

Исследование преломляющих свойств кристалла ниобата лития LiNbO_3 под действием внешнего электрического поля

Маслов Артём

Казаков Данила

Б01-104

13.05.2023

Аннотация

В работе исследуется эффект Поккельса в кристалле ниобата лития. По интерференционной картине рассеянного света определяется двулучепреломление кристалла $n_o - n_e$. Полюсовольное напряжение для данного образца определяется двумя способами. Первым способ – по наблюдению периодических изменений интенсивности света на экране при увеличении постоянного напряжения на кристалле. Вторым способ – при подключении кристалла к источнику переменного напряжения, и наблюдению фигур Лиссажу при подключении первого входа осциллографа к источнику переменного напряжения, а второго к выходу фотодиода. По результатам измерений определяется коэффициент пропорциональности между внешним электрическим полем, приложенным к кристаллу, и разностью коэффициентов преломления.

Теория

Эффектом Поккельса называется изменение показателя преломления света в кристалле под действием электрического поля, причём это изменение пропорционально напряжённости электрического поля. Вследствие эффекта Поккельса в кристалле ниобата лития одноосный кристалл становится двуосным.

Изменение показателя преломления кристаллов под действием внешнего электрического поля происходит за счёт анизотропных свойств кристаллов. Под действием постоянного электрического поля электроны смещаются в сторону того или иного иона (в случае кристалла ниобата лития LiNbO_3 — это ион Li или Nb), при этом меняется поляризуемость среды и связанный с ней показатель преломления. Эффект Поккельса может наблюдаться только в кристаллах, не обладающих центром симметрии. Кристалл можно поместить между двумя скрещенными поляроидами таким образом, что в отсутствие внешнего электрического поля пропускание света системой будет равно нулю. При подаче на кристалл внешнего поля появится наведённое двулучепреломление, которое изменит поляризацию прошедшего через кристалл света, и такая система начнёт пропускать свет.

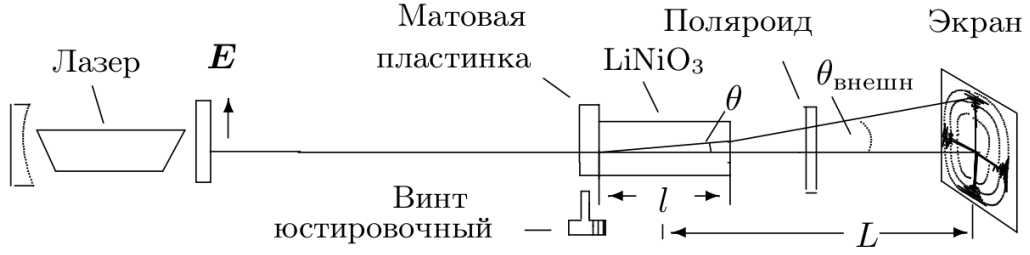


Рис. 1: Схема наблюдения эффекта Поккельса

Рассмотрим сначала кристалл в отсутствие внешнего электрического поля. Кристалл ниобата лития является одноосным кристаллом, то есть кристаллом, оптические свойства которого обладают симметрией вращения относительно некоторого одного направления, называемого оптической осью z кристалла.

Для световой волны, вектор электрического поля \mathbf{E} которой перпендикулярен оси z , показатель преломления равен $n_o = \sqrt{\varepsilon_{\perp}}$, а для волны, вектор \mathbf{E} которой располагается вдоль оси z , он равен $n_e = \sqrt{\varepsilon_{\parallel}}$, причём $n_e < n_o$.

Если луч света распространяется под углом θ к оптической оси z , то существуют два собственных значения показателя преломления n_1 и n_2 . Если световой вектор перпендикулярен плоскости $(\mathbf{k}, \mathbf{e}_z)$, то для обыкновенной волны $n_1 = n_o$. Если световой вектор лежит в плоскости $(\mathbf{k}, \mathbf{e}_z)$, то для необыкновенной волны n_2 зависит от угла θ и определяется формулой:

$$\frac{1}{n_2^2} = \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2}$$

Если перед кристаллом, помещённым между скрещенными поляроидами, расположить матовую пластинку, после которой лучи будут рассеиваться под различными углами, то на экране, расположенном за поляроидом, будут наблюдаться тёмные концентрические окружности (коноскопическая картина) – результат интерференции обыкновенной и необыкновенной волн.

Разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами, приобретаемая при прохождении через кристалл длиной l , равна

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l \cdot (n_1 - n_2)$$

Считая, что $n_o - n_e \ll 1$, а углы малые $\theta \ll 1$, получаем

$$n_2 \approx n_o - (n_o - n_e)\theta^2$$

Итоговая формула для набег фазы:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} l (n_o - n_e) \theta^2$$

Направлениями постоянной разности фаз служат конусы $\theta = \text{const}$, поэтому интерференционная картина представляет собой концентрические окружности. Интерференционные кольца

перекрываются тёмным крестом, который выделяет области, где интерференция отсутствует. В этих направлениях распространяется только одна поляризованная волна. При повороте анализатора на 90° картина меняется с позитива на негатив.

Для случая, когда разрешённое направление анализатора перпендикулярно поляризации лазерного излучения определим радиус тёмного кольца с номером m . Для луча, идущего вдоль оси z , показатели преломления для двух волн совпадают, сдвиг фаз между ними равен нулю, поляризация излучения на выходе остаётся такой же, как на входе, и луч не проходит через анализатор. Картина не изменится при сдвиге фаз между обыкновенной и необыкновенной волной, кратном 2π . $\Delta\varphi = 2\pi m$. Пусть L – расстояние от центра кристалла до экрана. По закону Снеллиуса, на границе кристалла луч света преломляется и $\theta_{\text{внеш}} = n_0\theta$. Радиус тёмных колец определяется по формуле:

$$r_m^2 = \frac{\lambda}{l} \frac{(n_o L)^2}{(n_o - n_e)} m$$

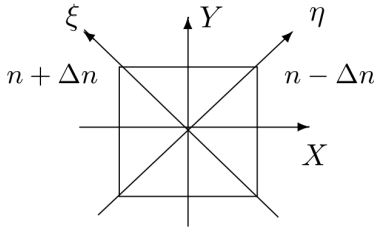


Рис. 2: Главные направления в кристалле во внешнем электрическом поле

Если поместить кристалл во внешнее электрическое поле, то из-за симметрии кристалла и его электрических свойств в плоскости xu появляются главные направления ξ и η с показателями преломления $n_o - \Delta n$ и $n_o + \Delta n$. Изменение показателя преломления линейно связано со значением внешнего электрического поля $\Delta n = A \cdot E_{\text{эл}}$.

После прохождения кристалла между обыкновенной и необыкновенной волнами появляется разность фаз:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{l}{d} AU$$

где $U = E_{\text{эл}}d$ – напряжение на кристалле, d – размер кристалла в поперечном направлении.

Результирующее поле после анализатора определяется выражением:

$$E_{\text{вых}} = E_0 e^{i(\omega t - kl)} \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$

Интенсивность света на экране определяется по формуле:

$$I_{\text{вых}} = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\frac{\lambda}{2}}}\right)$$

где $U_{\frac{\lambda}{2}} = \frac{\lambda}{4A} \frac{d}{l}$ – полуволновое напряжение.

Если разрешённые направления пропускания лазера и анализатора будут параллельны, то интенсивность будет определяться по формуле:

$$I_{\text{вых}} = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\frac{\lambda}{2}}}\right)$$

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке:

