

УДК 535.544

М.В. Чуманов, И.А. Паргачёв, Л.Я. Серебренников, В.А. Краковский, С.М. Шандаров

## Измерение фотоупругих коэффициентов кристалла РКТР методом статических деформаций

Измерены фотоупругие коэффициенты кристалла РКТР без поправки на линейный электрооптический эффект, значения которых для случая деформации вдоль направления [001] и ориентации вектора поляризации световой волны вдоль главных кристаллографических направлений составили  $p_{13}^E = 0,109$ ,  $p_{23}^E = 0,156$  и  $p_{33}^E = 0,224$ .

**Ключевые слова:** фотоупругий эффект, статическая деформация, кристалл РКТР.

Высокоомный кристалл  $\text{KTiOPO}_4$  (РКТР) – это перспективный материал для использования в различных приложениях управления лазерным излучением. На сегодняшний день РКТР успешно используется при изготовлении электрооптических затворов и элементов для генерации второй гармоники [1]. Среди множества физических свойств кристалла выделяется ряд наиболее важных особенностей: высокий порог оптического повреждения ( $2,5 \text{ ГВт/см}^2$ ) и относительно высокий коэффициент акустооптического качества ( $4,2 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ ), низкий коэффициент затухания ультразвуковой волны [1, 2]. Кристалл РКТР имеет высокую скорость распространения ультразвуковой волны ( $\sim 7,76 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ) [3], что обеспечивает повышенное быстродействие таких устройств, как АО-затворы и дефлекторы. Кристаллы семейства КТР негигроскопичны, химически устойчивы и прозрачны в широком диапазоне длин волн ( $0,35\text{--}4,5 \text{ мкм}$ ). Следует отметить, что РКТР имеет собственную пьезоэлектрическую активность с относительно высоким коэффициентом электро-механической связи, что позволяет использовать его в акустооптических и акустоэлектронных устройствах без дополнительных пьезопреобразователей, работающих в ближнем СВЧ-диапазоне.

Практическая реализация акустооптических устройств в такой конфигурации предъявляет требование к акустооптическому качеству материала  $M_2$ , которое в свою очередь зависит от фотоупругих свойств:

$$M_2 = \frac{p_3^2 n^6}{\rho v^3}, \quad (1)$$

где  $p_3$  – эффективный фотоупругий коэффициент;  $n$  – показатель преломления среды;  $\rho$  – плотность среды;  $v$  – скорость акустической волны.

Однако известные из ранее опубликованных результатов [6] по исследованию физических свойств  $\text{KTiOPO}_4$  значения фотоупругих компонентов не дают достоверных результатов при расчете и проведенных измерениях  $M_2$  методом Диксона [2]. Поэтому актуальной задачей является исследование кристаллов РКТР с вышеописанными параметрами.

**Фотоупругий эффект.** Фотоупругий эффект характеризуется изменением диэлектрической проницаемости оптического материала под действием упругих деформаций. В общем случае диэлектрическая проницаемость описывается тензором второго ранга, и при выборе системы координат, оси которой совпадают с главными кристаллофизическими осями кристалла РКТР, тензор принимает диагональный вид. При описании фотоупругого эффекта удобнее пользоваться тензором диэлектрической непроницаемости, компоненты которого являются обратными по отношению к компонентам тензора диэлектрической проницаемости [4]:

$$B_{ij} = 1/\epsilon_{ij}, \quad (2)$$

где  $B_{ij}$  – диэлектрическая непроницаемость;  $\epsilon_{ij}$  – диэлектрическая проницаемость.

Упругие деформации в той же системе координат можно представить в виде тензора второго ранга. Связь тензора диэлектрической непроницаемости с тензором упругой деформации имеет вид [4]

$$B_{ij} = p_{ijkl} S_{kl}, \quad (3)$$

где  $p_{ijkl}$  – тензор четвертого ранга фотоупругих постоянных,  $S_{kl}$  – тензор упругих деформаций. Тензор диэлектрической проницаемости с учетом внешнего механического воздействия имеет следующий вид [4]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^0 + \frac{1}{B_{ij}}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{ij}^0$  – тензор диэлектрической проницаемости в невозмущенной среде.

