

09
Оценка электрооптики сегнетокерамики цирконата-титаната свинца ЦТС и ЦТСЛ по измерению модуляции отражения света

© А.В. Князьков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 195251 Санкт-Петербург, Россия
 e-mail: akniazkov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 5 сентября 2014 г. В окончательной редакции 7 июля 2015 г.)

Оценены электрооптические коэффициенты изменения показателя преломления сегнетофракмики цирконата-титаната свинца ЦТС и ЦТСЛ, индуцированного переменным электрическим полем по измерению модуляции отраженного света. Проведено сравнение значений электрооптического коэффициента ЦТСЛ керамики, полученного традиционным способом исследования двулучепреломления — по набегу фазы света при пропускании света и новым методом двулучеотражения — по модуляции отражения света.

Индукционное изменение показателя преломления δn под действием электрического поля E в неполяризованных сегнетокерамических материалах описывается квадратичным электрооптическим (ЭО) коэффициентом R , а для поляризованных образцов — описывается линейным ЭО коэффициентом r :

$$\begin{aligned} \delta n_R &= \frac{1}{2} n^3 R E^2, \\ \delta n_r &= \frac{1}{2} n^3 r E. \end{aligned} \quad (1)$$

Измерение ЭО коэффициентов сред, как правило, основывается на методах определения индуцированной полем разности фазовых задержек ортогонально поляризованных световых волн, прошедших среду, помещенную в различные интерферометрические схемы [1]. Наиболее популярной схемой исследования электрооптики является пропускающая поляризационно-оптическая схема (ПОС) (рис. 1) [2,3]. Эти известные методы применимы для прозрачных ЭО сред достаточной толщины, позволяющей достичь у прошедших пучков измеримой разности фазовых задержек. Разрабатываемые ЭО среды не всегда обладают достаточной прозрачностью и часто синтезируются в виде пленок. Исследование таких сред сталкивается с определенными трудностями из-за малого пропускания и толщины. Это стимулирует разработку новых методов исследования электрооптики. Реализация метода исследования электрооптики по измерению модуляции отраженного света посвящена настоящей работа.

Необходимое для измерения ЭО коэффициента преобразование фазовой модуляции в амплитудную в ПОС со скрещенными анализатор-поляризатором описывается выражением

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right), \quad (2)$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на среду, I — интенсивность света, прошедшего среду, Γ — разность фазовых задержек ($\Gamma = 2\pi l \delta n / \lambda$, l — толщина среды, λ — длина волны света).

Преобразование фазовой ЭО модуляции в амплитудную модуляцию без применения интерферометрических схем и поляризационно-оптических схем с поляризатором-анализатором, продемонстрировано в нашей работе [4]. Где предложена отражающая схема, в которой преобразование фазового изменения показателя преломления в амплитудное изменение интенсивности отраженного света осуществляется в соответствии с законом Френеля.

В настоящей работе проведена оценка ЭО коэффициентов как прозрачной сегнетокерамики цирконата-титаната свинца, модифицированной лантаном (ЦТСЛ $x/65/35$, x — содержание лантана в at.%, 8, 9 и 10, 65/35 — отношение цирконий-титан) так и непрозрачной поляризованной сегнетокерамики ЦТС-19 ($(\text{Pb}_{0.95}\text{Sr}_{0.05})(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3 + 1 \text{ wt.}\% \text{ Nb}_2\text{O}_5$) по измерению изменений коэффициента отражения поляризованного света, вызванного модуляцией показателя преломления среды под действием низкочастотного переменного электрического поля. В отличие от методов ПОС измеряется не разность фазовых задержек ортогонально поляризованных волн, прошедших ЭО среду, а измеряется разность коэффициентов отражения для этих волн, вызванная изменением показателя преломления среды. Известные методы измерения ЭО коэффициентов

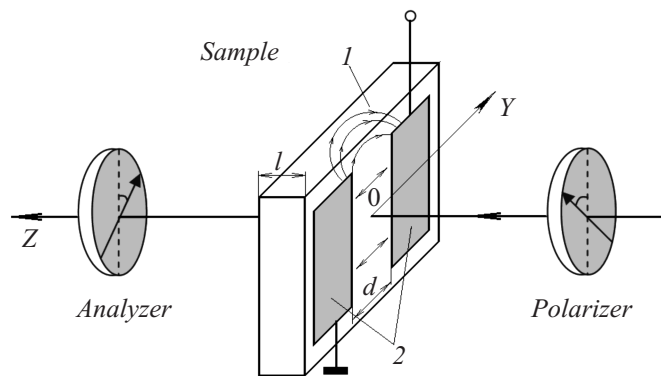


Рис. 1. Поляризационно-оптическая пропускающая схема исследования электрооптики прозрачных материалов.

