

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4.7.2

Эффект Поккельса

выполнили студенты 006 и 007 групп ФЭФМ

Штрайх Роберт

Петрова Софья

Долгопрудный, 2022 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 Теоретические сведения

Эффект Поккельса – изменение показателя преломления света в кристалле под действием электрического поля.

Рассмотрим кристалл ниобата лития: его оптические свойства обладают симметрией вращения относительно выделенного направления – оптической оси Z . Для волны, распространяющейся вдоль Z , показатель преломления равен n_e , а для волны, перпендикулярной оптической оси, – n_o , причем $n_o > n_e$. Волну длины $\lambda = 2\pi/k$, проходящую под углом θ к оси Z в кристалле, принято раскладывать на обыкновенную и необыкновенную. Для вектора напряженности обыкновенной волны верно: $\mathbf{E}_o \perp (\mathbf{k}, \mathbf{e}_z)$, – и показатель преломления $n_1 = n_o$. Для вектора напряженности необыкновенной: $\mathbf{E}_e \in (\mathbf{k}, \mathbf{e}_z)$, и показатель преломления n_2 зависит от θ по закону:

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

Разность хода обыкновенной и необыкновенной волн при прохождении кристалла длиной l составляет:

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

С учетом зависимости $n_2(\theta)$ для малых углов θ в приближении $n_o \approx n_e$:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l(n_o - n_e)\theta^2 \quad (1)$$

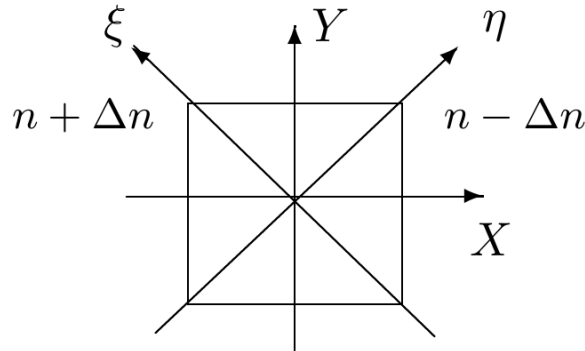


Рис. 1: Эффект Поккельса: главные направления при наложении электрического поля

Направления постоянной разности фаз задают косинусы $\cos \theta$, следовательно, интерференционная картина является концентрическими окружностями.

Поместим кристалл ниобата лития в постоянное электрическое поле $E_{эл}$, направленное по оси X , перпендикулярной оптической оси Z . В плоскости (X, Y) возникают быстрая и медленная оси под углами 45° к X, Y , соответствующие показателям преломления $(n_o - \Delta n)$ и $(n_o + \Delta n)$, здесь $\Delta n = A \cdot E_{эл}$, A – константа, зависящая от свойств материала.

Появление главных направлений ξ и η иллюстрирует рисунок 1.

2 Экспериментальная установка

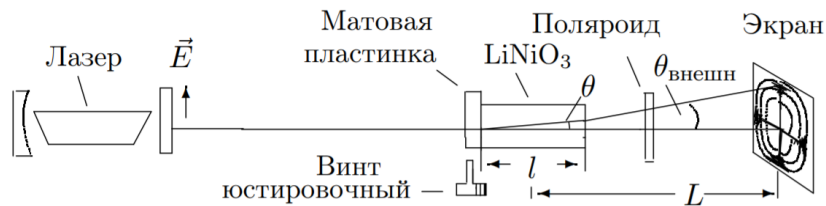


Рис. 2: Схема для наблюдения интерференционной картины

Если перед кристаллом, помещённым между поляроидами, расположить линзу или матовую пластинку, то на экране за поляроидом мы увидим тёмные концентрические окружности – результат интерферен-

ции обыкновенной и необыкновенной волн. При повороте выходного поляроида на 90° картина меняется с позитива на негатив (на месте светлых пятен тёмные и наоборот). В случае, когда разрешённое направление анализатора перпендикулярно поляризации лазерного излучения, радиус тёмного кольца с номером m равен

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

где L – расстояние от центра кристалла до экрана, l – длина кристалла. Теперь поместим кристалл в постоянное электрическое поле $E_{\text{эл}}$, направленное вдоль оси X , перпендикулярной Z . Показатель преломления для луча, распространяющегося вдоль Z , всегда n_o . В плоскости (X, Y) возникают два главных направления под углами 45° к X и Y с показателями преломления $n_o - \Delta n$ и $n_o + \Delta n$ (быстрая и медленная ось), причём $\Delta n = A E_{\text{эл}}$. Для поляризованного вертикально света и анализатора, пропускающего горизонтальную поляризацию, на выходе интенсивность будет иметь вид

$$I_{\text{вых}} = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\lambda/2}} \right), \quad (3)$$