Как известно [4], показатель преломления среды равен квадрату соответствующей ему диэлектрической проницаемости:

$$n_{ij} = \varepsilon_{ij}^2. \quad (5)$$

Опираясь на выражения (2)–(5), можно записать формулу для изменения показателя преломления под действием внешней силы [4]:

$$\Delta n_{ij} = -\frac{1}{2} \left( n_{ij}^0 \right)^3 p_{ijkl} S_{kl} \quad (i = j), \quad (6)$$

где  $n_{ij}^0$  – показатель преломления для невозмущенной среды.

В свою очередь тензор упругих деформаций выражается через тензор механических напряжений ( $T_{ij}$ ) и тензор упругой жесткости материала ( $c_{ijkl}$ ):

$$S_{kl} = \frac{T_{mn}}{c_{mnlk}}. \quad (7)$$

Фотоупругие коэффициенты анизотропных кристаллов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, определяются выражением

$$p_{ijkl} = p_{(ij)(kl)}^E + p_{(ij)[kl]}^E - \Delta p_{ijkl},$$

где  $p_{(ij)(kl)}^E$  – симметричная часть тензора фотоупругости, отвечающая за деформацию среды;  $p_{(ij)[kl]}^E$  – антисимметричная часть фотоупругого тензора, обусловленного неоднородным вращением элементов объема кристалла;  $\Delta p_{ijkl}$  – последовательный вклад пьезоэлектрического и электрооптического эффектов [3].

**Методика измерения фотоупругих постоянных.** Экспериментальная установка представляет собой однонаправленный двулучевой интерферометр Рэлея (рис. 1).

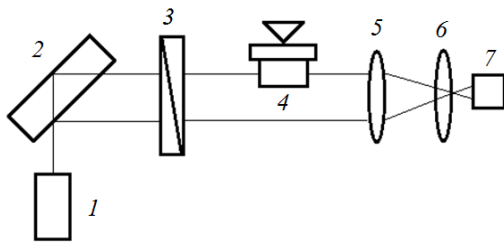


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения фотоупругих постоянных: 1 – лазер; 2 – плоскопараллельная пластина; 3 – поляризатор; 4 – исследуемый образец; 5 – собирающая линза; 6 – рассеивающая линза; 7 – измерительная камера «Spiricon SP 620»

В качестве источника излучения используется He-Ne лазер с длиной волны  $\lambda = 632$  нм. На светоделительной плоскопараллельной пластине 2 формируются два параллельных пучка. Поляризатор 3 задает положение плоскости линейной поляризации, соответствующее измеряемой фотоупругой константе. Один из пучков проходит через исследуемый образец. После чего линзами 5 и 6 лазерные пучки совмещаются и формируют интерференционную картину. Изображение интерференционной картины фиксируется цифровой камерой. Цифровая камера формирует двумерный массив данных, в каждой ячейке которого записана информация об интенсивности света, падающего на соответствующий ячейке пиксель. Такой массив данных сохраняется на ЭВМ для каждой фазы эксперимента.

Образцы устанавливаются на плоский металлический столик. Сверху к элементу прикладывается внешняя сила через жесткую металлическую пластину. Прикладываемая к образцу сила направлена вдоль оси  $z$  кристалла. На  $z$ -гранях элементов нанесены токопроводящие покрытия, закороченные между собой. Таким образом, механическое напряжение в кристалле равно

$$T_{33} = F_{33} / S^*, \quad (8)$$

где  $F$  – сила;  $S^*$  – площадь поверхности образца.

