



Мохинур ЭЛБОЕВА,

Базовый докторант Институт ионно-плазменных и лазерных технологий

E-mail: elboyevatoxinur1990@gmail.com,

Фарход АХМЕДЖАНОВ,

Доцент институт ионно-плазменных и лазерных технологий, заведующий лабораторией – д.ф.-м.н.

Рецензент: Институт химии и физики полимеров АН РУз., заведующий лабораторией – д.ф.-м.н.с.н.с., И.Н. Нургалиев

INFLUENCE OF THE PIEZOEFFECT ON PHOTOELASTIC PROPERTIES OF BISMUTH SILICATE CRYSTALS

Abstract

The influence of the piezoelectric effect on the anisotropy of the elastic and photoelastic properties of bismuth silicate crystals was studied by the Bragg light diffraction method. The possibility of controlling the efficiency of such diffraction by changing the direction of the wave vector of an acoustic wave in a certain plane of symmetry is shown. The propagation directions of acoustic waves with the maximum values of the acousto-optic quality factor are determined

Keywords: bismuth silicate crystals, Bragg light diffraction, photoelasticity, piezoelectric effect, acoustic wave velocity, acousto-optic Q factor.

ВЛИЯНИЕ ПЬЕЗОЭФФЕКТА НА ФОТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ СИЛИКАТА ВИСМУТА

Аннотация

Исследовано влияние пьезоэффекта на анизотропию упругих и фотоупругих свойств кристаллов силиката висмута методом Брэгговской дифракции света. Показана возможность управления эффективностью такой дифракции, путем изменения направления волнового вектора акустической волны в определенной плоскости симметрии. Определены направления распространения акустических волн вдоль которых наблюдаются максимальные значения акустооптической добротности.

Ключевые слова: кристаллы силиката висмута, Брэгговская дифракция света, фотоупругость, пьезоэлектрический эффект, скорость акустической волны, акустооптическая добротность.

PYEZOEFFEKTNING VISMUT SILIKAT KRISTALLARIDAGI FOTOELASTIK XUSUSIYATLARGA TA'SIRI

Annotatsiya

Pyezelektrik effektning vismut silikat kristallarining elastik va fotoelastik xossalariining anizotropiyasiga ta'siri Bregg yorug'lik difraktsiyasi usulida o'rganildi. Akustik to'lqin vektorining yo'nalishini o'zgartirish orqali bunday difraktsiyaning samaradorligini boshqarish imkoniyati ma'lum bir simmetriya tekisligi ko'rsatildi. Akustooptik sifat ko'rsatkichining maksimal qiymatlari kuzatiladigan akustik to'lqinlarning tarqalish yo'nalishi aniqlandi.

Kalit so'zlar: vismut silikat kristallari, Bregg yorug'lik difraktsiyasi, fotoelastiklik, pyezelektrik effekt, akustik to'lqin tezligi, akustooptik sifat ko'rsatkichi.

Введение. Кристаллы силиката висмута ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ - BSO) являются кубическими кристаллами, принадлежащими к точечной группе 23, имеют бледно-желтую окраску и обладают электрооптическими и пьезоэлектрическими свойствами. Связь между фотоупругими и электрооптическими свойствами этих кристаллов используется в пространственных модуляторах света, электрооптических датчиках и позволяет разрабатывать различные устройства, такие как голографические записывающие устройства, оптические преобразователи и ячейки Поггеля. Таким образом, изучение фотоупругих свойств кристаллов важно для определения наиболее эффективных срезов кристаллов, используемых в качестве активных сред, и для улучшения параметров акустооптических устройств. [1, 2].

Образцы и методы исследования. В настоящей работе методом Диксона исследована зависимость акустооптической добротности M_2 от направления волнового вектора квазипродольных акустических волн в кристаллах BSO в кристаллографической плоскости (110). Известно, что этот коэффициент был введен Диксоном как свойство, определяющее интенсивность дифрагированного света в материале независимо от размеров пьезопреобразователя и мощности акустической волны [3]:

$$M_2 = \eta \frac{n^6}{V} \quad (1)$$

Здесь n — показатель преломления света, V — скорость акустических волн. В соотношении (1) введен новый параметр η — коэффициент акустооптической эффективности

Исследования фотоупругих свойств проводились на длине волны света $\lambda_0=630$ -нм, с помощью Брэгговской дифракции света на акустических волнах [5]. Эффективные фотоупругие константы определялись модифицированным методом Диксона-Коэна, в котором сравниваются интенсивности дифрагированного света в исследуемом образце и в образце-этalone [6]. В этом методе акустическая волна возбуждается попеременно со стороны эталонного образца, или со стороны исследуемого образца [8]. При возбуждении акустических волн со стороны эталона измерялись значения интенсивности света, дифрагированного в эталонном I_1 и исследуемом образце I_0 . Затем акустические волны возбуждались со стороны образца и измерялись интенсивности света в образце I_2 и эталоне I_3 .

