Uzbek Journal of Physics

Vol.21(№6) 2019 PP.375-379

ФОТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ МОЛИБДАТА СВИНЦА, ЛЕГИРОВАННЫХ ПРИМЕСЯМИ НАТРИЯ И НЕОДИМА

С.З. Мирзаев, Ф.Р. Ахмеджанов, В.Н. Авдиевич, Ж.О. Курбанов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им.У.А. Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан

(Получена 04.10.2019)

Брэгг ёруғлик дифракцияси режимида Диксон методи ёрдамида Na ва Nd аралашмалар билан легирланган $PbMoO_4$ кристалларида фотоэластик хусусиятлари акустик тўлқинларда дифракцияланган ёруғликнинг кутубланиш йуналишига боғлиқлигини аниқлаб берилди. Кузатилган фотоэластик анизотропияси натрий ва неодим аралашма ионларнинг асосан кристаллографик Z ўқи бўйича ҳаракатланиши билан тушунтирилди.

Методом Диксона в режиме брэгговской дифракции света на акустических волнах определена зависимость фотоупругих свойств кристаллов молибдата свинца, легированных примесями натрия и неодима, от направления поляризации дифрагированного света. Наблюдаемая анизотропия фотоупругости объясняется движением примесных ионов натрия и неодима преимущественно вдоль кристаллографической оси *Z*.

The dependence of photoelastic properties of $PbMoO_4$ crystals, doped with Na and Nd impurities, on the direction of polarization of diffracted light on the acoustic waves have been determined by the Dixon method in the regime of Bragg light diffraction. The observed photoelastic anisotropy is explained by the movement of Na and Nd impurity ions in preference along the *Z* crystallographic axis.

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование фотоупругих характеристик кристаллов и анизотропии фотоупругого эффекта, помимо фундаментального интереса, является достаточно важным для определения наиболее эффективных срезов кристаллов, используемых в качестве рабочих сред, и оптимизации параметров акустооптических устройств. В общем виде эта проблема чрезвычайно сложна. Как показано в [1], даже в рамках модели Поккельса, для нахождения экстремальных направлений в кристалле, обеспечивающих максимальное значение эффективной фотоупругой постоянной, требуется решение системы из 21 нелинейных уравнений четвертого, третьего и второго порядков с тензорами высокого ранга. В связи с этим обычно рассматривают фотоупругие свойства кристаллов для конкретных геометрий акустооптического взаимодействия и для определенных срезов кристалла [2].

В настоящей работе исследованы фотоупругие свойства чистых и примесных кристаллов $PbMoO_4$, которые широко используются в качестве рабочей активной среды в акустооптических устройствах [3]. В частности, изучено влияние примесей в этих кристаллах на коэффициент акустооптического качества M_2, который был введен Диксоном [4] в качестве характеристики эффективности брэгговской дифракции на акустических волнах и определяет интенсивность дифрагированного света в данном материале независимо от размеров пьезоэлектрического преобразователя и акустической мощности:

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

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

Эффективная фотоупругая постоянная, $p_{эфф}$, в соотношении (1) является сверткой значений компонентов фотоупругого тензора p_{ijkl} рассматриваемого кристалла по нормированным векторам поляризации соответственно дифрагированного и падающего света α и β, направления и поляризации акустической волны κ и γ [4]:

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

Таким образом, коэффициент M_2 зависит от геометрии дифракции света на звуке и позволяет производить оценку акустооптических свойств материалов. Изменяя направление поляризации падающего света относительно волнового вектора и поляризации акустической волны можно воздействовать на величину эффективной фотоупругой постоянной и, в конечном итоге, управлять эффективностью брэгговской дифракции света. Такие эксперименты позволяют также выявлять наиболее оптимальные геометрии для получения наибольшей интенсивности дифрагированного света.

II. ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Эксперименты проводили на чистых и легированных примесями натрия или неодима образцах $PbMoO_4$. Концентрация примесей Na и Nd составляла не более 0.3 мол.%. Образцы были ориентированы вдоль кристаллографических осей [100] и [001]. Измерения выполняли методом брэгговской дифракции света [5] на акустических волнах с частотами 400–1200 МГц, которые возбуждали кварцевыми пьезопреобразователями *X*-среза. 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.