При изменении показателя преломления под действием упругих деформаций фаза интерференционной картины изменяется по следующему закону [4,5]:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot l \cdot \Delta n / \lambda, \tag{9}$$

где  $l$  – длина элемента;  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

На рис. 2 показан пример смещения полос интерференционной картины при изменении механического напряжения.

Электрическое поле, возникающее за счет пьезоэлектрического эффекта, не влияет на фазу интерференционной картины, так как электрические контакты кристаллического элемента закорочены.

Подставляя в (9) выражение для изменения показателя преломления (6) с учетом (7) и (8), получаем выражение для фотоупругих постоянных

$$p_{ij33}^E = \frac{-\Delta\varphi \cdot \lambda \cdot S^* \cdot c_{3333}^E}{\pi \cdot l \cdot (n_{ij}^0)^3 \cdot F_{33}}. \tag{10}$$

Удобно использовать матричную форму записи выражений. Для перехода от тензорной формы к матричной используются правила, описанные в [4].

**Экспериментальные результаты.** Для измерения фотоупругих постоянных  $p_{13}^E$ ,  $p_{23}^E$  и  $p_{33}^E$  использовались элементы с геометрическими размерами  $4 \times 4 \times 10$  мм<sup>3</sup> двух типов, соответствующих направлениям распространения света вдоль осей  $x$  и  $y$ . В первом случае плоскости поляризации света образованы осями  $y$  и  $z$ . В случае направления распространения света вдоль оси  $y$  плоскости поляризации света образованы осями  $x$  и  $z$ . Первый индекс фотоупругих постоянных соответствует направлению вектора поляризации. Зависимость фазового сдвига интерференционной картины от внешнего механического напряжения отображают графики, приведенные на рис. 3.

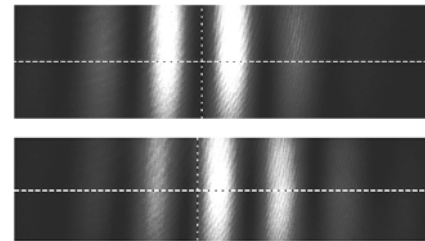
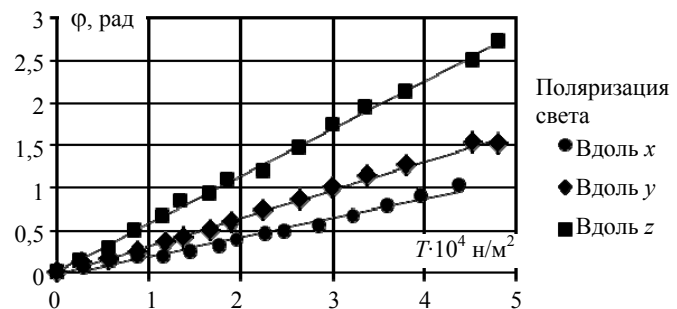


Рис. 2. Смещение интерференционных полос при изменении механического напряжения

Рис. 3. Зависимость фазового сдвига от прикладываемого механического напряжения



Пользуясь методом наименьших квадратов, производились построения линейных зависимостей изменения фазового сдвига интерференционной картины от механического напряжения. Используя формулу (9), с учетом полученных данных рассчитывались значения фотоупругих постоянных. Так как во всех экспериментах направление силы механического давления выбрано вдоль оси  $z$  и рассматривались случаи только продольной деформации, конечное выражение для фотоупругих постоянных

$$p_{ij}^E = \frac{-\Delta\varphi \cdot \lambda \cdot S^* \cdot c_{33}^E}{\pi \cdot l \cdot (n_i^0)^3 \cdot F_3} \quad (j=3),$$

где значения индекса  $i$  соответствуют главным кристаллографическим осям кристалла.

При расчете использовались показатели преломления, равные:  $n_x=1,764$ ,  $n_y=1,773$ ,  $n_z=1,779$  [5], и коэффициент упругой жесткости, равный  $c_{33}^E=14,95 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup> [6, 7].

