.067	6.82
[001]	[001]	4.01	p_{33}=0.296	30.7
	[100]	2.12	p_{44}=0.067	10.6
[010]	[010]	3.78	p_{11}=0.240	28.3
	[001]	2.46	p_{44}=0.067	6.82
[110]	[110]	4.23	$p_{11}+p_{66}$=0.3	25.1
	[001]	1.64	p_{61}=0.013	7.29

Для определения анизотропии коэффициента акустооптического качества в кристаллах $PbMoO_4$, согласно формулам (1) и (2), необходимо в первую очередь найти компоненты вектора поляризации продольных акустических волн, который в общем случае отклоняется от вектора волновой нормали. Для решения такой задачи используем волновое уравнение без учета диссипации энергии в акустической волне [3]:

$$\rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl}\frac{\partial^2 u_{kl}}{\partial x_j \partial x_l}, \qquad (4)$$

где u_i – компоненты вектора смещения частиц, u_{kl} – компоненты тензора деформаций, x_j – координаты, c_{ijkl} – компоненты тензора упругих постоянных. Уравнение (4) обычно решается в приближении плоской гармонической волны, записываемой в виде:

$$u_i = u_{0i}\exp[i(\omega t - q_k x_k], \qquad (5)$$

где u_0 – амплитуда волны, q_k – компоненты волнового вектора, ω – круговая частота акустической волны.

В результате получаем систему алгебраических уравнений Грина-Кристоффеля [1, 3]:

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

где Γ_{ik} являются компонентами тензора Грина-Кристоффеля, δ_{ik} – компоненты тензора Кронекера, V – фазовая скорость акустической волны, γ_k – компоненты вектора поляризации.

Компоненты тензора Грина-Кристоффеля представляют собой свертку материального тензора упругих постоянных по направляющим косинусам единичной волновой нормали **κ** [3].

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

Для описания упругих свойств кристаллов точечной группы симметрии класса 4/m достаточно знать значения семи констант c_{ijkl}, которые после свертки их индексов можно записать в матричном виде: c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{16}, c_{33}, c_{44} и c_{66}. В плоскости (001), ортогональной оси симметрии четвертого порядка, при угле между направлением распространения акустической волны и осью [100], равным φ, направляющие косинусы равны κ_1=cosφ, κ_2=sinφ, κ_3=0, и компоненты тензора Грина-Кристоффеля записываются в виде:

$$\begin{aligned}
&\Gamma_{11} = c_{11}(\cos\varphi)^2 + c_{66}(\sin\varphi)^2 + 2c_{16}\cos\varphi\sin\varphi,\\
&\Gamma_{22} = c_{66}(\cos\varphi)^2 + c_{11}(\sin\varphi)^2 - 2c_{16}\cos\varphi\sin\varphi,\\
&\Gamma_{33} = c_{44},\\
&\Gamma_{12} = \Gamma_{21} = c_{16}(\cos^2\varphi - \sin^2\varphi) + (c_{12} + c_{66})\cos\varphi\sin\varphi,\\
&\Gamma_{13} = \Gamma_{31} = \Gamma_{23} = \Gamma_{32} = 0.
\end{aligned} \qquad (8)$$

Подстановкой в уравнения (6) значений компонентов тензора Грина-Кристоффеля Γ_{ik} из соотношений (8) была определена зависимость фазовой скорости продольных акустических волн от направления волнового вектора в плоскости (001) кристалла $PbMoO_4$.

При расчете использовали следующие значения плотности и упругих постоянных: ρ=6.95×10^3 кг/м^3, c_{11}=10.92×10^{10} Н/м^2, c_{12}=6.83×10^{10} Н/м^2, c_{13}=5.28×10^{10} Н/м^2, c_{16}=1.36×10^{10} Н/м^2, c_{33}=9.17×10^{10} Н/м^2, c_{44}=2.67×10^{10} Н/м^2, c_{66}=3.37×10^{10} Н/м^2. Дополнительные величины, необходимые для расчета, взяты из [11].

Результаты расчета приведены на рис. 2 в виде сечения поверхности обратной фазовой скорости (медленности) в кубе для продольных акустических волн. За единицу принято значение ($1/V^3$), равное 0.18×10^{-10} с^3/м^3. Как видно из рис. 2,

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

изменение медленности акустических волн достаточно большое и, следовательно, согласно выражению (1), вклад этой характеристики в анизотропию коэффициента акустооптического качества будет значительным.