используют эффект индуцированного двулучепреломления. По аналогии с названием эффекта двулучепреломления можно назвать отражение света от ЭО материалов эффектом двулучеотражения. Методика нашей работы основана на измерении изменения индуцированного двулучеотражения.

Коэффициент отражения света ρ , нормально падающего на границу раздела диэлектрической среды с показателем преломления n , определяется, согласно закону Френеля, следующим выражением:

$$\rho = \frac{I_\rho}{I_0} = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}, \quad (3)$$

где I_ρ — интенсивность отраженного света.

Изменение коэффициента отражения $\delta\rho$ ЭО сред под действием внешнего электрического поля для нормального падения света, учитывая (1) и (3), можно записать

$$\begin{aligned} \delta\rho_R &= \frac{\delta I_\rho}{I_0} = \frac{\partial\rho}{\partial n} \delta n_R = 2 \frac{n-1}{(n+1)^3} n^3 R_{\text{эф}} E^2, \\ \delta\rho_r &= \frac{\delta I_\rho}{I_0} = \frac{\partial\rho}{\partial n} \delta n_r = 2 \frac{n-1}{(n+1)^3} n^3 r_{\text{эф}} E, \end{aligned} \quad (4)$$

где n — показатель преломления, равный либо n_0 для обыкновенно поляризованной волны, либо n_e для необыкновенно поляризованной волны, определяемый ориентацией плоскости поляризации падающей волны, $R_{\text{эф}}$ и $r_{\text{эф}}$ — эффективный квадратичный и соответственно линейный ЭО коэффициент.

Изменение коэффициента отражения под действием переменного электрического поля $E = E_0 \sin(\omega t)$ ($\omega = 2\pi f$, f — частота) с амплитудой E_0 в неполяризованных сегнето-керамических средах можно записать

$$\begin{aligned} \delta\rho_R &= \frac{\delta I_\rho}{I_0} = 2 \frac{n-1}{(n+1)^3} n^3 R_{\text{эф}} E^2 = k R_{\text{эф}} E_0^2 \sin^2(\omega t) \\ &= \frac{k R_{\text{эф}} E_0^2}{2} (1 - \cos(2\omega t)), \end{aligned} \quad (5)$$

где $k = 2(n-1)\left(\frac{n}{n+1}\right)^3$.

Откуда из-за квадратичной зависимости амплитуд второй гармоники изменения коэффициента отражения (или изменения показателя преломления) от амплитуд поля можно определить эффективный квадратичный ЭО коэффициент.

На рис. 2 показана схема экспериментальной установки. Источником света служил полупроводниковый лазер с удвоением частоты излучения 3 (лазерный модуль DPSS: модель TD-GP (100 mW) с длиной волны излучения 532 nm). Мощность излучения основного пучка регулировалась при помощи поляризатора 4. Плоскость поляризации пучка для соответствия необыкновенному показателю преломления ориентировалась перпендикулярно полю в образце поляризатором 5. Пучок проходил через полупрозрачное зеркало 6 и по нормали падал на образец 1 в зазор между планарными электродами 2.

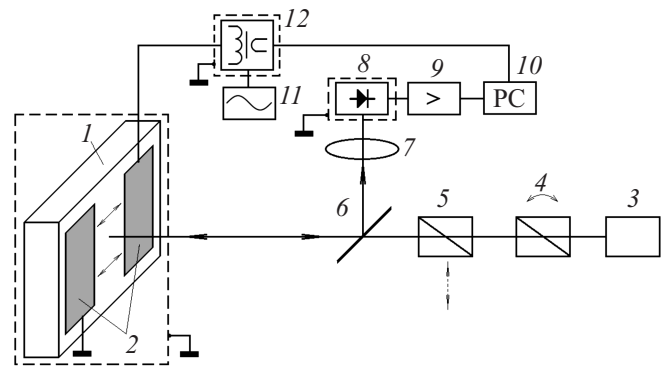


Рис. 2. Схема экспериментальной установки исследования электрооптики материалов по нормальному отражению поляризованного света.

