Uzbek Journal of Physics
25(1), 21-25, 2023. DOI: https//doi.org/ 10.52304/.v25i1.401

Анизотропия упругих и фотоупругих свойств кристаллов $CaMoO_4$

Ф.Р. Ахмеджанов*, М.И. Элбоева

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

Получена 21.11.2022, revised 09.12.2022

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

Изучена анизотропия упругих и фотоупругих свойств кристаллов молибдата кальция при брэгговской дифракции света на продольных акустических волнах, распространяющихся в плоскости (001). Показано, что эффективность акустооптического взаимодействия можно характеризовать введенным коэффициентом акустооптической эффективности, определяемым из упругих и фотоупругих постоянных кристалла. Выявлена сильная зависимость коэффициентов акустооптического качества и акустооптической эффективности от направления распространения акустических волн в исследованной плоскости.

Ключевые слова: анизотропия, акустическая волна, акустооптическое взаимодействие, кристаллы молибдата кальция, упругие и фотоупругие постоянные.

The anisotropy of the elastic and photoelastic properties of calcium molybdate crystals has been studied for Bragg diffraction of light by longitudinal acoustic waves propagating in the (001) plane. It is shown that the efficiency of the acousto-optic interaction can be characterized by the introduced acousto-optic efficiency coefficient, which is determined from the elastic and photoelastic constants of the crystal. A strong dependence of the coefficients of the acousto-optic quality and the acousto-optic efficiency on the direction of propagation of acoustic waves in the investigated plane is revealed.

Keywords: anisotropy, acoustic wave, acousto-optic interaction, calcium molybdate crystals, elastic and photoelastic constants.

I. Введение

С точки зрения использования тех или иных материалов в акустооптических устройствах, управления оптическими сигналами необходимо знание их упругих и фотоупругих свойств, включая анизотропию этих свойств. Это позволяет выявить наиболее оптимальные срезы кристалла, используемого в качестве рабочего тела и повысить эффективность разрабатываемого акустооптического элемента за счет выбора конкретной геометрии акустооптического взаимодействия [1, 2].

Как известно, кристаллы молибдата кальция и твердые растворы на их основе могут использоваться в качестве активной среды в лазерной технике, криогенных фононных сцинтилляционных детекторах, а также в акустооптичесих устройствах [3]. В настоящей работе изучены упругие и фотоупругие свойства кристаллов $CaMoO_4$ (точечная группа симметрии 4/m), которым посвящен ряд работ [4-6].

В отличие от ранее проведенных исследований нами изучена анизотропия упругих и фотоупругих свойств этих кристаллов при изменении направления распространения продольных акустических волн в плоскости симметрии (001). Такой подход был применен нами ранее для кристаллов молибдата свинца в работе [7], в которой была показана возможность увеличения эффективности брэгговской

дифракции света при определенных взаимных направлениях распространения продольных акустических волн и поляризации света.

II. Образцы и методы исследования

Исследовались образцы молибдата кальция, ориентированные вдоль кристаллографических направлений [100] и [001]. Измерения скорости и затухания акустических волн производились при комнатной температуре методом брэгговской дифракции света на звуке [2] в частотном диапазоне 400–1600 МГц.

Для возбуждения акустических волн использовали пьезопреобразователи из кварца X-среза. Источником света служил гелий-неоновый лазер (λ=632.8·нм). Скорость акустических волн V определяли по углу брэгговской дифракции света с точностью 0.2% из соотношения [2]:

$$V = \frac{\lambda\nu}{2\sin\theta}, \qquad (1)$$

где ν – линейная частота акустической волны, θ – внешний брэгговский угол.

Эффективные фотоупругие константы определяли модифицированным методом Диксона-Коэна [8], в котором акустическая волна возбуждается попеременно со стороны эталонного образца или со стороны исследуемого образца. Особенности этого метода и схема эксперимента детально описаны в [9]. Значение эффективной фотоупругой константы зависит от геометрии брэгговской дифракции света и определяется из выражения [8, 9]:

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

В выражении (2) $p_{эфф}$ – эффективная фотоупругая константа, ρ – плотность, n – показатель преломления кристалла, а значения интенсивности света, дифрагированного в эталонном $I_{1э}$ и исследуемом образце I_{1x} измеряются при возбуждении акустических волн со стороны эталона. Аналогично интенсивности света в образце I_{2x} и в эталоне $I_{2э}$ измеряются, когда акустические волны возбуждаются со стороны образца. Детально схема эксперимента рассмотрена в [7].