Схема метода при возбуждении акустических волн со стороны эталонного образца приведена на рис. 1. На схеме применены следующие обозначения: 1 – эталонный образец, 2 – исследуемый образец, 3 – пьезодатчик, q – волновой вектор акустической волны, k_1 и k_2 – волновые вектора падающего и дифрагированного света, соответственно, I_0 – интенсивность падающего света, θ_B – внешний угол Брэгговской дифракции. Направление поляризации падающего на образец света, относительно поляризации акустической волны определялось с помощью поляризационного анализатора.

Значение эффективной фотоупругой константы для каждой исследованной геометрии Брэгговской дифракции света определялось из соотношения [9]:

$$\left[\frac{P_{\text{эфф}}^2 n^6}{\rho V^3 (n+1)^4} \right]_o = \left[\frac{P_{\text{эфф}}^2 n^6}{\rho V^3 (n+1)^4} \right]_s \left(\frac{I_{1o} I_{2o}}{I_{1s} I_{2s}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

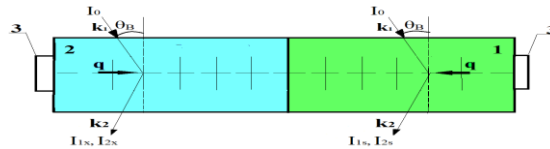


Рисунок 1. Схема определения фотоупругих констант методом Диксона-Козна.

Необходимая для расчета скорость акустических волн вдоль осей [100], [110] и [111] определялась с точностью около 0,2 % по Брэгговскому углу дифракции света на этих волнах [9]. Особенности метода и схема эксперимента детально описаны в [7].

Результаты и обсуждение. Результаты определения эффективных фотоупругих констант кристаллов силиката висмута из измерений интенсивностей дифрагированного света при различных направлениях распространения и поляризации света и звука приведены в таблице 1. Для расчета использовались следующие соотношения

$$\eta = \frac{P_{\text{эфф}}^2}{C_{\text{эфф}}} \quad (3)$$

где $C_{\text{эфф}}$ – эффективная упругая постоянная, определяемая сверткой:

$$C_{\text{эфф}} = c_{ijkl} \gamma_i \gamma_j \gamma_k \gamma_l + \Delta c_{ijkl} \gamma_i \gamma_j \gamma_k \gamma_l \quad (4)$$

где c_{ijkl} – компоненты тензора упругих констант, γ_i и γ_j – соответственно направляющие косинусы вектора поляризации и волнового вектора акустической волны.

Таблица 1

Эффективные фотоупругие константы кристаллов силиката висмута

Q	γ	K	β	α	$P_{\text{эфф}}^E$	$\Delta p_{\text{эфф}}$	$P_{\text{эфф}}^F$
[100]	[100]	[010]	[100]	[100]	$p_{11}=0.16$	0	0.16
	[001]	[001]	[100]	[001]	$p_{44}=0.04$	0	0.04
[110]	[110]	[001]	[110]	[110]	$1/4(2p_{11}+p_{21}+p_{12})+p_{44}=0.183$	0	0.183
	[110]	[001]	[110]	[110]	$1/4(2p_{11}-p_{21}-p_{12})=0.0175$	0	0.0175
	[001]	[001]	[110]	[001]	$p_{44}=0.04$	$\frac{r_{41} \cdot e_{14}}{4 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}} = 0.0038$	0.0362
[111]	[111]	[100]	[111]	[111]	$1/3(p_{11}+p_{21}+p_{12}+4p_{44})=0.19$	$\frac{4 \cdot r_{41} \cdot e_{14}}{3 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}} = 0.02$	0.17
	[110]	[110]	[111]	[110]	$1/6(2p_{11}-p_{21}-p_{12}+2p_{44})=0.025$	0	0.025

В таблице 1 через векторы $q, \gamma, k, \beta, \alpha$ обозначены направления, соответственно, волновых векторов звука и света и поляризации звука и падающего и дифрагированного света. В соотношении (4) Δc_{ijkl} – компоненты тензора пьезоэлектрической добавки к упругости кристалла, обусловленной влиянием пьезоэлектрического эффекта [10]:

$$P_{\text{эфф}} = p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k \gamma_l - \Delta p_{ijkl} \alpha_i \beta_j \gamma_k \gamma_l \quad (5)$$

