

УДК 53.082.53

А.В. Князьков

**ИЗМЕРЕНИЕ НАВЕДЕННОГО ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО МОДУЛЯЦИИ
КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА**

A.V. Kniazkov

St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

**THE MEASUREMENT OF THE INDUCED BIREFRINGENCE
OF ELECTROOPTIC MATERIALS THROUGH THE MODULATION
OF LIGHT REFLECTION COEFFICIENT**

В статье проводится анализ результатов измерения наведенного двулучепреломления электрооптических (ЭО) материалов по модуляции коэффициента отражения монохроматического, линейно поляризованного света, падающего на поверхность ЭО среды. Рассмотрены случаи нормального падения света и его падения в области угла Брюстера. Оценена чувствительность метода.

ИЗМЕРЕНИЕ НАВЕДЕННОГО ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ, ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СРЕДЫ, КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ.

The article analyzes the measurement results for electrooptic (EO) birefringence of materials by modulating the reflection coefficient of monochromatic light polarized linearly that incidents on the surface of the EO medium. The cases of the normal light incidence and those in the area of the Brewster angle were reviewed. The sensitivity of the method was evaluated.

MEASUREMENTS, INDUCED BIREFRINGENCE, ELECTROOPTIC MEDIUM, REFLECTION COEFFICIENT.

Измерение наведенного двулучепреломления электрооптических (ЭО) сред осуществляется методами, позволяющими определить разности фазовых задержек между обыкновенно и необыкновенно поляризованными световыми волнами, прошедшими ЭО среду в различных интерферометрических схемах (поляризационно-оптические схемы) [1 – 3]. Для поглощающих сред интенсивность прошедшей волны с измеряемой фазой может оказаться недостаточной для проведения достоверных измерений этой фазы. Световая волна, падающая на границу раздела сред, всегда испытывает отражение от последней. Коэффициент отражения R определяется показателем преломления n среды в соответствии с законами Френеля [1, 4, 5]. Наиболее простое

выражение для величины R получается для нормального падения волны, которое в случае отсутствия проводимости среды выглядит следующим образом:

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2. \quad (1)$$

Детальное рассмотрение методов рефрактометрии по отражению света проведено в работе [6]. В работе [7] теми же авторами предложен прецизионный метод измерения показателя преломления материалов по определению значения угла Брюстера при отражении света. Эти работы легли в основу разработки нового отражательного метода измерения наведенного двулучепреломления ЭО сред по модуляции коэффициента отражения.

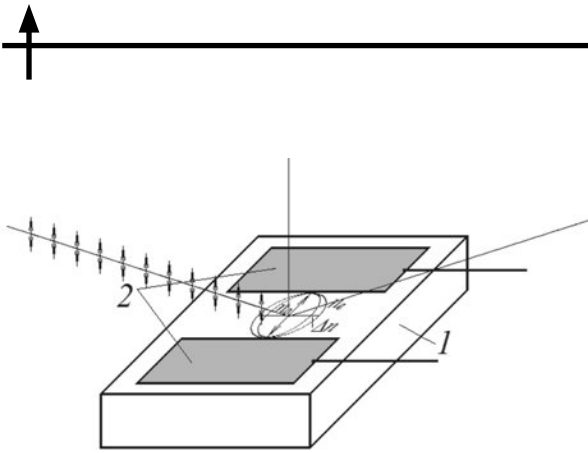


Рис. 1. Отражательная геометрия: образец ЭО среды 1 с планарными электродами 2. Показано сечение оптической индикатриссы показателя преломления в электрическом поле, создаваемом электродами

Для двулучепреломляющих сред значение показателя преломления среды зависит от ориентации поляризованной световой волны относительно оптической оси индикатриссы показателя преломления. Коэффициент отражения световой волны с поляризацией, параллельной оптической оси, определяется обычным показателем преломления n_o , а для ортогональной ориентации плоскости поляризации относительно оптической оси среды — необыкновенным показателем преломления n_e . Величина двулучепреломления Δn характеризуется максимальной разницей: $\Delta n = n_o - n_e$. Идея измерения величины Δn в пропускающей геометрии состоит в определении фазового набега между обычно и необыкновенно поляризованными волнами. Так и в отражательной геометрии: чтобы измерить Δn по разности коэффициентов отражения, необходимы две ортогонально поляризованные волны, падающие на среду, либо одна волна с круговой поляризацией.

В пропускающей геометрии электрическое поле, индуцирующее изменение двулучепреломления ЭО среды, создается в объеме при помощи электродов, расположенных на противоположных поверхностях образца, и направлено либо вдоль направления распространения волны (продольный ЭО эффект), либо поперек (поперечный ЭО эффект).

