

Лабораторная работа 4.7.2 ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА

Аксенова Светлана

29 апреля 2021 г.

Цель работы: исследовать интерференцию рассеянного света, прошедшего кристалл; наблюдать изменение характера поляризации света при наложении на кристалл электрического поля.

В работе используются: гелий-неоновый лазер, поляризатор, кристалл ниобата лития, матовая пластинка, экран, источник высоковольтного переменного и постоянного напряжения, фотодиод, осциллограф, линейка.

1 Теоретическое введение

Эффект Поккельса - это изменение показателя преломления света в кристалле под действием электрического поля, причём это изменение пропорционально напряжённости электрического поля. Вследствие эффекта Поккельса в кристалле либо появляется двойное лучепреломление, либо меняется его величина (если кристалл был двулучепреломляющим в отсутствие поля), либо, как в данной работе, одноосный кристалл становится двуосным.

Изменение показателя преломления кристаллов под действием внешнего электрического поля происходит исключительно 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. В первом приближении это изменение линейно относительно внешнего электрического поля. Эффект Поккельса может наблюдаться только в кристаллах, не обладающих центром симметрии. Вследствие линейности эффекта относительно внешнего поля $E_{\text{эл}}$ при изменении направления поля на противоположное должен меняться на противоположный и знак изменения показателя преломления Δn . Но в кристаллах с центром симметрии это невозможно, так как оба взаимно противоположных направления внешнего поля физически эквивалентны. 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.

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 . 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 $n_e < n_o$, т.е. ниобат лития - «отрицательный кристалл».

В общем случае, когда луч света распространяется под углом θ к оптической оси z (рис. 1), существуют два собственных значения показателя преломления n_1 и n_2 : в обыкновенной волне $n_1 = n_o$, а в необыкновенной показатель преломления n_2 зависит от угла θ :

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

Если перед кристаллом, помещённым между скрещенными поляроидами (рис. 1), расположить линзу или матовую пластинку, после которых лучи будут рассеиваться под различными углами, то на экране, расположенном за поляроидом, мы увидим тёмные концентрические окружности (коноскопическую картину) - результат интерференции обыкновенной и необыкновенной волн, точнее, проекцию их электрических полей на разрешённые направления второго поляроида. В эксперименте используется лазер, излучение которого поляризовано, поэтому входной поляроид можно не ставить.

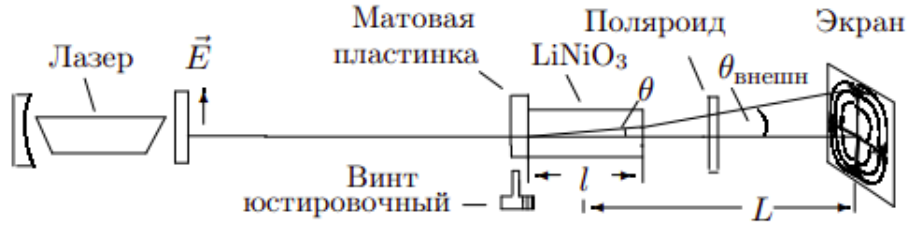


Рисунок 1 – Схема для наблюдения интерференционной картины

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

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} l(n_1 - n_2). \quad (2)$$

Для обыкновенного луча $n_1 = n_o$ и не зависит от угла θ между направлением луча и осью z . Для необыкновенного луча n_2 зависит от угла θ и определяется уравнение (1). Считая, что n_e и n_o отличаются незначительно, для малых углов ($\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1 - \theta^2/2$) получаем

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

Таким образом,

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} l(n_o - n_e)\theta^2. \quad (3)$$

Направлениями постоянной разности фаз служат конусы $\theta = \text{const}$, поэтому интерференционная картина представляет собой концентрические окружности (рис. 2). Интерференционные кольца перерезаны тёмным «мальтийским крестом», который выделяет области, где интерференция отсутствует. При повороте второго поляриоида на 90° картина меняется с позитива на негатив (рис. 3).

Радиус тёмного кольца с номером m для скрещенной поляризации лазерного излучения:

$$r_m^2 = \frac{\lambda}{l} \frac{(n_o L)^2}{(n_o - n_e)} m, \quad (4)$$

где L - расстояние от центра кристалла до экрана.