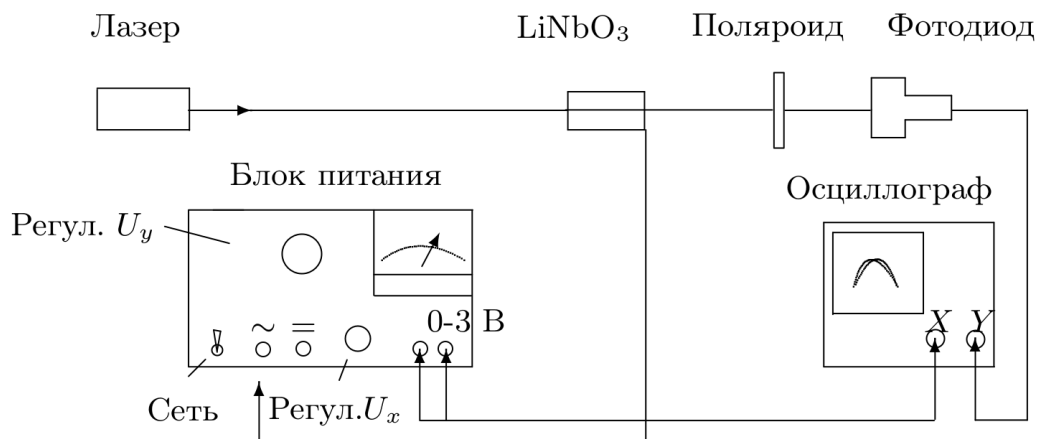


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

Луч света от лазера со встроенным вертикальным поляризатором попадает на кювету с кристаллом необата лития. Перед кюветой можно разместить матовую рассеивающую пластинку. Главная оптическая ось кристалла ориентирована вдоль направления распространения луча. После кюветы расположен поляроид. Результат интерференции наблюдается на экране. На кристалл можно подавать высоковольтное постоянное и переменное напряжение с помощью источника напряжения. Если подавать на кристалл переменное напряжение, то для исследования результата интерференции используется фотодиод, выход которого подключается к одному каналу осциллографа. Ко второму входу осциллографа подключается сигнал с источника напряжения.

Оборудование

1. Гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 630$ нм.
2. Поляризатор. Для $\lambda = 630$ нм показатель преломления для обыкновенной волны равен $n_o = 2,29$.
3. Кристалл ниобата лития LiNbO_3 . Образец имеет форму прямоугольного параллелепипеда, размеры которого $3 \times 3 \times 26$ мм. Оптическая ось кристалла параллельна большей стороне $l = 26$ мм.
4. Матовая рассеивающая пластинка.
5. Экран.
6. Источник высоковольтного переменного и постоянного напряжения. Цена деления шкалы прибора $1\text{дел} = 15$ В.
7. Фотодиод.
8. Осциллограф GW Instek GOS-620.
9. Метровая линейка.

Результаты измерений

Установим кювету с кристаллом на расстоянии $L = 80,0 \pm 0,5$ см. Осветим кристалл лазером через матовую пластину, получим на экране интерференционную картину. Лазерный свет поляризован в вертикальной плоскости.

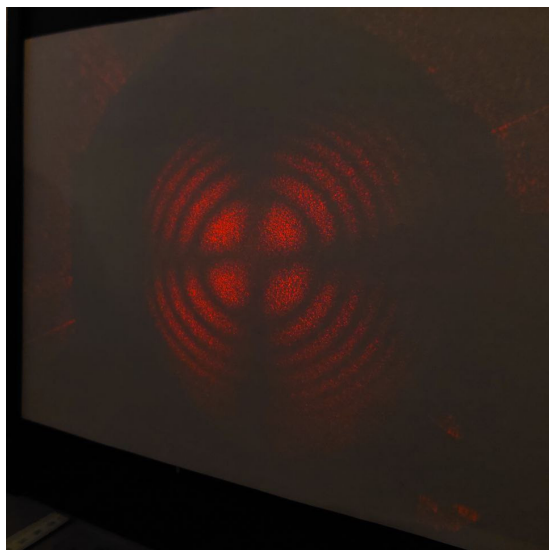


Рис. 4: Разрешённое направление анализатора горизонтально.

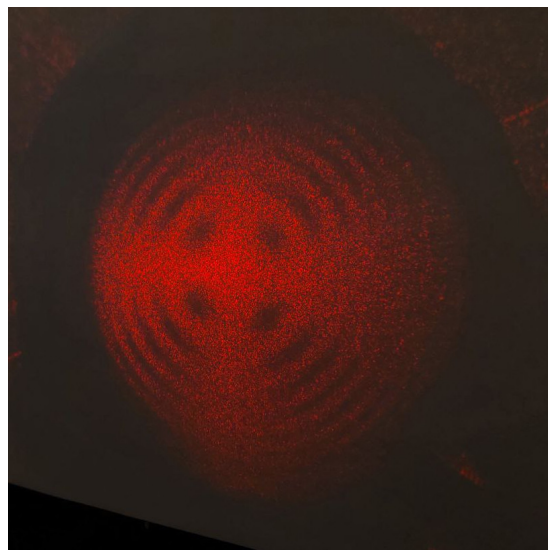


Рис. 5: Разрешённое направление анализатора вертикально.