для параллельных поляризаций:

$$I_{\text{вых}} = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\lambda/2}} \right), \quad (4)$$

где $U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{4A} \frac{d}{l}$ – *полуволновое напряжение*, d – поперечный размер кристалла. При напряжении $U = E_{\text{эл}} d$ равном полуволновому сдвиг фаз между двумя волнами равен π , а интенсивность света на выходе максимальна.

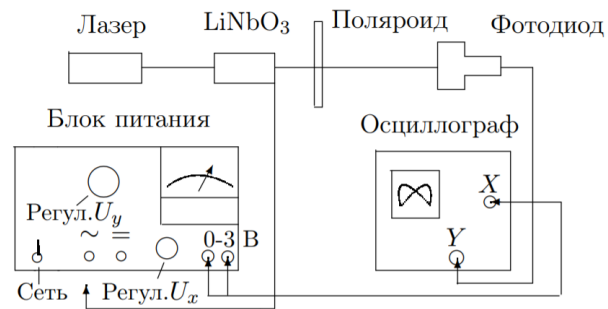


Рис. 3: Схема установки

На рис. 3 представлена схема всей установки (оптическая часть изображена на рис. 2). Свет лазера, проходя сквозь пластину, рассеивается и падает на двоякопреломляющий кристалл. На экране за поляроидом видна интерференционная картина. Убрав рассеивающую пластину и подавая на кристалл постоянное напряжение, можно величиной напряжения влиять на поляризацию луча, вышедшего из кристалла. Заменяв экран фотодиодом и подав на кристалл переменное напряжение, можно исследовать поляризацию с помощью осциллографа.

3 Ход работы

3.1 Юстировка системы

1. Соберём оптическую схему согласно рис. 2. Включим лазер и установим анализатор (без кристалла в схеме) так, чтобы лазерное излучение через него не проходило (скрещенные поляризации). Лазерный луч поляризован вертикально.
2. Поставим кристалл и установим перед ним вплотную к кювете матовую пластинку. Расстояние от кристалла до экрана $L = 75$ см.
3. Получим на экране интерференционную картину. Отклоняя кристалл с помощью юстировочного винта и поворачивая рейтер с кюветой вокруг вертикальной оси, добьемся совмещения центра коноскопической картины с положением луча на экране в отсутствие матовой пластинки. При повороте анализатора на 90° коноскопическая картина меняется на негативную.



а) Позитив

б) Негатив

Рис. 4: Интерференционная картина

3.2 Измерения

1. Измерим радиусы тёмных колец и построим график $r^2 = f(m)$.

m	1	2	3	4	5	6	7	8
r , см	2,75	3,8	4,6	5,4	6	6,5	7	7,5
r^2 , см ²	7,56	14,44	21,16	29,16	36	42,25	49	56,25
σ_{r^2} , см ²	0,28	0,38	0,46	0,54	0,60	0,65	0,70	0,75

Таблица 1: Радиусы тёмных колец

$$\sigma_{r^2} = r^2 \frac{\sigma_r}{r}, \quad \sigma_r = 1 \text{ мм}$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle r^2 m \rangle - \langle r^2 \rangle \langle m \rangle}{\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2}}$$

$$\frac{\sigma_{n_o - n_e}}{n_o - n_e} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + 2 \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2}, \quad \sigma_L = \sigma_l = 1 \text{ мм}$$

