



Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

## ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА

Лабораторная работа № 407

МОСКВА 2005

**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.

*Эффектом Поккельса* называется изменение показателя преломления света в кристалле под действием электрического поля, причём это изменение пропорционально напряжённости электрического поля. Как следствие эффекта Поккельса в кристалле появляется двойное лучепреломление или меняется его величина, если кристалл был двулучепреломляющим в отсутствие поля.

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  $\text{LiNbO}_3$  — 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  $\Delta n$ . 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. На этом принципе основаны многочисленные применения эффекта Поккельса в

лазерной технике для оптических модуляторов, затворов и других устройств, управляющих лазерным излучением. Поскольку эффект Поккельса связан с изменением электронной поляризуемости под действием электрического поля, то он практически безынерционен — быстроедействие устройств на его основе меньше  $10^{-9}$  с.

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  $\vec{E}$  которой перпендикулярен оси  $Z$ , показатель преломления равен  $n_o$ , а для волны, вектор  $\vec{E}$  которой располагается вдоль оси  $Z$ , он равен  $n_e$ , причём  $n_e < n_o$ , т. е.  $\text{LiNbO}_3$  — «отрицательный кристалл». В общем случае, когда луч света распространяется под углом  $\theta$  к оптической оси  $Z$  (рис. 1), существуют два собственных значения показателя преломления  $n_1$  и  $n_2$ : если световой вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен плоскости  $(\vec{k}, \vec{Z})$ , где  $\vec{k}$  — волновой вектор луча, то волна называется *обыкновенной* («о» — ординарная), а показатель преломления  $n_1$  равен  $n_o$  и не зависит от угла  $\theta$ ; когда световой вектор  $\vec{E}$  лежит в плоскости  $\vec{k}, \vec{Z}$  — это *необыкновенная* («е» — экстраординарная) волна, при этом показатель преломления  $n_2$  зависит от угла  $\theta$  и определяется уравнением

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

Нетрудно видеть, что при  $\theta = 0$  и  $90^\circ$   $n_2$  равен  $n_o$  и  $n_e$  соответственно.

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 разрешённое направление выходного поляроида. В нашем эксперименте используется лазер, излучение которого поляризовано, поэтому входной поляроид можно не ставить.

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

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

Для обыкновенного луча  $n_1 = n_o$  и не зависит от угла  $\theta$  между направлением луча и осью  $Z$ . Для необыкновенного луча  $n_2$  зависит от угла  $\theta$  и определяется уравнением (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  $n_2 = n_o - (n_o - n_e)\theta^2$ . Таким образом,

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

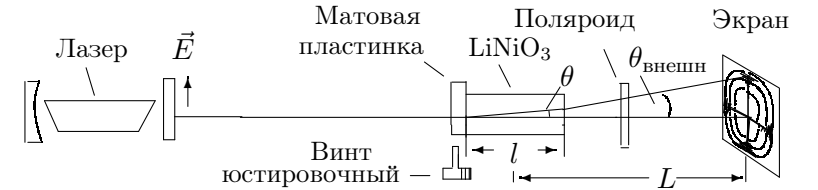


Рис. 1. Схема для наблюдения интерференционной картины

Направлениями постоянной разности фаз служат конусы  $\theta = \text{const}$ , поэтому интерференционная картина представляет собой концентрические окружности. Интерференционные кольца перерезаны тёмным «мальтийским крестом», который выделяет области, где интерференция отсутствует. В этих направлениях распространяется только одна поляризованная волна (обыкновенная или необыкновенная). При повороте выходного поляроида (анализатора) на  $90^\circ$  картина меняется с позитива на негатив: везде, где были светлые места, появляются тёмные и наоборот.

Для случая, когда разрешённое направление анализатора перпендикулярно поляризации лазерного излучения (скрещенные поляризации), найдём радиус тёмного кольца с номером  $m$ . Для луча, идущего вдоль оси  $Z$  ( $m = 0$ ), 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  $2\pi$ . Поэтому для  $m$ -го тёмного кольца  $\delta = 2\pi m$  или  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} l (n_o - n_e) \theta^2 = 2\pi m$ . Если  $L$  — расстояние от центра кристалла до экрана, то, учитывая закон преломления (закон Снеллиуса) на границе кристалла, при малых углах  $\theta_{\text{внешн}} = n_o \theta$  (рис. 1) получаем выражение для радиуса кольца:

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

Измеряя радиусы колец, можно найти разность  $(n_o - n_e)$  — двулучепреломление кристалла.