Измерим радиусы тёмных колец r_m .

N	1	2	3	4	5	6
r_m , мм	27,5	39,5	49,5	56,5	63,5	70,5

Построим график зависимости квадрата радиуса тёмного кольца от его порядкового номера $r^2(m)$.

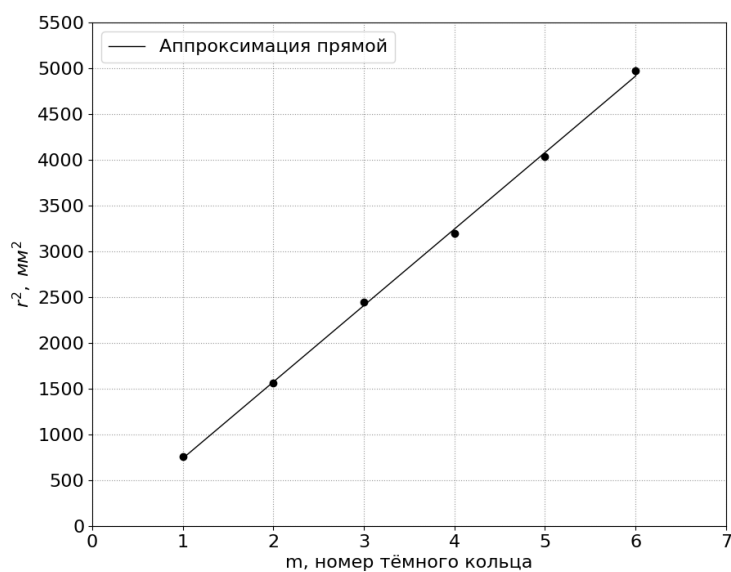


Рис. 6: График зависимости $r^2(m)$

Аппроксимируем зависимость прямой $y = ax + b$, по углу наклона определим двулуче-

преломление $n_o - n_e$.

$$a = 835 \pm 12 \text{ мм}^2$$

$$b = -95 \pm 47 \text{ мм}^2$$

$$n_o - n_e = \frac{\lambda}{l} \frac{(n_o L)^2}{a} = 0,097 \pm 0,002$$

Относительную ошибку косвенных измерений оценим по формуле $\varepsilon = \sqrt{4 \cdot \varepsilon_L^2 + \varepsilon_a^2} = 2\%$.

Определим полуволновое напряжение кристалла ниобата лития. Разрешённое направление анализатора перпендикулярно направлению поляризации лазерного излучения.

$$U_0 = 0 \text{ В (мин).}$$

$$U_{\frac{\lambda}{2}} = 270 \pm 8 \text{ В (макс).}$$

$$U_{\lambda} = 630 \pm 8 \text{ В (мин).}$$

$$U_{\frac{3\lambda}{2}} = 1020 \pm 8 \text{ В (макс).}$$

$$U_{2\lambda} = 1380 \pm 8 \text{ В (мин).}$$

Разрешённое направление анализатора параллельно направлению поляризации лазерного излучения.

$$U_0 = 0 \text{ В (макс).}$$

$$U_{\frac{\lambda}{2}} = 240 \pm 8 \text{ В (мин).}$$

$$U_{\lambda} = 630 \pm 8 \text{ В (макс).}$$

$$U_{\frac{3\lambda}{2}} = 1110 \pm 8 \text{ В (мин).}$$

Для определения полуволнового напряжения построим графики зависимостей $U(n\frac{\lambda}{2})$. Так как наблюдаемая на экране интенсивность является периодической функцией от напряжения:

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\frac{\lambda}{2}}} \right) \text{ для скрещённых направлений поляроидов}$$

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\frac{\lambda}{2}}} \right) \text{ для параллельных направлений поляроидов.}$$