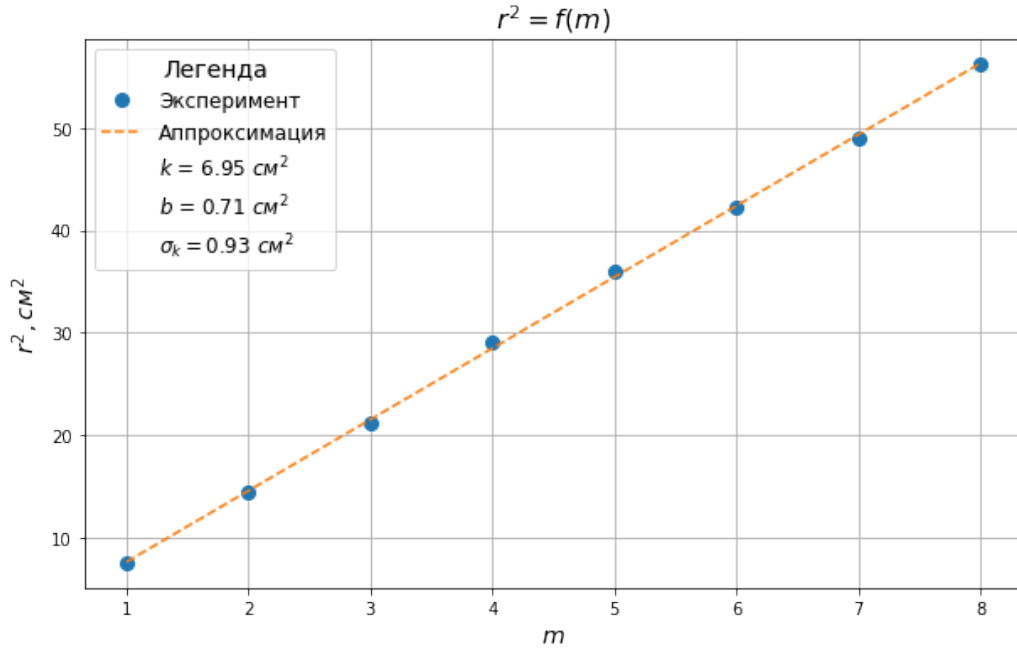


Рис. 5: Зависимость радиуса кольца от номера минимума

По углу наклона прямой определим двулучепреломление ($n_o - n_e$) ниобата лития, пользуясь формулой (2); $\lambda = 0,63$ мкм, $L = 75$ см, $l = 3$ см (длина кристалла), $n_o = 2,29$:

$$n_o - n_e \approx 0,089 \pm 0,012$$

2. Уберём матовую пластинку и подключим разъём блока питания на постоянное напряжение (=), установим регулятор напряжения на минимальное напряжение и включим блок питания в сеть.



Рис. 6: Лабораторная установка

Проследим, как меняется яркость пятна на экране с увеличением напряжения на кристалле.

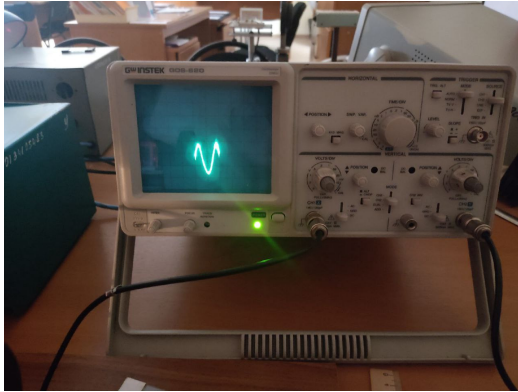
Для скрещённых поляризаций при напряжениях $U = (2k - 1)U_{\lambda/2}$ наблюдается максимум, при $U = 2kU_{\lambda/2}$ – минимум, $k \in \mathbb{N}$. Для параллельных поляризаций наблюдается обратная зависимость.

В 100 делениях шкалы блока питания 1,5 кВ. Погрешность измерения напряжения 15 В.

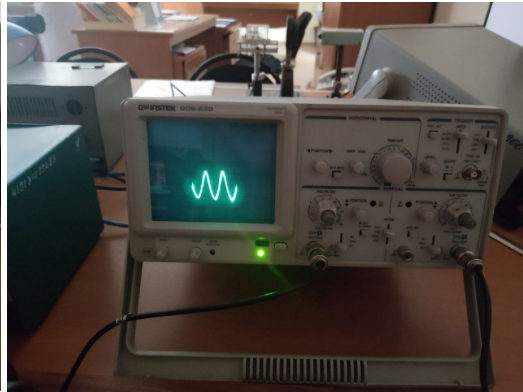
	Скрещённые поляризации	Параллельные поляризации
$U_{\lambda/2}$, В	570	570
U_{λ} , В	1140	1140
$U_{3\lambda/2}$, В	1710	1710

Таблица 2: Напряжения, соответствующие экстремумам интенсивности, для двух видов поляризации