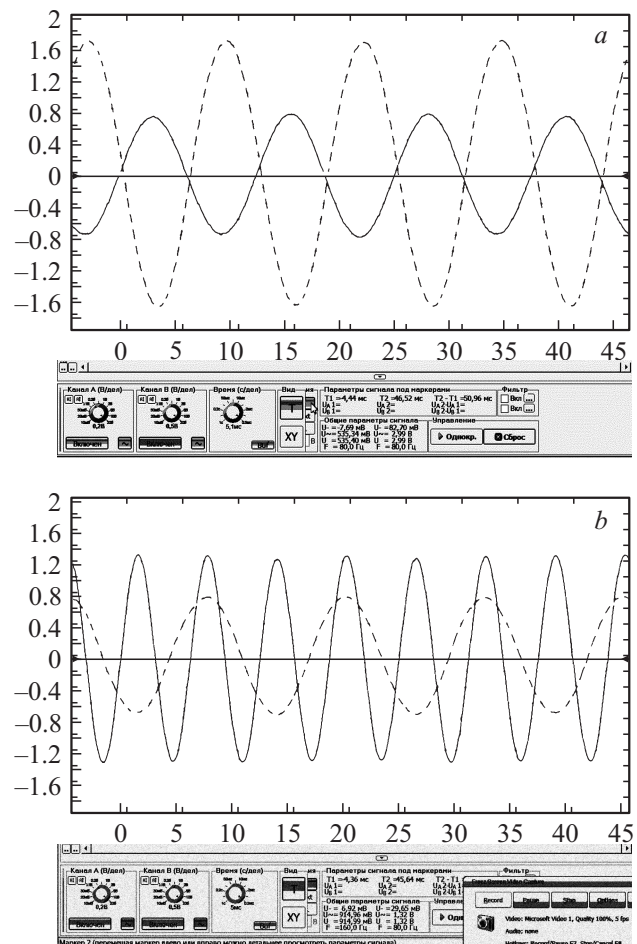


Рис. 3. Осциллограммы сигналов отраженной интенсивности света (сплошная кривая) и прикладываемого электрического поля (штриховая) в случае: *a* — линейного и *b* — квадратичного ЭО эффектов.

После отражения от поверхности образца 1 пучок отражался полупрозрачным зеркалом 6 и через собирающую рассеянный свет линзу 7 попадал на фоторегистрирующий датчик 8 (фотодиод с трансимпедансным усилите-

лем ОРТ101). Сигнал датчика подавался на селективный усилитель 9 (нановольтметр Унирап 233) и регистрировался двухканальным USB-осциллографом либо на второй гармонике в случае квадратичного ЭО эффекта, либо на первой гармонике — линейного ЭО эффекта (рис. 3). Регистрация и обработка данных осуществлялась PC компьютером 10. На планарные электроды 2 образца 1 подавалось высоковольтное переменное напряжение от трансформатора 12, первичная обмотка которого подключена к задающему генератору низкой частоты ($f = 80 \text{ Hz}$) 11. Высоковольтное напряжение V в процессе измерений плавно увеличивалось до 3.5 kV и затем плавно уменьшалось. Чтобы снизить влияние наводок, измерительная ячейка с образцом, фотодатчик и высоковольтный трансформатор тщательно экранировались.

ЦТСЛ и ЦТС сегнетокерамика в отсутствие электрического поля является изотропной средой, а поле вызывает анизотропию, проявляющуюся в эффекте наведенного двулучепреломления. В этих материалах под действием внешнего электрического поля происходит деформация усредненной оптической индикатрисы показателя преломления, и она становится эллипсоидом с оптической осью, направленной по полю.

Исследовались наиболее популярные составы ЦТСЛ керамики: $x/65/35$ ($x = 8, 9$ и 10) ЦТС-19. Прикладываемое электрическое поле создавалось планарными электродами на полированной поверхности образцов и соответствовало поперечной геометрии по отношению к направлению падающего и отраженного света. Измеряемый пучок отражался от центральной части между этими электродами. Максимальная напряженность электрического поля в этом месте на поверхности образца определяется размерами электродов и межэлектродного пространства d [6,7] и приближенно считалась равной $0.63V/d$. На рис. 3 показаны осциллограммы управляющего поля и изменений отраженной интенсивности в случае линейного (первая гармоника) и квадратичного (вторая гармоника) ЭО эффектов.