Представим теперь, что мы поместили кристалл в постоянное электрическое поле $E_{\text{эл}}$, направленное вдоль оси x , перпендикулярной оптической оси кристалла z . В результате линейного электрооптического эффекта Поккельса в плоскости (xy) возникают два главных направления ξ и η под углами 45° к осям x и y (рис. 4) с показателями преломления $(n_o - \Delta n)$ и $(n_o + \Delta n)$, т.е. появляются медленная и быстрая оси, причём $\Delta n = A E_{\text{эл}}$ (A - некоторая константа, зависящая только от типа кристалла).

Пусть свет на входе в кристалл поляризован вертикально, а на выходе стоит анализатор, пропускающий горизонтальную поляризацию. Выражение для интенсивности света на выходе после анализатора

$$I_{\text{вых}} = I_0^2 \sin^2 \frac{\Delta\phi^2}{2} = I_0 \sin^2 \frac{\pi U}{2U_{\lambda/2}}, \quad (5)$$

где $\Delta\phi$ - разность фаз между векторами E_ξ и E_η , $U = E_{\text{эл}} d$ - напряжение на кристалле (d - размер кристалла в поперечном направлении), $U_{\lambda/2} = \frac{\lambda d}{4A}$ - полуволновое напряжение (при $U = U_{\lambda/2}$ сдвиг фаз между двумя волнами равен π и интенсивность света достигает максимума).

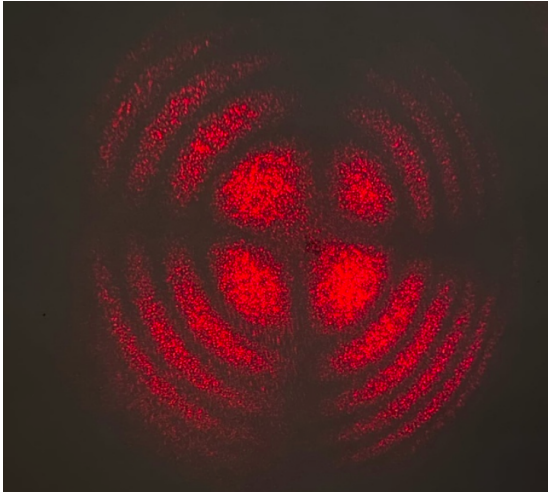


Рисунок 2 – Коноскопическая картина

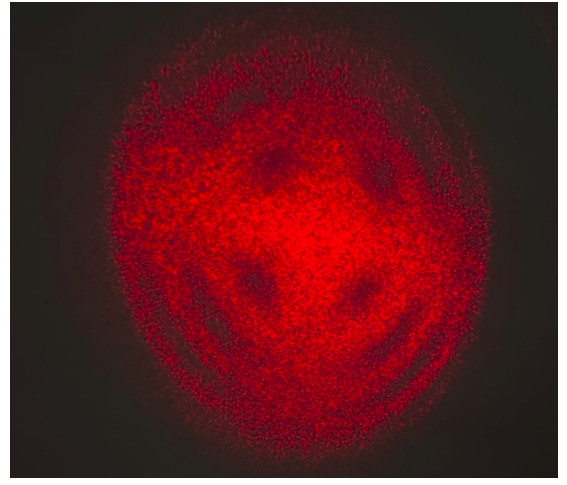


Рисунок 3 – Коноскопическая картина при повороте анализатора на 90°

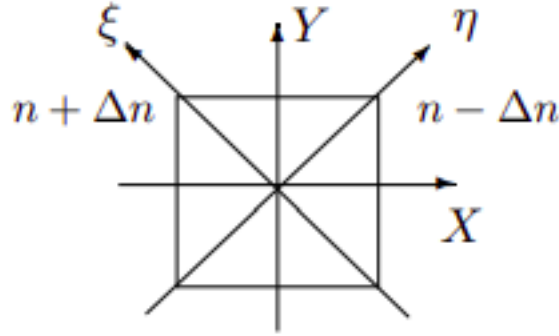


Рисунок 4 – Появление новых главных направлений при наложении электрического поля

2 Экспериментальная часть

После юстировки системы, изображённой на рис. 1, была получена интерференционная картина (рис. 2), по которой была измерена зависимость радиуса колец r от номера кольца m . График зависимости $r^2 = f(m)$ представлен на рис. 5. Коэффициент наклона графика был рассчитан по методу χ^2 . Из формулы (4) было получено значение $n_o - n_e$ для ниобата лития

$$n_o - n_e = 0,102 \pm 0,004.$$

Далее было изучено двойное лучепреломление в электрическом поле (рис. 6). В постоянном электрическом поле с увеличением напряжения на кристалле яркость пятна на экране увеличивается и достигает максимума при $U = U_{\lambda/2}$, минимума при $U = 2U_{\lambda/2} = 2U_\lambda$. Для перпендикулярной поляризации лазера и анализатора

$$U_{\lambda/2\perp} = 480 \pm 10 \text{ В}, U_{\lambda\perp} = 750 \pm 10 \text{ В}.$$