Для определения эффективных фотоупругих констант использовали модифицированный метод Диксона-Коэна, в котором пьезопреобразователи приклеивали как на эталонный, так и на исследуемый образец [4]. При возбуждении акустических волн со стороны эталона измеряли значения интенсивности света, дифрагированного в эталонном $I_{1э}$ и исследуемом образце $I_{1х}$. Затем акустические волны возбуждали со стороны образца и снова измеряли интенсивности света в образце $I_{2х}$ и эталоне $I_{2э}$.

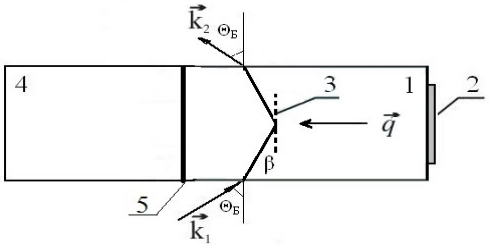


Рис. 1. Схема модифицированного метода Диксона-Коэна при возбуждении звука со стороны образца молибдата свинца.

Схема метода, когда акустические волны возбуждали со стороны образца, приведена на рис. 1. При этом применены следующие обозначения: 1 – исследуемый образец, 2 – пьезопреобразователь, 3 – фронт акустической волны, 4 – эталонный образец, 5 – склейка, **q** – волновой вектор акустической волны, $\mathbf{k_1}$ и $\mathbf{k_2}$ – волновые векторы соответственно падающего и дифрагированного света.

В качестве эталона использовали образец плавленого кварца, для которого коэффициент качества M_2 при дифракции света на продольной акустической волне принимался равным 1.56×10^{-15} с^3/кг [4]. Акустический контакт образца с эталоном осуществляли с помощью эпоксидной смолы.

Значения эффективных фотоупругих констант при различных геометриях брэгговской дифракции света определяли из соотношения [6]:

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

где ρ – плотность кристалла; n – показатель преломления света; V – скорость акустической волны; I_{1x} и $I_{1э}$ – интенсивности света, дифрагированного соответственно в образце и эталоне при распространении акустической волны из образца в эталон; I_{2x} и $I_{2э}$ – интенсивности света при распространении акустической волны из эталона в образец.

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% [5]. Точность определения величины M_2 по отношению к эталону составляла около 20%.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе измеренных значений интенсивностей дифрагированного света в чистых и легированных образцах молибдата свинца для различных направлений и поляризаций света и акустической волны были рассчитаны эффективные фотоупругие константы $p_{эфф}$ и коэффициент акустооптического качества M_2. Для расчета использовали полученные экспериментально значения скоростей акустических волн, соотношения (1)-(3) и данные по плотности и показателям преломления из [6, 7]. Результаты расчета представлены в таблице вместе с основными характеристиками этих кристаллов. Волновые векторы **q** и **k** указывают кристаллографическое направление распространения акустических и световых волн соответственно, $\mathbf{E_0}$ – направление поляризации падающего света.

Из таблицы видно, что как в чистых, так и в легированных кристаллах $PbMoO_4$ наблюдается зависимость эффективной фотоупругой постоянной и коэффициента акустооптического качества от направления распространения акустической волны и поляризации падающего света. Наиболее сильно этот эффект проявляется в кристаллах молибдата свинца, легированных неодимом, в которых коэффициент M_2 при дифракции на акустических волнах вдоль [001] становится примерно на порядок больше, чем для тех же волн вдоль оси [100]. Обусловлено это различием в поляризации света, взаимодействующего с акустическими волнами, и, следовательно, различием в эффективных фотоупругих константах $p_{эфф}$, поскольку остальные величины, входящие в соотношение (2), почти не отличаются друг от друга во всех кристаллах. В частности, легирование кристаллов практически не

изменяет скорость распространения акустических волн вдоль кристаллографических осей.