На рис. 4, *a-c* показаны зависимости индуцированного изменения показателя преломления в ЦТСЛ керамике составов 8/65/35, 9/65/35 и 10/65/35, рассчитанные на основании измеренных изменений коэффициента отражения света. На основании этих зависимостей были определены соответствующие эффективные электрооптические коэффициенты R_{eff} . Для ЦТСЛ керамики состава 8/65/35 $R_{\text{eff}} = 2.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{V}^2$, для керамики состава 9/65/35 $R_{\text{eff}} = 3.7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ и для керамики состава 10/65/35 $R_{\text{eff}} = 1.3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$. Полученные значения ЭО коэффициентов находятся в хорошем согласии с литературными данными [8,9].

С целью определения достоверности ЭО измерений с помощью отражательной методики проводилось сравнительное измерение значений ЭО коэффициента ЦТСЛ керамики состава 9/65/35, полученных новым отражательным методом (рис. 2) и обычной пропускающей ПОС методикой (рис. 1). В силу планарной геометрии электродов поперечная компонента электрического поля

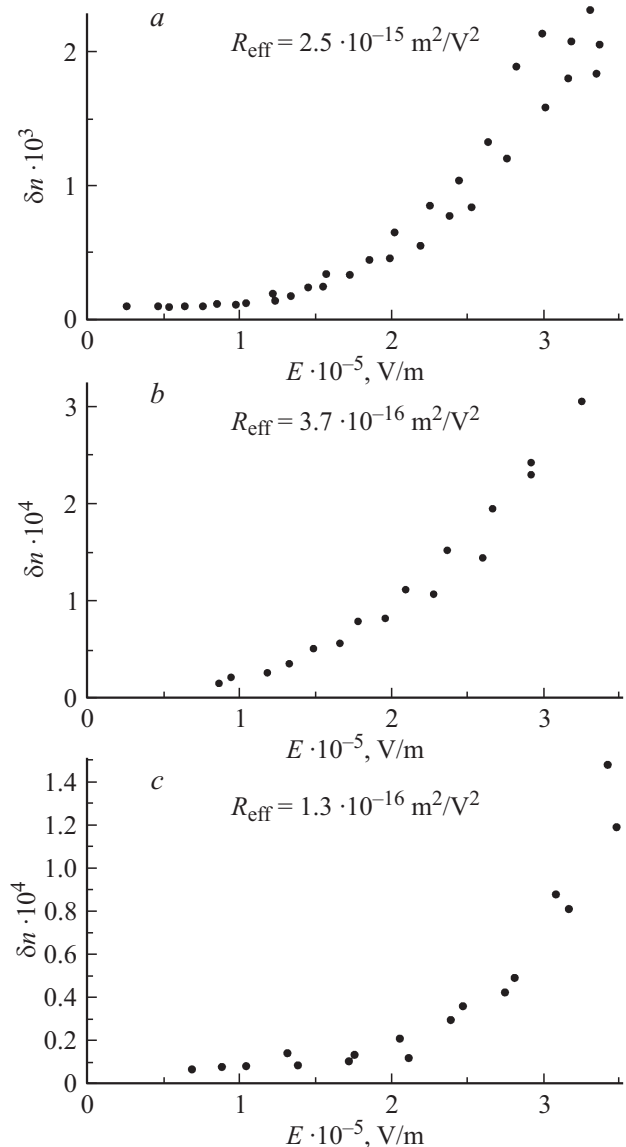


Рис. 4. Зависимости индуцированного изменения показателя преломления сегнетокерамики ЦТСЛ от величины электрического поля для составов: *a* — 8/65/35, *b* — 9/65/35 и *c* — 10/65/35.