III. Результаты и обсуждение

Значения скорости акустических волн V и эффективных фотоупругих констант $p_{эфф}$, определенные из измерений интенсивностей дифрагированного света и соотношения (2), приведены в таблице, в которой векторы **q** и **γ** указывают соответственно направления волнового вектора и поляризации акустических волн. Принималось, что волновой вектор света всегда параллелен оси [001], а вектор поляризации света параллелен волновому вектору акустических волн **q**. Значения плотности и показателя преломления взяты из [10].

Эффективные фотоупругие константы определяются сверткой компонентов тензора фотоупругости [2, 11]:

$$p_{эфф} = p_{ijkl}\alpha_i\beta_j\gamma_k\kappa_l, \qquad (3)$$

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

Таблица 1. Скорость акустических волн, эффективные фотоупругие константы и акустооптическая добротность в кристаллах $CaMoO_4$

q	**γ**	V, 10^3м/с	$p_{эфф}$	M_2, 10^{-15} $с^3$/кг
[100]	[100]	5.87	$(p_{11}^2+p_{61}^2)^{1/2}$=0.20	2.92
	[001]	2.71	p_{44}=0.06	2.67
[001]	[001]	5.44	p_{33}=0.08	0.59
	[100]	2.99	$(p_{44}^2+p_{45}^2)^{1/2}$=0.086	4.08
[010]	[010]	5.87	$(p_{11}^2+p_{61}^2)^{1/2}$=0.20	2.92
	[001]	2.71	p_{44}=0.06	2.67
[110]	[110]	5.98	$(p_{11}+p_{12})^{1/2}+p_{66}$=0.036	0.09
	[001]	2.97	p_{61}=0.1	5.62

Как видно из таблицы, для некоторых геометрий брэгговской дифракции света эффективная фотоупругая константа совпадает с одним из компонентов тензора фотоупругости, таких как p_{11}, p_{33}, p_{44}, p_{61}. С помощью этих компонентов, а также соотношений и значений скорости акустических волн, приведенных в таблице, были определены следующие значения упругих и фотоупругих постоянных кристаллов молибдата кальция: c_{11}=14.4×10^{10} Н/м^2, c_{12}=6.5×10^{10} Н/м^2, c_{13}=4.5×10^{10} Н/м^2, c_{16}=1.4×10^{10}

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г

Н/м^2, c_{33}=12.6×10^{10} Н/м^2, c_{44}=3.69×10^{10} Н/м^2, c_{66}=4.61×10^{10} Н/м^2, p_{11}=0.17, p_{12}=–0.15, p_{33}=0.08, p_{44}=0.06, p_{45}=0.062, p_{61}=0.1, p_{66}=0.026. Дополнительные величины, необходимые для расчета, выбирали из [10, 12].

Полученные величины использовали для выявления анизотропии эффективной упругой константы и коэффициента акустооптического качества в кристаллах молибдата кальция при изменении направления распространения продольных акустических волн в плоскости (001). Коэффициент акустооптического качества M_2, введенный Диксоном [12], определяет эффективность брэгговской дифракции света в материале, независимо от размеров пьезопреобразователя и мощности акустической волны, и может быть записан в виде:

$$M_2 = \eta \frac{n_1^3 n_2^3}{V}. \qquad (4)$$

Здесь n_1 и n_2 – коэффициенты преломления падающего и дифрагированного света соответственно. В соотношение (3) мы ввели новый параметр – коэффициент акустооптической эффективности:

$$\eta = \frac{p_{эфф}^2}{c_{эфф}}, \qquad (5)$$

в котором $c_{эфф}$ – эффективная упругая постоянная, определяемая через свертку:

$$c_{эфф} = c_{ijkl}\gamma_i \kappa_j \gamma_k \kappa_l, \qquad (6)$$

где c_{ijkl} – компоненты тензора упругих констант.

Таким образом, коэффициенты M_2 и η зависят от геометрии дифракции света, в частности, от направления распространения акустической волны.