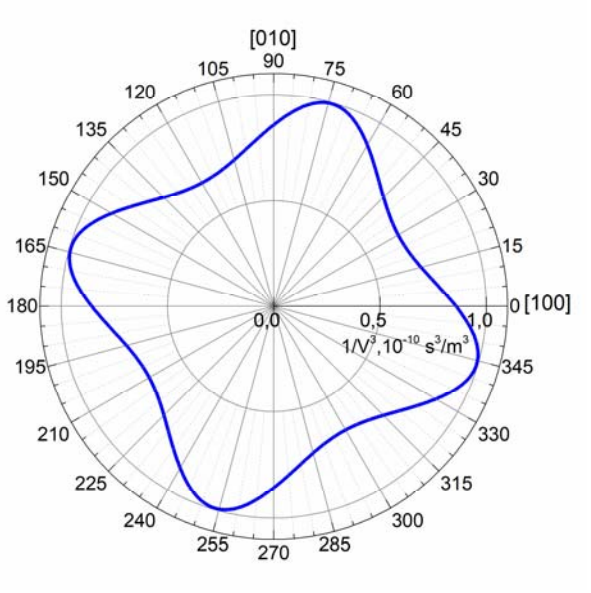


Рисунок 2. Зависимость куба обратной скорости от направления вектора квазипродольных акустических волн в плоскости (001).

Далее, используя полученные значения скорости продольных волн V и уравнения (6) и (8), были определены компоненты вектора поляризации и угол ориентации этого вектора относительно оси [100] в плоскости (001) из соотношения:

$$\psi = \operatorname{arctg}\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\rho V^2 - \Gamma_{11}}{\Gamma_{12}}\right). \qquad (9)$$

Эти результаты в виде отклонения вектора поляризации от направления волнового вектора представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что максимальное отклонение вектора поляризации от волнового вектора звука оказывается равным 9.9 градуса. В то же время для четырех направлений при φ = 29°, 74°, 119° и 164° направления этих векторов совпадают и, следовательно, вдоль них распространяется чистая продольная волна (из рис. 3 видно: там, где разница углов равна нулю).

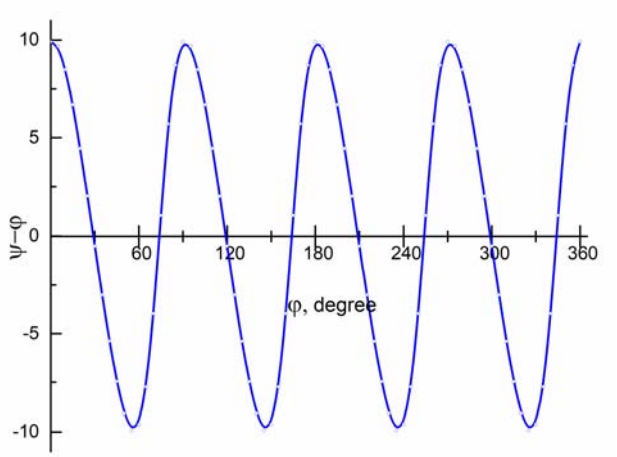


Рисунок 3. Отклонение направления поляризации продольных акустических волнах от направления волнового вектора в плоскости (001) в $PbMoO_4$.

Полученные значения эффективных фотоупругих констант были использованы для расчета с помощью выражения (1) зависимости коэффициента акустооптического качества от направления волнового вектора продольных акустических волн в плоскости (001). Результаты расчета приведены на рис. 4.

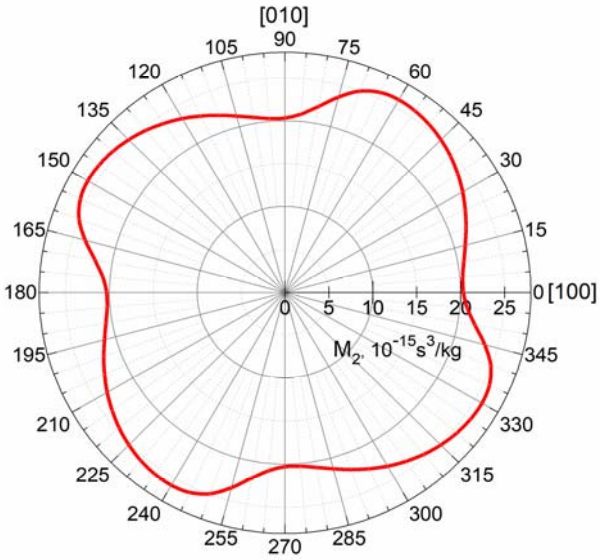


Рисунок 4. Зависимость коэффициента акустооптического качества M_2 в кристаллах $PbMoO_4$ от направления волнового вектора квазипродолъных акустических волнах в плоскости (001).

Из рис. 4 видно, что наибольшее значение коэффициента акустооптического качества наблюдается для продольных акустических волн,

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

распространяющихся в плоскости (001) под углами 60 и 150 градусов к оси [100]. В этих направлениях коэффициент M_2 достигает значения 25.9×10^{-15} $с^3$/кг, что является одним из максимальных значений этого коэффициента в кристаллах, применяемых в акустооптических устройствах [13-15].