Здесь $p_{\text{эфф}}$ – эффективная фотоупругая константа, которая также отличается от обычной за счет пьезоэффекта, α_i, β_j , соответственно, направляющие косинусы поляризации дифрагированного и падающего света

Таким образом, для света, дифрагированного на продольной акустической волне и поляризованного вдоль оси [100], пьезоэлектродополнительная добавка $\Delta p_{\text{эфф}}$ равна нулю. При этом при дифракции света на поперечных акустических волнах вдоль оси [110], получаем следующее соотношение для эффективной фотоупругой константы с учетом пьезоэлектродополнительной добавки $\Delta p_{\text{эфф}}$:

$$|P_{\text{эфф}}| = \left| p_{44} - \frac{r_{41} e_{14}}{4 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}} \right|, \quad (6)$$

В то же время при дифракции света с поляризацией по [111] на продольной акустической волне вдоль оси [111] получаем:

$$|P_{\text{эфф}}| = \left| 1/3(p_{11} + p_{12} + p_{21} + 4p_{44}) - \frac{4 \cdot r_{41} e_{14}}{3 \cdot \epsilon_0 \epsilon_{11}} \right|, \quad (7)$$

так как пьезоэлектродополнительные добавки $\Delta p_{11}, \Delta p_{12}, \Delta p_{21}$ в этой геометрии равны нулю. В (6) и (7) $e_{\alpha\beta}, r_{\alpha\beta}$ и $\epsilon_{\alpha\beta}$ – компоненты, соответственно, пьезоэлектрического, электрооптического и диэлектрического тензоров, в матричной записи [11]. При вычислениях использовались литературные данные по плотности и показателям преломления из работы [7].

Для определения анизотропии коэффициента акустооптического качества в кристаллах, согласно формулам (1) и (3) необходимо в первую очередь найти компоненты вектора поляризации акустических волн, который в общем случае отклоняется от вектора волновой нормали. Для решения такой задачи можно использовать систему алгебраических уравнений Грина–Кристоффеля [5–7]:

$$[\Gamma_{ik} - \delta_{ik} \rho V^2] \gamma_k = 0, \quad (8)$$

где Γ_{ik} и δ_{ik} – соответственно, компоненты тензора Грина–Кристоффеля и тензора Кронекера, V – скорость акустической волны, γ_k – компоненты вектора поляризации.

Компоненты тензора Грина–Кристоффеля, представляют собой свертку тензора упругих констант, по направляющим косинусам волновой нормали κ :

$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl} \kappa_j \kappa_l \quad (5)$$

В плоскости (110), при угле между направлением распространения акустической волны и осью [110], равным φ , направляющие косинусы равны $\kappa_1 = 1/\sqrt{2} \cdot \cos \varphi$, $\kappa_2 = 1/\sqrt{2} \cdot \cos \varphi$, $\kappa_3 = \sin \varphi$, и компоненты тензора Грина–Кристоффеля записываются в виде:

$$\Gamma_{11} = \Gamma_{22} = c_{11}(1/\sqrt{2} \cos \varphi)^2 + c_{44}(1/\sqrt{2} \cos \varphi + \sin \varphi)^2$$

$$\Gamma_{12} = \Gamma_{21} = (c_{12} + c_{44})(1/\sqrt{2} \cos \varphi)^2$$

$$\Gamma_{13} = \Gamma_{31} = \Gamma_{23} = \Gamma_{32} = (c_{12} + c_{44})1/\sqrt{2} \cos \varphi \sin \varphi$$

$$\Gamma_{33} = \Gamma_{21} = c_{11} \sin^2 \varphi + c_{44} \cos^2 \varphi$$

Подстановкой в уравнения (5) значений компонент тензора Грина–Кристоффеля Γ_{ik} из соотношений (6) была определена зависимость фазовой скорости продольных акустических волн от направления волнового вектора в плоскости (110) в кристаллах BSO. При расчете использовались следующие значения плотности, упругой и фотоупругой констант: $\rho = 9.15 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_{11} = 13.01 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c_{12} = 3.05 \cdot 10^{10}$ Н/м², $c_{44} = 2.43 \cdot 10^{10}$ Н/м², $p_{11} = 0.16$, $p_{12} = 0.13$, $p_{21} = 0.12$, $p_{44} = 0.04$. Дополнительные величины, необходимые для расчета, брались из [1,3,11].