Для определения эффективных упругих и фотоупругих констант и их анизотропии при распространении продольных акустических волн в плоскости (001) были найдены компоненты вектора поляризации этих волн γ_k из системы уравнений Грина-Кристоффеля [5, 7].

$$[\Gamma_{ik} - \delta_{ik}\rho V^2]\gamma_k = 0, \qquad (7)$$

где δ_{ik} – компоненты тензора Кронекера, Γ_{ik} – компоненты тензора Грина-Кристоффеля, которые представляют собой свертку тензора упругих постоянных по направляющим косинусам волновой нормали $\boldsymbol{\kappa}$ [7].

$$\Gamma_{ik} = {}_{ijkl}\ \kappa_j \kappa_l. \qquad (8)$$

Подстановкой в уравнения (6) и (7) компонентов волновой нормали κ_j и вектора поляризации этих волн γ_k была определена как зависимость скорости, так и эффективной упругой постоянной от направления волнового вектора для продольных волн в плоскости (001) в кристаллах $CaMoO_4$. Соответствующая пространственная анизотропия эффективной упругой постоянной в рассмотренной плоскости представлена на рис. 1. Видно, что значение $c_{эфф}$ достигает максимального значения при распространении продольной акустической волны под углами 26 и 116 градусов к оси [100] и составляет величину 16.1×10^{10} Н/м^2.

В целом, анизотропия скорости и эффективной упругой постоянной для этих акустических волн относительно невелика и составляет не более 20%.

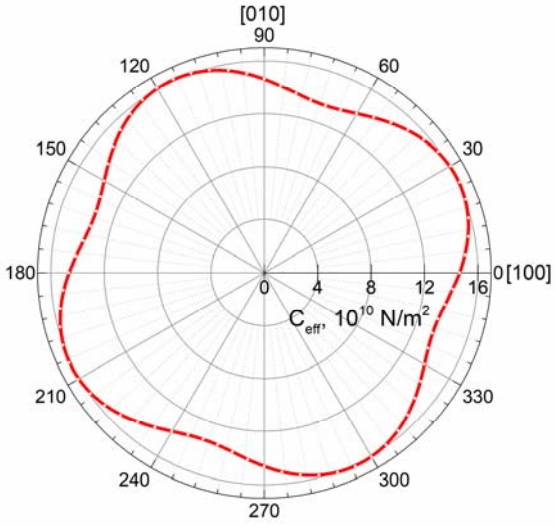


Рисунок 1. Зависимость эффективной упругой постоянной от направления волнового вектора продольной акустической волны в плоскости (001).

Используя полученные выше результаты и выражения (4) и (5) рассчитана анизотропия коэффициента акустооптического качества M_2 и коэффициента акустооптической эффективности η в этой же плоскости для случая дифракции света на продольных акустических волнах. Полученные зависимости в относительных единицах представлены на рис. 2.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г

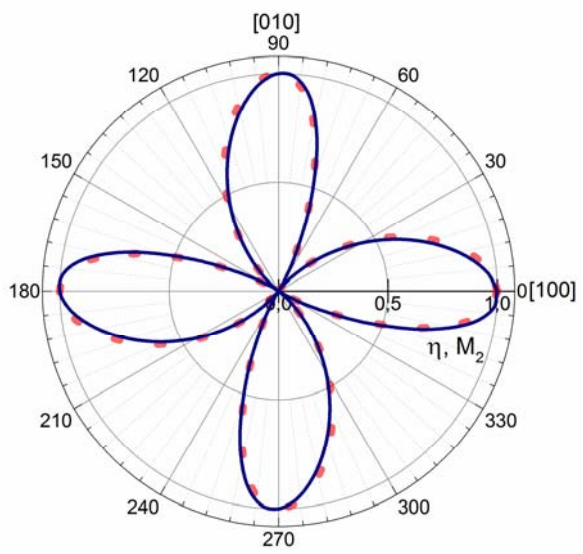


Рисунок 2. Зависимость коэффициента акусто-оптического качества M_2 (сплошная линия) и коэффициента акустооптической эффективности η (точки) от направления волнового вектора продольной акустической волны в плоскости (001) в кристаллах $CaMoO_4$.

Из рис. 2 видно, что, во-первых, представленные зависимости практически совпадают и, во-вторых, коэффициенты M_2 и η достигают наибольшего значения при направлении волнового вектора продольных акустических волн под углами 5 и 95 градусов к оси [100] в плоскости (001). При этом значение коэффициента M_2 равно 2.92×10^{-15} $с^3$/кг, что значительно меньше максимальных значений этого коэффициента в кристаллах молибдата свинца [13, 14].

IV. Заключение

Впервые исследована анизотропия упругих и фотоупругих свойств в кристаллах $CaMoO_4$ при изменении направления распространения продольных акустических волн на плоскости (001). Показано, что эффективность брэгговской дифракции света можно характеризовать величиной коэффициента акустооптической эффективности, для определения которого необходимо знание только упругих и фотоупругих постоянных кристалла, приводимых во многих справочниках по акустическим и лазерным кристаллам.