Таблица 1. Коэффициенты акустооптического качества и фотоупругие постоянные чистых и легированных кристаллов $PbMoO_4$ (λ_0=632.8·нм)

Кристалл	**q**	**k**	$\mathbf{E_0}$	V,10^3 м·с$^{-1}$	$p_{эфф}$	M_2, 10^{-18} с^3/г
$PbMoO_4$	[100]	[010]	[001]	3.98	0.17	5.20
	[001]	[010]	[100]	3.75	0.26	24.1
$PbMoO_4$:0.3Na	[100]	[010]	[001]	3.98	0,07	2.10
	[100]	[010]	[100]	3.98	0,12	8.46
	[001]	[010]	[100]	3.72	0,15	10.6
$PbMoO_4$:0.3Nd	[100]	[010]	[001]	3.97	0,09	2.60
	[100]	[010]	[100]	3.97	0,16	13.7
	[001]	[010]	[100]	3.71	0,21	20.1

На рис. 2, представлена зависимость эффективной фотоупругой постоянной от направления поляризации света, падающего на образец $PbMoO_4$:0.3Nd вдоль кристаллографической оси [010]. Видно, что экспериментальные значения хорошо совпадают с теоретической кривой, рассчитанной из выражения [4, 6]:

$$p_{эфф}^2 = p_{11}^2 \cos^2\psi + p_{31}^2 \sin^2\psi\,, \tag{3}$$

где ψ – угол между вектором поляризации света и осью [100] в плоскости *XOZ*.

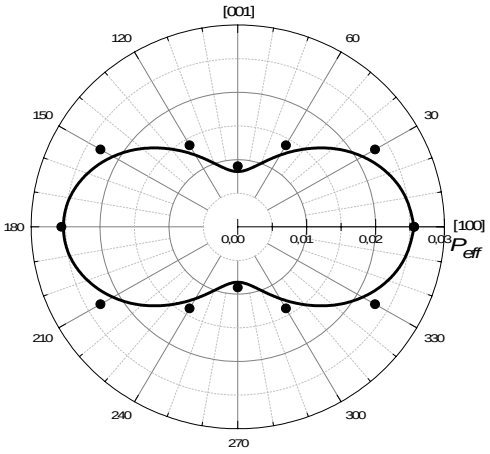


Рис. 2. Зависимость эффективной фотоупругой постоянной от направления поляризации света, падающего на кристалл $PbMoO_4$:0.3Nd вдоль оси <010>. Кривая линия – расчет, точки – эксперимент

Как видно из рис. 2, изменяя направление поляризации падающего света, можно управлять величиной эффективной фотоупругой постоянной и соответственно эффективностью брэгговской дифракции света.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно полученным результатам, легирование кристаллов молибдата свинца примесями натрия и неодима заметно уменьшает эффективную фотоупругую константу $p_{эфф}$, особенно в случае дифракции света с поляризацией по оси [001] на продольных акустических волнах вдоль оси [100] (в 2–2.5 раза). В работе [8] в кристаллах $PbMoO_4$, легированных натрием, была обнаружена высокая подвижность ионов натрия в кристаллической решетке $PbMoO_4$. При этом движение ионов натрия имеет квазиодномерный характер и направлено преимущественно вдоль кристаллографической оси [001], что может частично подавлять фотоупругий эффект при взаимодействии акустических волн со светом, поляризованным вдоль этого же направления [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. S.T. Нарасимхамурти. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов (Москва, Мир, 1984).
2. С.Н. Антонов, А.В. Вайнер, В.В. Проклов, Ю.Г. Резвов, Журнал технической физики **80**, Вып. 9, 104-109 (2010).
3. С.Н. Антонов, Журнал технической физики **86**, вып. 10, 155-158 (2016).
4. R.W. Dixon, IEEE Trans. ED **17**, №1, 229-235 (1980).
5. О.Б. Гусев, В.В. Клудзин. Акустооптические измерения (Ленинград, ЛГУ, 1987).
6. Э.Д. Дьелесан, Д. Руайе. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов (Москва, Наука, 1982).
7. Акустические кристаллы. Справочник. Под ред. М.П. Шаскольской (Москва, Наука, 1982).
8. Ш.А. Асраров, Е.В. Чарная, Ф.Р. Ахмеджанов, В.В. Воробьев, В.Т. Габриэлян, ФТТ **34**, вып 7, 2225-2228 (1992).
9. В.Е. Лямов. Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах (Москва, МГУ, 1983).