На основе значений скорости продольных и поперечных волн и уравнений (6) и (8) были определены компоненты вектора поляризации и угол ориентации этого вектора относительно оси [100] в плоскости (001) из соотношения:

$$\psi = \arctg \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \arctg \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{\Gamma_{12}\Gamma_{13} - \Gamma_{23}(\Gamma_{11} - \rho V^2)}{\Gamma_{23}\Gamma_{13} - \Gamma_{12}(\Gamma_{33} - \rho V^2)} \right) \quad (7)$$

Результаты расчета $1/V^3$ для дифракции света на продольных акустических волнах показали, что максимальное значение $1/V^3$ составило $0.28 \cdot 10^{-10}$ с³/м³ при $\varphi = 35$ градусов для продольных волн. Полученные значения эффективных фотоупругих констант и величины $(1/V^3)$ использовались для расчета зависимости акустооптической добротности от направления волнового вектора акустической волны в плоскости (110) с помощью выражения (1). Результаты расчетов представлены на рисунках 2 и 3, на которых короткими линиями показаны результаты без учета пьезоэффекта, а сплошной линией — результаты с учетом пьезоэффекта.

Видно, что максимальное значение акустооптической добротности M_2 с учетом влияния пьезоэффекта при дифракции света на продольных акустических волн, распространяющихся в плоскости (110) наблюдается для направления [110], и равно $23.9 \cdot 10^{-15}$ с³/кг.

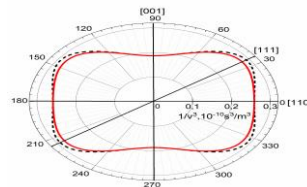


Рисунок 2. Зависимость куба медленности продольных волн в кристаллах BSO от направления волнового вектора квазипродольных акустических волн в плоскости (110).

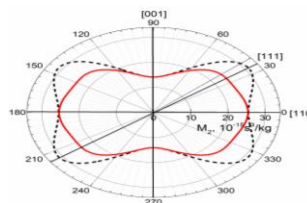


Рисунок 3 Зависимость коэффициента M_2 в кристаллах BSO от направления волнового вектора квазипродольных акустических волн в плоскости (110)

Заключение. Результаты исследования Брэгговской дифракции света на акустических волнах в кристаллах силиката висмута показывают необходимость учета влияния дополнительного вклада в акустооптическую эффективность в кристаллах, обладающих пьезоэффектом. Этот вклад вносит изменения в анизотропию их упругих и фотоупругих свойств и должен учитываться при разработке акустооптических устройств с применением таких кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Amanova M.A, Shepelevich V.V, Makarevich V.V, Navnyk V.N. Influence of Inverse Piezoelectric Effect, Photoelasticity, and Optical Activity on the Diffraction Efficiency of Transmitting Holograms in Photorefractive Crystal $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. Journal of Applied Spectroscopy, 2020. Vol. 87, No.2, P.349–356.
2. Shen C., Zhang H., Zhang Y., Xu H., Y H., Wang, J., Zhang S. Orientation and Temperature Dependence of Piezoelectric Properties for Sillenite-Type $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ Single Crystals. Crystals, 2014. Vol. 4, No.2, P.141-151.
3. Akhmedzhanov F.R, Mirzaev S.Z, Saidvaliev U.A. Parameters of elastic anisotropy in bismuth silicate crystals. Ferroelectrics. 2020, Vol. 556, P.23–28.
4. Venturini E. L., Spencer E. G., Ballman A. A. Elasto-Optic Properties of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, and $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$. Journal of Applied Physics, 1969. Vol.40, No.4, P.1622–1624.
5. Дьелесан Э.Д., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. - М.: Наука, 1982. – 342 с.
6. Dixon R. W., Cohen M. G. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate. Appl. Phys. Lett. 1966. No. 8. P. 205-207.
7. 7.Акустические кристаллы. Справочник, под ред. М.П.Шаскольской – М.: Наука, 1982, 352с.
8. Mytsyk B., Demyanyshyn N., Andrushchak A., Buryy O. Photoelastic Properties of Trigonal Crystals. Crystals. 2021. Vol. 11.P. 1095.
9. 9.Mys O., Kostyrko M., Smyk M., Krupych O., R. Vlokh, Anisotropy of acousto-optic figure of merit in optically isotropic media. Applied Optics, 2014, Vol.53, No.20, P.4616-4627.
10. 10.Buryy O., Hotra, Z., Andrushchak A. Determination of global maxima of electro-, piezo- and acousto-optic effects in langasite crystals. 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). P.74-78.
11. Belyi V.N., Kulak, G. V. Diffraction of light on ultrasound in gyrotropic cubic crystals in bragg conditions. Journal of Applied Spectroscopy, 1991, Vol.54, No.5, P.484–488.