Для параллельной поляризации

$$U_{\lambda/2\parallel} = 620 \pm 10 \text{ В}, U_{\lambda\parallel} = 420 \pm 10 \text{ В}, U_{\lambda/4\parallel} = 240 \pm 10 \text{ В}.$$

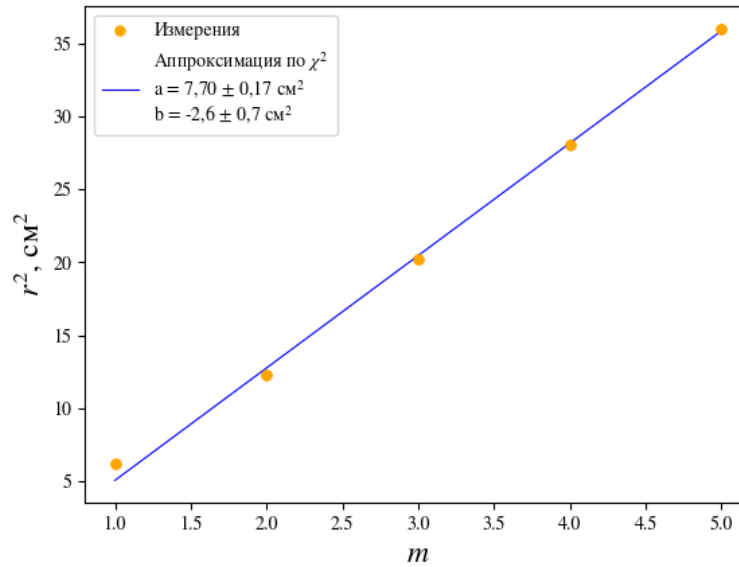


Рисунок 5 – График $r^2 = f(m)$

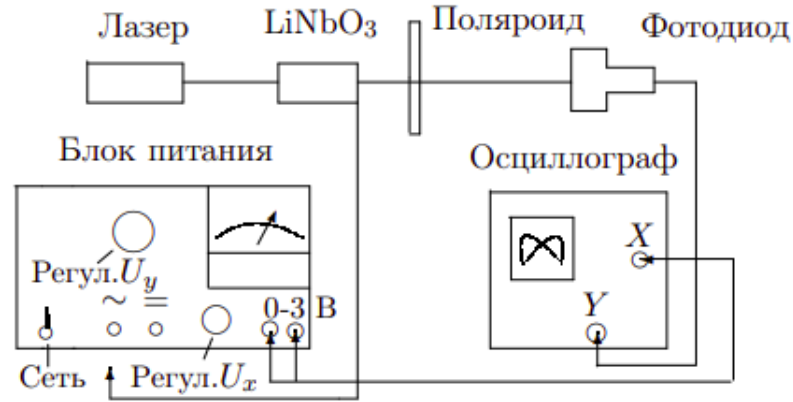


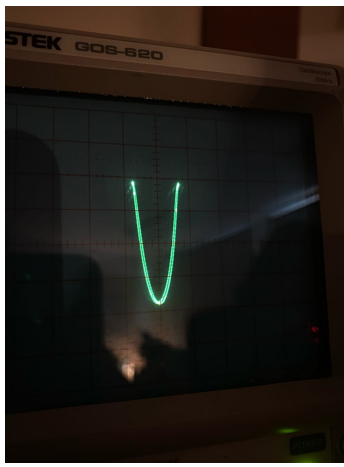
Рисунок 6 – Схема для изучения двойного лучепреломления в электрическом поле

При подаче на кристалл напряжение $U = 1/2U_{\lambda/2} = U_{\lambda/4}$ поляризация на выходе кристалла была круговой (яркость пятна при вращении не менялась).