Следует отметить достаточно хорошее совпадение расчетных значений коэффициента акустооптического качества M_2, приведенных в таблице, с его экспериментальными значениями, имеющимися в литературе [6, 7, 12] для направлений [100] и [001].

III. Заключение

Впервые исследована анизотропия акустооптического взаимодействия в кристаллах $PbMoO_4$ при изменении направления распространения продольных акустических волн в плоскости (001). Показано, что для этих волн в плоскости (001) имеются четыре направления, являющиеся продольными нормалями, вдоль которых распространяются чистые продольные волны.

Коэффициент акустооптического качества при дифракции света на этих чистых волнах равен 25.1×10^{-15} $с^3$/кг и близок к максимальному значению коэффициента M_2 для рассмотренных геометрий брэгговской дифракции. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых приборов акустооптики и акустоэлектроники на кристаллах молибдата свинца.

Метаданные

Acoustical-optical properties of $PbMoO_4$ crystals

F.R. Akhmedzhanov, M.I. Elboyeva

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

The anisotropy of the acousto-optical properties of lead molybdate crystals is determined by the Dixon method in the mode of Bragg diffraction of light by sound with a change in the direction of the wave vector of longitudinal acoustic waves. Light diffraction geometries reveal to obtain the maximum value of the acousto-optical quality factor. The possibility of controlling the efficiency of Bragg light diffraction by changing the direction of the wave vector of an acoustic wave is shown for the first time.

Keywords: acoustic wave, polarization, acoustic-optic quality factor, Bragg light diffraction, lead molybdate crystals, acoustic wave velocity.

Литература

[1] Yu.G. Sirotin, M.P. Shaskol'skaya, Osnovy kristallofiziki (Nauka, Moskow, 1979).
[2] S.T. Narasimkhamurti. Fotouprugie i elektroopticheskie svoystva kristallov (Moskow, Mir, 1984).
[3] E.D. D'elesan, D. Ruayye. Uprugie volny v tverdykh telakh. Primenenie dlya obrabotki signalov. (Moskow, Nauka, 1982).
[4] B. Mytsyk, N. Demyanyshyn, A. Andrushchak, O. Buryy. Crystals **11**, 1095, (2021). https://doi.org/10.3390/2021.
[5] Erba, R. Dovesi. Phys. Rev. B **88**, 045121 (2013).
[6] V.T. Gabrielyan, V.V. Kludzin, S.V. Kulakov, B.P. Razzhivin. Solid State Phys. **17**, 603-605 (1975).
[7] G.A. Coquin, D.A. Pinnow, A.W. Warner. Appl. Phys. **42**, 2162-2168 (1971).
[8] V.M. Petrov, A.V. Shamray."Microwave integrated optical modulators. Theory and practice" (St. Petersburg, ITMO University, 2021).
[9] F.R. Akhmedzhanov, J.O. Kurbanov, A.F. Boltabaev. Sensors &Transducers **246**, Issue 7, 43-47 (2020).
[10] R.W. Dixon, M.G. Cohen. Appl. Phys. Letter **8**, Issue 205, 205-207 (1966).
[11] Akusticheskie kristally. Spravochnik. Ed. M.P. Shaskol'skoy (Moskow, Nauka, 1982).
[12] S.Z. Mirzayev, F.R. Akhmedzhanov, V.N. Avdievich, J.O. Kurbanov. Uzbek Journal of Physics **21**, No.6, 375-379 (2019).
[13] F.R. Akhmedzhanov. In: Proceedings of Frequency Control Symposium joint with the 22nd European Frequency & Time Forum (Besancon, France, 2009), pp. 613-615.
[14] S.N. Antonov, A.V. Vayner, V.V. Proklov, Yu.G. Rezvov. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki **80**, No.9, 104-109 (2010).
[15] S.N. Antonov. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki **86**, No.10, 155-158 (2016).

$PbMoO_4$ кристалларида акустооптик хоссаларининг анизотропияси

Ф.Р. Ахмеджанов, М.И. Элбоева

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

Кўрғошин молибдат кристалларида фотоэластик хоссаларининг анизотропияси ёруғликнинг товуш билан Брэгг дифракцияси режимида Диксон усули асосида аниқланди. Акустооптик сифат кўрсаткичининг максимал қийматини олиш имконини берувчи ёруғлик дифракциясининг геометрик бурчаклари аниқланди. Акустик тўлқиннинг тўлқин векторининг йўналишини ўзгартириш орқали Брэгг ёруғлик дифракциясининг самарадорлигини бошқариш имконияти биринчи марта кўрсатилди.

Калит сўзлар: Акустик тўлқин, қутбланиш, акустооптик сифат кўрсаткичи, Брэгг дифракцияси, қўрғошин молибдат, акустик тўлқин тезлиги

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.