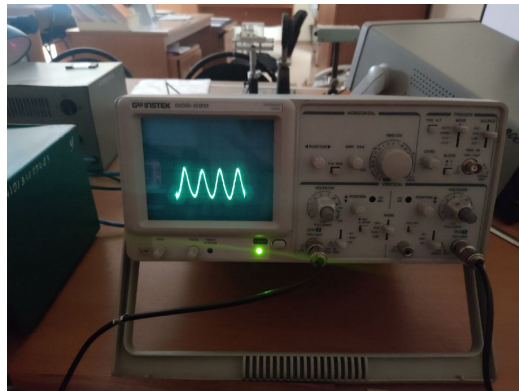
3. Подадим на кристалл напряжение $U = \frac{1}{2}U_{\lambda/2} = U_{\lambda/4} = 285 \pm 15$ В. При вращении анализатора наблюдаем малое изменение интенсивности пятна на экране, что доказывает наличие у луча на выходе из кристалла круговой поляризации.
4. Установим вместо экрана фотодиод и подключим его к y -входу осциллографа. Убрав напряжение до нуля, переключим разъём с постоянного (=) на переменное напряжение (\sim). С трёхвольтового выхода блока питания подадим сигнал на вход x осциллографа. Отклонение луча осциллографа по оси x пропорционально напряжению U на кристалле, по оси y – интенсивности прошедшего через анализатор сигнала $I_{\text{вых}}$.
5. Постепенно повышая напряжение на кристалле, получим на экране осциллографа фигуры Лиссажу, соответствующие зависимости $I_{\text{вых}}(U)$ для скрещённых и параллельных поляризаций лазера и анализатора.
Определим по фигурам Лиссажу полуволновое напряжение, измерив разность показаний между последовательными фигурами, соответствующими максимуму и минимуму сигнала на осциллограмме: $\Delta U = U_{\lambda/2} \approx 570 \pm 15$ В.
6. Получим фигуры Лиссажу для напряжений $U_{\lambda/2}$, U_{λ} , $U_{3\lambda/2}$ при скрещённых и параллельных поляризациях лазера и анализатора.



а) $U_{\lambda/2}$



б) U_{λ}

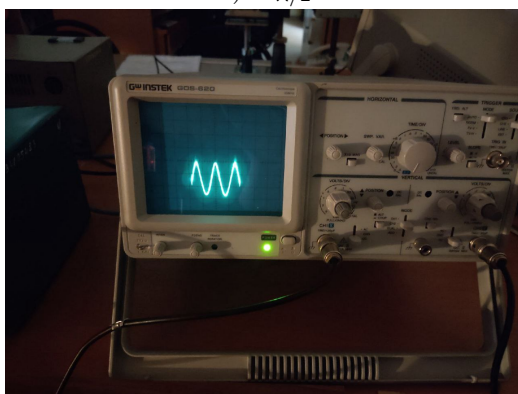


в) $U_{3\lambda/2}$

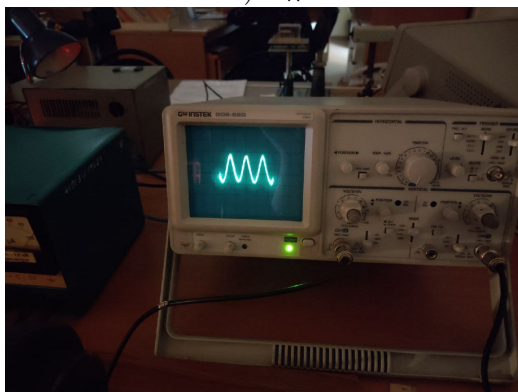
Рис. 7: Фигуры Лиссажу. Скрещённая поляризация



а) $U_{\lambda/2}$



б) U_{λ}



в) $U_{3\lambda/2}$

Рис. 8: Фигуры Лиссажу. Параллельная поляризация

4 Выводы

1. Была изучена интерференция рассеянного света, прошедшего кристалл ниобата лития;
2. Были измерены радиусы r_m интерференционных колец, определена разность показателей преломления $n_o - n_e = 0,089 \pm 0,012$. Это значение соответствует литиевым кристаллам: $\Delta n \approx 0,09$;
3. При подаче на кристалл постоянного напряжения $U_{\lambda/4}$ на выходе из кристалла был получен свет, поляризованный по кругу;
4. Был исследован эффект Поккельса: двумя способами было получено полуволновое напряжение $U_{\lambda/2} \approx 570 \pm 15$ В (по зависимости интенсивности пятна на экране и по фигурам Лиссажу); по виду фигур Лиссажу установлено, что при скрещённых поляризациях лазера и анализатора $I_{\text{вых}}$ удовлетворяет формуле (3), при параллельных – (4).