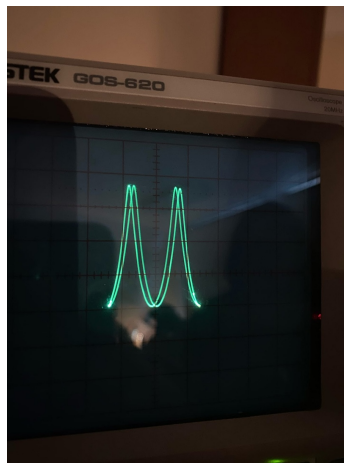
При изучении двойного лучепреломления в переменном электрическом поле вместо экрана был установлен фотодиод (рис. 6) и подключён к y -выходу осциллографа, а трёхвольтовый выход блока питания на x -вход. Таким образом, отклонение луча по оси x пропорционально напряжению U на кристалле, а по оси y — интенсивности прошедшего через анализатор сигнала $I_{\text{вых}}$. На экране осциллографа были получены фигуры Лиссажу (рис. 7), при изменении поляризации картина переворачивается (рис. 8).

Полуволновое напряжение, соответствующее переходу от максимума к минимуму сигнала на осциллограмме

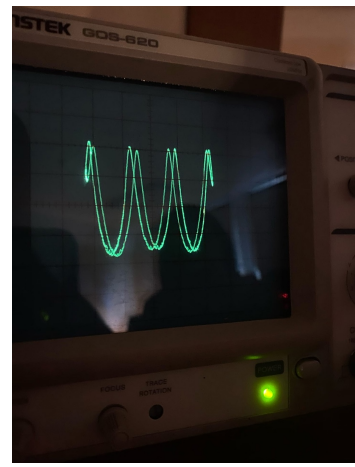
$$\Delta U_1 = 560 \pm 10 \text{ В}, \Delta U_2 = 960 \pm \text{ В}.$$



(a)

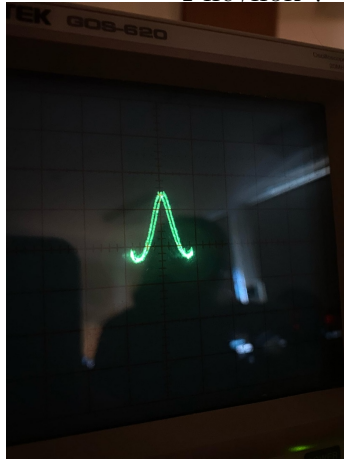


(b)

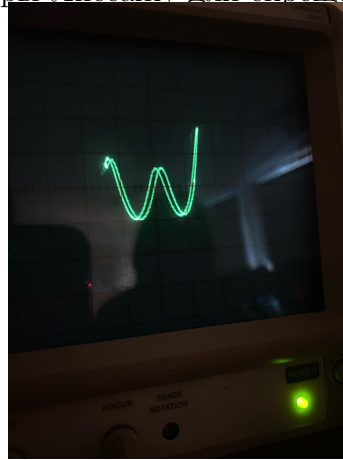


(c)

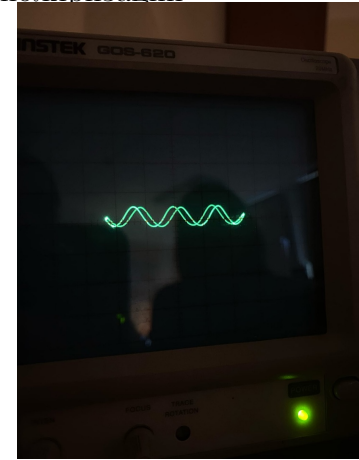
Рисунок 7 – Фигуры Лиссажу для скрещенной поляризации



(a)



(b)



(c)

Рисунок 8 – Фигуры Лиссажу для параллельной поляризации

3 Вывод

В данной работе было исследование явление двулучепреломления и эффект Поккельса в кристалле ниобата лития. Была измерена постоянная двулучепреломления $n_o - n_e$ для исследуемого кристалла, в результате можно рассчитать значение $n_e = 2.20$, которое отличается от табличного на 0.5 %.

Было определено полуволновое напряжение кристалла на длине волны падающего излучения лазера $\lambda = 633$ нм

$$U_{\lambda/2} = (480 \pm 20) \text{ В.}$$

При напряжениях, кратных полуволновому, были получены осциллограммы, представляющие зависимость интенсивности от значения переменного электрического поля, приложенного к кристаллу. При $U = 1/2 U_{\lambda/2} = U_{\lambda/4}$ наблюдалась круговая поляризация выходящего из анализатора излучения.

4 Список литературы

1. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие. В трёх томах. Т.2. Оптика / А. В. Максимычев, Д. А. Александров, Н. С. Берюлёв и др.; под ред. А. В. Максимычева. - М.: МФТИ, 2014. - 446 с.

5 Приложение

[Ссылка на данные и их обработку](#)