E_y уменьшается по мере прохождения светового пучка через образец по оси Z и при достаточно широких электродах приближенно описывается формулой [6,7]

$$E_y(0, z) = \frac{2V}{\pi d} \left(1 + \frac{4z^2}{d^2} \right)^{-1/2}. \quad (6)$$

Тогда разность фазовых задержек Γ будет определяться как

$$\Gamma = \frac{\pi}{\lambda} n^3 R \int_0^l E_y^2 dy. \quad (7)$$

Из последнего выражения с учетом выражения (2) по измерениям изменений интенсивности ПОС определялся ЭО коэффициент: $R_{\text{eff}} = 4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$. Результаты

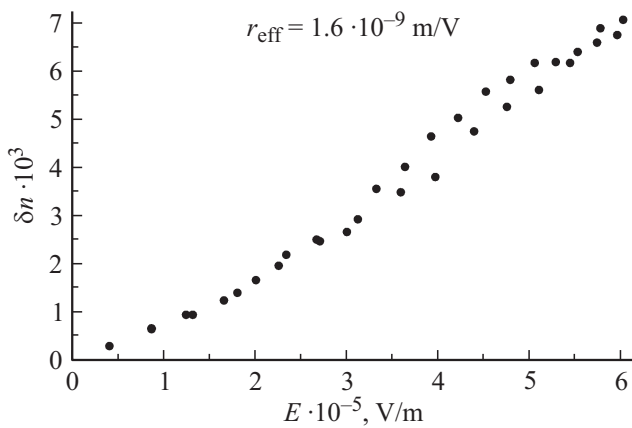


Рис. 5. Зависимость индуцированного изменения показателя преломления сегнетокерамики ЦТС-19 от величины электрического поля.

сравнительных измерений показали хорошее соответствие значений ЭО коэффициентов.

Необходимо отметить высокую чувствительность измерений электрооптики среды при помощи отражательной методики в случае слабых модуляций показателя преломления. В пропускающем методе ПОС регистрируемый сигнал, как видно из (2), пропорционален $(\delta n)^2$ (заметим $\delta n \ll 1$), тогда как в отражательном методе сигнал пропорционален δn (4).

Наиболее важным применением отражательной методики измерения электрооптики является исследование непрозрачных ЭО сред. Для демонстрации этого преимущества было проведено исследование ЭО коэффициента непрозрачной сегнетокерамики ЦТС-19. Коммерческие образцы керамики ЦТС-19 поляризуются в процессе изготовления, поэтому в отличие от ЦТСЛ керамики они обладали линейным ЭО эффектом.

На рис. 5 показана зависимость индуцированного изменения показателя преломления в ЦТС-19 керамике, рассчитанная по измеренным изменениям коэффициента отражения света. На основании этой зависимости был определен линейный электрооптический коэффициент $r = 1.6 \cdot 10^{-9}$ м/В. Это значение одного порядка с линейным ЭО коэффициентом для пленки ЦТСЛ керамики состава 7/30/70 ($r = 3.17 \cdot 10^{-9}$ м/В) [10].

Таким образом, в настоящей работе реализован метод оценки ЭО коэффициентов ЦТСЛ сегнетокерамики составов 8–10/65/35 и ЦТС-19 по измерению модуляции отраженного света под действием переменного электрического поля. Техническая реализация метода оказалась достаточно проста и не требовала использования сложной поляризационно-оптической интерференционной системы, которая применяется в обычных ЭО методиках. Данный отражательный метод может быть использован для экспрессоценки электрооптики поглощающих ЭО сред.

Список литературы

- [1] *Aillierie M., Théofanous N., Fontana M.D.* // Appl. Phys. B. 2000. Vol. 70. P. 317.
- [2] *Мустель Е.П., Парыгин В.Н.* Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970. 296 с.
- [3] *Сонин А.С., Василевская А.С.* Электрооптические кристаллы. М.: Атомиздат, 1971. 328 с.
- [4] *Князьков А.В.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. Т. 182. № 4–1. С. 100–104.
- [5] *Kniazkov A.V.* // Appl. Phys. B. 2015. Vol. 118. N 2. P. 231–234.
- [6] *Kaminov I.P., Stulz L.W., Turner E.H.* // Appl. Phys. Lett. 1975. Vol. 27. N 10. P. 555–557.
- [7] *Кондиленко И.И., Коротков П.А., Фелинский Г.С.* // Укр. физ. журн. 1979. Т. 24. № 9. С. 1270–1278.
- [8] *Камзина Л.С., Ruan W., Li G., Zeng J.* // ФТТ. 2012. Т. 54. Вып. 10. С. 1899–1904.
- [9] *Rouchon J.M., Micheron F.* // Czech. J. Phys. B. 1975. Vol. 25. P. 575–584.
- [10] *Lin J.-F., Jeng J.-S., Chen W.-R., Wu B.-H.* // Optik. 2012. Vol. 123. P. 276–279.