В предложенной нами отражательной геометрии наведенное двулучепреломление Δn ЭО образца 1 создается поперечным по-

лем при помощи планарных электродов 2 (рис. 1). Оптическая индикатрисса, описывающая наведенное двулучепреломление изотропного образца под действием поля в зазоре между электродами, будет иметь оптическую ось, ориентированную по создаваемому электрическому полю. Оценить чувствительность измерения наведенного двулучепреломления при нормальном падении света по модуляционному изменению интенсивности отраженной необыкновенной волны ΔI_e можно по первой производной коэффициента отражения $\partial R/\partial n$ выражения (1):

$$\frac{\partial R}{\partial n} = \frac{4(n-1)}{(n+1)^3}. \quad (2)$$

Изменение интенсивности ΔI_e отраженной необыкновенной волны от ЭО среды с показателем преломления 2,5 при изменении наведенного двулучепреломления $\Delta n = 10^{-3}$ вычисляется как

$$\Delta I_e = I_0(\partial R/\partial n)\Delta n = 1,4 \cdot 10^{-4} I_0,$$

где I_0 — интенсивность падающей волны.

Такое изменение отраженной интенсивности может быть достоверно зарегистрировано применением техники синхронного детектирования [8].

Имеется также другая разновидность отражательной методики измерения наведенного двулучепреломления: можно использовать наклонное падение волны, поляризованной в плоскости падения, в области углов падения вблизи угла Брюстера. Этот угол φ_* соответствует равенству коэффициентов отражения наклонного пучка и пучка при нормальном падении (рис. 2). Выражение для коэффициента отражения R_{\parallel} наклонной волны в случае отсутствия проводимости среды можно записать в следующем виде [5]:

$$R_{\parallel} = \left(\frac{n_e^2 \cos \varphi - \sqrt{n_e^2 - \sin^2 \varphi}}{n_e^2 \cos \varphi + \sqrt{n_e^2 - \sin^2 \varphi}} \right)^2. \quad (3)$$

Приравнивая формулу (1) выражению (3), найдем угол φ_* :

$$\varphi_* = \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{1 + n^2 + n^4}} \right). \quad (4)$$

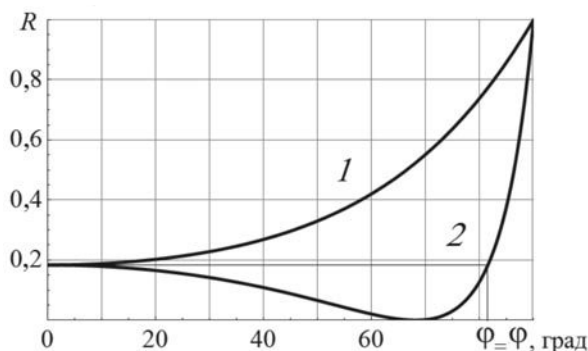


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения нормально поляризованной E_n (1) и поляризованной в плоскости падения E_p (2) световых волн от угла падения. Показатель преломления среды $n = 2,5$

Анализ разложения в ряд Тейлора по малому параметру Δn выражений (1) и (3) показывает, что величина изменения коэффициента отражения волны из-за наведенного изменения необыкновенного показателя преломления при нормальном падении и при угле φ_* для волны, поляризованной ортогонально наведенной оптической оси, ведет себя одинаковым образом (рис. 3).

Мы предлагаем реализовать новую отражательную методику измерений наведенного показателя преломления: по модуляции необыкновенного показателя преломления. Измерения можно осуществлять в двух вариантах падения света: нормальном и наклонном.

Схемы экспериментальных установок для исследования наведенного двулучепреломления по отражению света при околонормальном и наклонном падениях показаны на рис. 4. Источником света служил полупроводниковый лазер 3, излучение которого расщеплялось призмой Номарского 4а на два ортогонально поляризованных пучка равной интенсивности (вместо призмы Номарского можно использовать четвертьволновую пластинку, которая дает один пучок круговой поляризации). Далее эти пучки почти нормально падали на образец 1 в зазор между планарными электродами 2 и отражались, попадая на призму Волластона 5а, где ортогонально поляризованные пучки разделялись и попадали на фоторегистриру-

ющие датчики 6. Разность сигналов с этих датчиков усиливается операционным усилителем 7 и подается на селективный регистрирующий синхронный усилитель 8. На планарные электроды 2 образца 1 подавалось высоковольтное напряжение, которое формировалось специальным усилителем 10 от задающего генератора низкой частоты 9.