Выявленная сильная зависимость коэффициентов акустооптического качества M_2 и акустооптической эффективности η от направления распространения продольных акустических волн в плоскости (001) может быть использована для выбора наиболее выгодной геометрии дифракции света на этих волнах в кристаллах молибдата кальция.

Метаданные

Anisotropy of elastic and photoelastic properties of $CaMoO_4$ 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, Uzbekistan

The anisotropy of the elastic and photoelastic properties of calcium molybdate crystals has been studied for Bragg diffraction of light by longitudinal acoustic waves propagating in the (001) plane. It is shown that the efficiency of the acousto-optic interaction can be characterized by the introduced acousto-optic efficiency coefficient, which is determined from the elastic and photoelastic constants of the crystal. A strong dependence of the coefficients of the acousto-optic quality M_2 and the acousto-optic efficiency η on the direction of propagation of acoustic waves in the investigation plane is revealed.

Keywords: anisotropy, acoustic wave, acousto-optic interaction, calcium molybdate crystals, elastic and photoelastic constants.

Литература (References)

[1] S.T. Narasimxamurti. Fotouprugii i elektroopticheskiye svoystva kristallov (Moscow, Mir, 1984), s. 620.
[2] E.D. Delesan, D. Ruaye. Uprugiye volny v tverdykh telakh. Primeneniye dlya obrabotki signalov (Moscow, Nauka, 1982), s. 342.
[3] N.S. Kozlova, O.A. Buzanov, A.P. Kozlova, E.V. Zabelina, Z.A. Goreeva, I.S. Didenko, A.G. Chernykh. Crystallography Reports **63**, No.2, 216-221 (2018).
[4] V.B. Dudnikova, D.I. Antonov, Ye.V. Jarikov, N.N. Yeremin. Fizika Tverdogo Tela **64**, No.10, 1452-1458 (2022).
[5] W.J. Alton, A.J. Barlow. Journal of Applied Physics **38**, No.10, 3817-3820 (1967).
[6] J.M. Farley, G.A. Saunders, D.Y. Chung.. Journal of Physics C: Solid State Physics **8**, No.6, 780-786 (1975).
[7] F.R. Akhmedjanov, M.I. Elboyeva. Uzbek Journal of Physics **24**, No.2, 124-128 (2022).
[8] R.W. Dixon, M.G. Cohen. Appl. Phys. Letter **8**, No.205, 205-207 (1966).
[9] S.Z. Mirzayev, F.R. Akhmedzhanov, V.N. Avdiyevich, J.O. Kurbanov. Uzbek Journal of Physics **21**, No.6, 375-379 (2019).
[10] Akusticheskiye kristally. Spravochnik, Pod red. M.P. Shaskolskaya (Moscow, Nauka, 1982), s. 632.
[11] Yu.G. Sirotin, M.P. Shaskolskaya. Osnovy kristallofiziki (Moscow, Nauka, 1979), s. 465.
[12] R.W. Dixon. IEEE Trans. ED **17**, No.1, 229-235 (1980).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г

[13] F.R. Akhmedzhanov. Application of acoustical activity for measurement of acoustic wave frequency. Proceedings of Frequency Control Symposium, joint with the 22nd European Frequency & Time Forum (Besancon, France, pp. 613-615, 2009).
[14] S.N. Antonov. Jurnal Tekhnicheskoy Fiziki **86**, No.10, 155-158 (2016).

$CaMoO_4$ кристалларида эластик ва фото-эластик хоссаларининг анизотропияси

Ф.Р. Ахмеджанов, М.И. Элбоева

ЎзР ФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Дўрмон йўли кўчаси 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон

Кальций молибдат кристалларнинг эластик ва фотоэластик хоссаларининг анизотропияси (001) текисликда тарқаладиган бўйлама акустик тулқинлар орқали ёруғликнинг Брэгг дифракцияси учун ўрганилди. Акусто-оптик узаро таъсирнинг самадорлиги кристаллнинг эластик ва фотоэластик константаларидан аниқладиган акустооптик самадорлик коэффициенти билан тавсиланиши мумкинлиги кўрсатилган. Акустооптик сифат ва акустооптик самарадорлик коэффициентларнинг ўрганилаётган текисликда акустик тўлқинларнинг тарқалиш йўналишига кучли боғликлиги аниқланди.

Калит сўзлар: анизотропия, акустик тўлқин, акустооптик ўзаро таъсир, кальций молибдат кристаллари, эластик ва фотоэластик доимийлар. константалар.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г