Таким образом, значения фотоупругих постоянных в случае направления упругой деформации [001] и ориентации вектора поляризации вдоль главных кристаллографических направлений:  $p_{13}^E=0,109$ ,  $p_{23}^E=0,156$  и  $p_{33}^E=0,224$ .

**Заключение.** Измерены значения фотоупругих коэффициентов кристалла РКТР методом статических деформаций для случая продольных механических деформаций в направлении оси  $z$  кристалла. Полученный при расчете коэффициент акустооптического качества с учетом измеренных фотоупругих коэффициентов и поправки на вторичный фотоупругий эффект имеет близкое значение с измеренным методом Диксона в ранее опубликованной работе [2].

*Литература*

1. Электрооптические модуляторы лазерного излучения на основе высокоомных кристаллов КТР / И.А. Паргачёв, Л.Я. Серебренников, А.Е. Мандель и др. // Доклады ТУСУРа. – 2011. – Т. 24, № 2. – Ч. 2. – С. 116–118.
2. Чуманов М.В. Исследование акустооптических характеристик кристалла РКТР / М.В. Чуманов, И.А. Паргачёв // Труды Всероссийской конференции СНИИ. – Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – С. 141–142.
3. Чуманов М.В. Измерение скорости распространения акустической волны в нелинейно-оптическом кристалле РКТР / М.В. Чуманов, И.А. Паргачёв // Труды Всерос. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР–2014». – Томск: Изд-во В-Спектр. – 2014. – Ч. 2. – С. 21–23.
4. Богданов С.В. Акустооптические методы измерения скорости звука / С.В. Богданов; отв. ред. А.В. Царев; Рос. акад. наук, Сиб. отд., Ин-т физики полупроводников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 142 с.
5. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики: учеб. пособие для студентов. – М.: Изд-во МИСИС, 2000. – 232 с.
6. Zubrinov I.I. Elastic and elasto-optic properties of  $\text{KTiOPO}_4$  / I.I. Zubrinov, V.K. Sapozhnikov, E.V. Pestrykov, V.V. Atuchin // Proceedings SPIE. – 2003. – Vol. 5129. – P. 249–254.
7. Сильвестрова И.М. Упругие и пьезоэлектрические свойства кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$  // Кристаллография. – 1992. – Т. 37, № 5. – С. 1227–1231.

**Чуманов Михаил Владиславович**

Аспирант каф. электронных приборов (ЭП) ТУСУРа  
Инженер ООО «Кристалл Т»  
Тел.: +7-953-923-14-01  
Эл. почта: cmv-chuvi@rambler.ru

**Паргачёв Иван Андреевич**

Аспирант каф. электронных приборов (ЭП) ТУСУРа  
Инженер ООО «Кристалл Т»  
Тел.: +7-913-114-47-70  
Эл. почта: underfin@mail.ru

**Серебренников Леонид Яковлевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭП,  
заместитель директора ООО «Кристалл Т»  
Тел.: +7-953-912-83-53  
Эл. почта: silver.47@mail.ru

**Краковский Виктор Адольфович**

Д-р техн. наук, директор ООО «Кристалл Т»  
Тел.: +7 (3822) 701397  
Эл. почта: kva@crystal.org

**Шандаров Станислав Михайлович**

Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. ЭП  
Тел.: +7-913-813-94-71  
Эл. почта: shand@ed.tusur.ru

Chumanov M.V., Pargachev I.A., Serebrennikov L.Y., Krakovsky V.A., Shandarov S.M.

**Measurement of the photoelastic coefficients of RKTP crystal by static strain**

Photoelastic coefficients of RKTP crystal are measured without considering to the linear electro-optic effect. The values of coefficients in case of deformation along the [001] axis and orientation of the polarization vector of the light wave along the main crystallographic directions are the following:  $p_{13}^E = 0,109$ ,  $p_{23}^E = 0,156$  и  $p_{33}^E = 0,224$ .

**Keywords:** photoelastic effect, static deformation, crystal RKTP.