Однолучевая схема экспериментальной установки исследования наведенного двулучепреломления по отражению света при наклонном угле падения показана на рис. 4, б. Она отличается от схемы на рис. 4, а тем, что вместо призмы Номарского 4а используется обычный поляризатор 4б, настроенный на поляризацию в плоскости падения света, а вместо призмы Волластона 5а используется обычный анализатор 5б, вырезающий поляризацию плоскости падения света.

Экспериментальное подтверждение отражательной методики исследования наведенного двулучепреломления ЭО материалов выполнялось по схеме, представленной на рис. 4, б при наклонном угле падения, равном φ_* , на образцах ЦТСЛ сегнетомягкой прозрачной керамики состава 9/65/35 с планарными электродами, зазор между которыми составлял 3 мм. Источниками 1 служили лазерные модули DPSS: модель TD-GP (100 мВт) и модель 303 с длинами волн излучения 532 нм (зеленые указки). В качестве фотодатчика 6 использовался

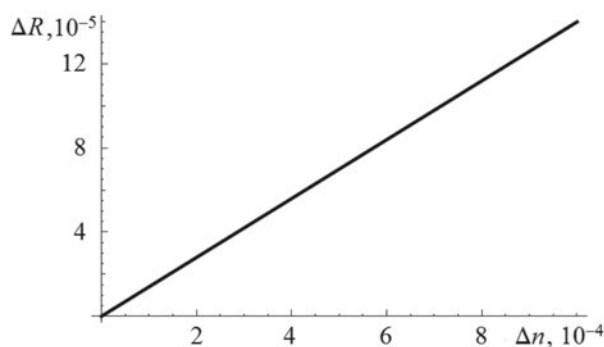


Рис. 3. Зависимость разности коэффициентов отражения световых волн E_n , нормально падающих, и E_p , падающих под углом φ_* от наведенного двулучепреломления. Показатель преломления среды $n = 2,5$

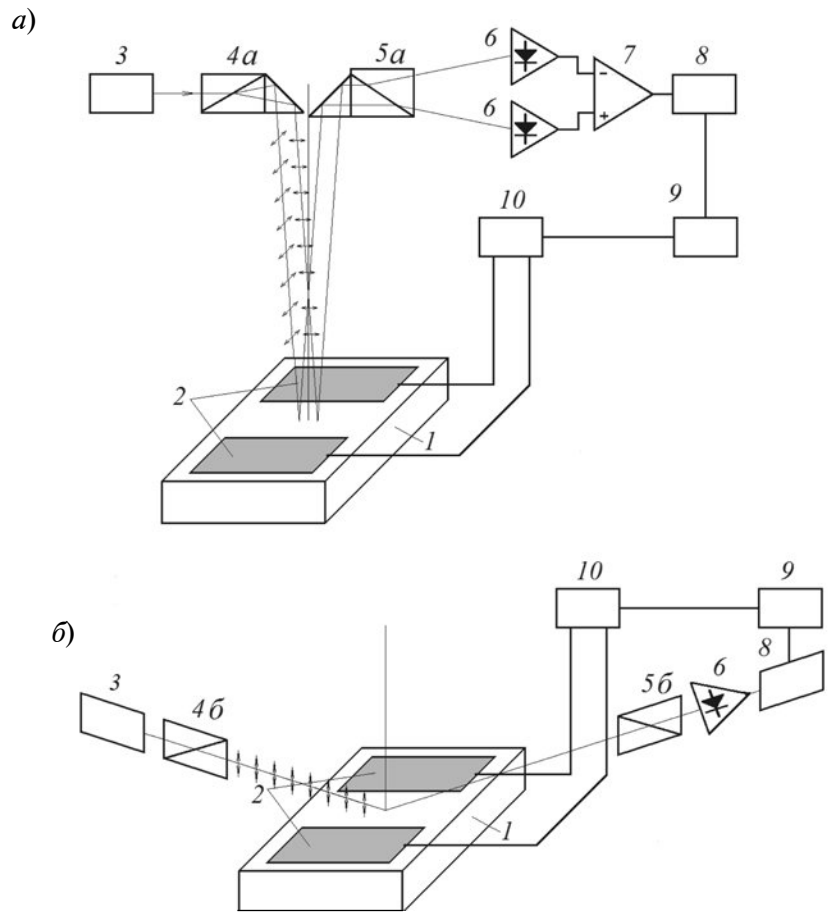


Рис. 4. Схемы экспериментальных установок для исследования наведенного двулучепреломления по нормальному (а) и наклонному (б) отражению поляризованного света:
 1 – образец ЭО материала с планарными электродами 2; 3 – лазерный источник света;
 4а – призма Номарского (или четвертьволновая пластинка); 4б – поляризатор; 5а – призма Волластона;
 5б – анализатор; 6 – фотодатчики; 7 – операционный усилитель; 8 – регистрирующий селективный синхронный усилитель; 9 – задающий низкочастотный генератор; 10 – высоковольтный усилитель (формирователь специального сигнала)