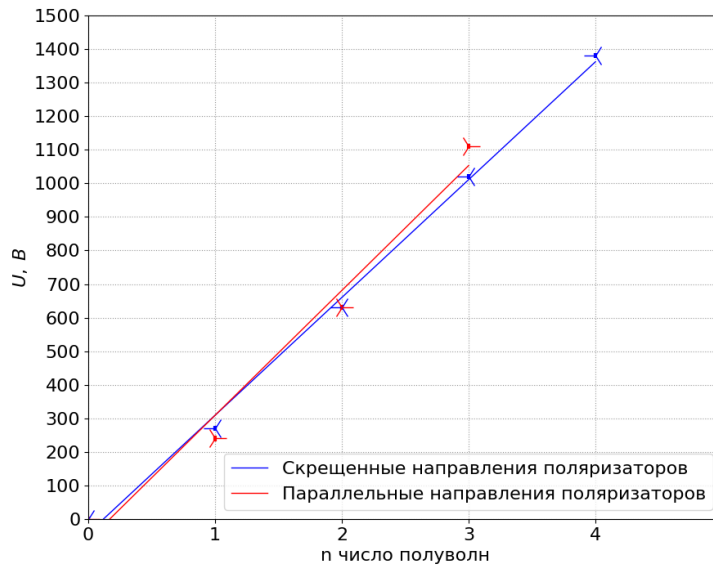


Рис. 7: График зависимости $U(n\frac{\lambda}{2})$

Аппроксимируем зависимости прямыми вида $y = ax + b$:

Скрещённые направления поляроидов:

$$a = 351 \pm 12 \text{ В}$$

$$b = -42 \pm 30 \text{ В}$$

Параллельных направлений поляроидов:

$$a = 372 \pm 38 \text{ В}$$

$$b = -63 \pm 71 \text{ В}$$

За итоговое значение полуволнового напряжения выберем значение a для серии измерений со скрещенными поляроидами, так как в этой серии больше экспериментальных точек.

Итоговое полуволновое напряжение $U_{\frac{\lambda}{2}} = 351 \pm 12 \text{ В}$.

Подадим на кристалл четверть волновое напряжение $U_{\frac{\lambda}{4}} = 150 \pm 8 \text{ В}$. Поляризация на выходе кристалла почти круговая, так как при вращении поляроида интенсивность света на экране почти не меняется, хотя небольшие изменения заметны. Варьируя напряжение, было экспериментально установлено, что при данном напряжении изменения интенсивности минимальны. $U_{\frac{\lambda}{4}}^{\text{рассчётное}} = \frac{1}{2}U_{\frac{\lambda}{2}} = 175 \pm 6 \text{ В}$.

Заменим экран фотодиодом и подадим на пластинку переменное напряжение. На один вход осциллографа подадим напряжение источника, на другой сигнал с фотодиода. По фигурам Лиссажу определим полуволновое напряжение пластинки.

$$U_{\frac{\lambda}{2}} = 390 \pm 8 \text{ В}.$$

Определим коэффициент пропорциональности A : $\Delta n = A \cdot E_{\text{эл}}$.

$$A = \frac{\lambda d}{4U_{\frac{\lambda}{2}} l}$$

Для $U = 351 \pm 12 \text{ В}$ коэффициент равен $A = (52 \pm 2) \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}}{\text{В}}$

Для $U = 390 \pm 8 \text{ В}$ коэффициент равен $A = (47 \pm 1) \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}}{\text{В}}$

Обсуждение результатов и выводы

В работе наблюдалась интерференционная картина обыкновенной и необыкновенных волн, образовавшихся после прохождения кристалла ниобата лития монохроматического поляризованного лазерного излучения.

В работе было измерено двулучепреломление кристалла в отсутствии внешнего электрического поля:

$$n_o - n_e = 0,097 \pm 0,002.$$

Согласно справочнику для длины волны $\lambda = 632,8$ нм кристалл ниобата лития имеет показатели преломления $n_o = 2,286$, $n_e = 2,203$. Тогда двулучепреломление:

$$(n_o - n_e)^{\text{табл}} = 0,083.$$

В работе было определено полуволновое напряжение образца кристалла ниобата лития и коэффициент пропорциональности изменения показателя преломления пластинки от внешнего электрического поля A , $\Delta n = AE_{\text{эл}}$:

$U_{\frac{\lambda}{2}} = 351 \pm 12$ методом наблюдения периодических изменений интенсивности света на экране при постоянном внешнем электрическом поле внутри пластинки. $A = (52 \pm 2) \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}}{\text{В}}$.

$U_{\frac{\lambda}{2}} = 390 \pm 8$ методом наблюдения фигур Лиссажу при переменном электрическом поле внутри пластинки. $A = (47 \pm 1) \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}}{\text{В}}$.