фотодиод с трансимпедансным усилителем ОРТ101. Регистрация производилась селективным нановольтметром Упiран 233. На планарные электроды образца подавалось высоковольтное синусоидальное напряжение частотой 80 Гц с амплитудой до 3,5 кВ, формируемое специальным усилителем 10. В силу квадратичного ЭО эффекта в изотропной ЦТСЛ-керамике сигнал ЭО модуляции коэффициента отражения регистрировался на второй гармонике оптического сигнала.

Исследование модуляции коэффициента отражения из-за индуцированного двулучепреломления проводилось при разных интенсивностях падающего света. На рис. 5

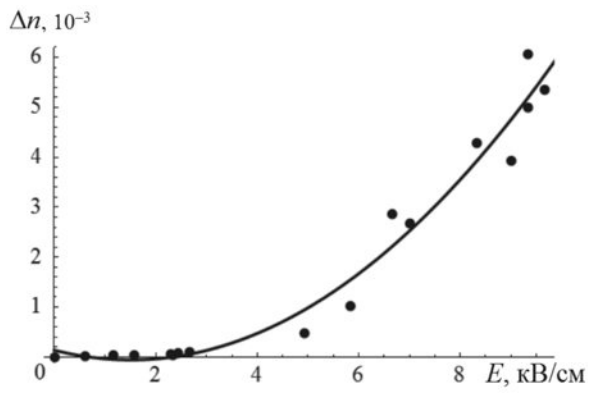


Рис. 5. Экспериментальная зависимость изменения двулучепреломления ЦТСЛ-керамики от величины электрического поля между планарными электродами

показана типичная экспериментальная зависимость изменения индуцированного двулучепреломления ЦТСЛ-керамики при наклонном падении света под углом, равным φ_{\pm} , от поля, создаваемого между планарными электродами на отражающей поверхности.

Таким образом, в настоящей работе впервые проанализирована и экспериментально показана возможность измерения наведенного электрическим полем двулучепреломления по изменению отражения света от ЭО материалов, вызванного модуляцией показателя преломления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
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. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1980. 752 с.
5. Кизель В.А. Отражение света. М.: Наука, 1973. 352 с.
6. Тихонов Е.А., Ивашкин В.А., Лямец А.К.

Рефрактометрия по отражению света при квазинормальном падении и под углом Брюстера // Журнал прикладной спектроскопии. 2012. Т. 79. № 1. С. 160–167.

7. Тихонов Е.А., Лямец А.К. Прецизионные лазерные измерения показателя преломления материалов по углу Брюстера // Сб. докладов 23-й Международной конф. «Лазеры. Измерения. Информация». СПб.: Изд-во. Политехн. ун-та, 2013. Т. 1. С. 135.

8. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983. Т. 2. 256 с.

REFERENCES

1. Born M., Vol'f E. Osnovy optiki. Moscow, Nauka, 1973. 720 p. (rus)
2. Mustel' E.P., Parygin V.N. Metody moduliatsii i skanirovaniia sveta. Moscow, Nauka, 1970. 296 p. (rus)
3. Sonin A.S., Vasilevskaia A.S. Elektroopticheskie kristally. Moscow, Atomizdat, 1971. 328 p. (rus)
4. Sivukhin D.V. Obshchii kurs fiziki. Optika. Moscow, Nauka, 1980. 752 p. (rus)
5. Kizel' V.A. Otrazhenie sveta. Moscow, Nauka, 1973. 352 p. (rus)
6. Tikhonov E.A., Ivashkin V.A., Liamets A.K. Refraktometriia po otrazheniiu sveta pri

kvazinormal'nom padenii i pod uglom Briustera. Zhurnal prikladnoi spektroskopii. 2012, Vol. 79, No. 1, pp. 160–167. (rus)

7. Tikhonov E.A., Liamets A.K. Pretsizionnye lazernye izmereniia pokazatel'ia prelomleniia materialov po uglu Briustera. Sb. dokladov 23-i Mezhdunarodnoi konf. «Lazery. Izmereniia. Informatsiia». St. Petersburg, Polytechnical University Publishing House, 2013. Vol. 1. P. 135. (rus)

8. Maks Zh. Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniiax. Moscow, Mir, 1983, Vol. 2, 256 p. (rus)

КНЯЗЬКОВ Анатолий Викторович – доктор физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
akniazkov@mail.ru