Представим теперь, что мы поместили кристалл в постоянное электрическое поле  $E_{\text{эл}}$ , направленное вдоль оси  $X$ , перпендикулярной оптической оси кристалла  $Z$ . Луч света распространяется вдоль оси  $Z$ , при этом для любой поляризации в отсутствие внешнего поля показатель преломления равен  $n_o$ . Свойства симметрии кристалла и его электрооптический тензор таковы, что в результате линейного электрооптического эффекта (эффекта Поккельса) в плоскости  $(X, Y)$  возникают два главных направления  $\xi$  и  $\eta$  под углами  $45^\circ$  к осям  $X$  и  $Y$  (рис. 2) с показателями преломления  $(n_o - \Delta n)$  и  $(n_o + \Delta n)$ , то есть появляются «медленная» и «быстрая» ось, причём  $\Delta n = A \cdot E_{\text{эл}}$  ( $A$  — некая константа, зависящая только от типа кристалла).

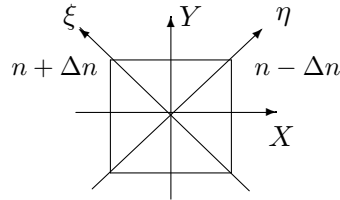


Рис. 2. Эффект Поккельса — появление новых главных направлений при наложении электрического поля

Пусть свет на входе в кристалл поляризован вертикально, а на выходе стоит анализатор, пропускающий горизонтальную поляризацию. Разложим исходный световой вектор  $E = E_0 e^{i(\omega t - kz)}$  по осям  $\xi$  и  $\eta$ :  $E_\xi = E_\eta = E_0/\sqrt{2}$ . После прохождения кристалла между векторами  $E_\xi$  и  $E_\eta$  появится разность фаз

$$\delta = \frac{2\pi l}{\lambda} 2\Delta n = \frac{4\pi l}{\lambda} A E_{\text{эл}} = \frac{4\pi l}{\lambda} d A U,$$

где  $U = E_{\text{эл}} \cdot d$  — напряжение на кристалле,  $d$  — размер кристалла в поперечном направлении. Результирующее поле после анализатора — это сумма проекций  $E_\xi$  и  $E_\eta$  на направление  $X$ , т. е.

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

Интенсивность света пропорциональна квадрату модуля вектора электрического поля в волне:

$$I_{\text{вых}} \sim E E^* = E_0^2 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right),$$

поэтому

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

Здесь

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{4A} \frac{d}{l} \quad (4)$$

— так называемое *полуволновое напряжение* — имеет тот смысл, что при  $U = U_{\lambda/2}$  сдвиг фаз между двумя волнами, соответствующими двум собственным поляризациям,  $\delta = \pi$  (разность хода равна  $\lambda/2$ ), и интенсивность света на выходе анализатора достигает максимума. Это следует из (3).

Студенту предлагается показать, что при параллельных поляризациях лазера и анализатора

$$I_{\text{вых}} = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_{\lambda/2}}\right). \quad (5)$$

Напряжение  $U_{\lambda/2}$  называют также *управляющим напряжением*. Оно уменьшается, как это видно из (4), с уменьшением длины волны света  $\lambda$  и с увеличением отношения  $\lambda/d$  кристалла (это справедливо для поперечного электрооптического эффекта, который используется в нашем опыте). Характерная величина полуволнового напряжения в ниобате лития для видимого света составляет несколько сотен вольт.

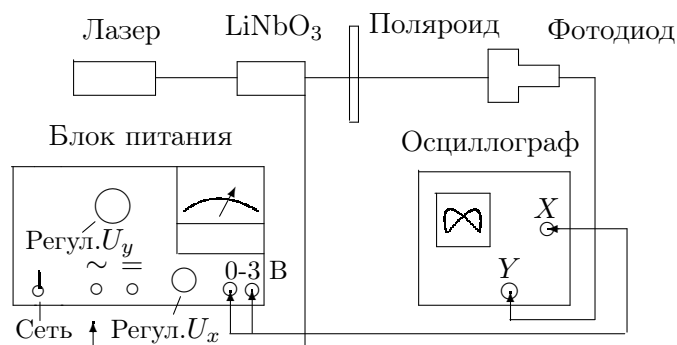


Рис. 3. Схема для изучения двойного лучепреломления в электрическом поле

**Экспериментальная установка.** Оптическая часть установки представлена на рис. 1. Свет гелий-неонового лазера, поляризованный в вертикальной плоскости, проходя сквозь матовую пластинку, рассеивается и падает на двоякопреломляющий кристалл под различными углами. Кристалл ниобата лития с размерами  $3 \times 3 \times 26$  мм вырезан вдоль оптической оси  $Z$ . На экране, расположенном за скрещенным поляроидом, видна интерференционная картина.

Для  $\lambda = 0,63$  мкм (длина волны гелий-неонового лазера) в ниобате лития  $n_o = 2,29$ .

Убрав рассеивающую пластинку и подавая на кристалл постоянное напряжение, можно величиной напряжения влиять на поляризацию луча, вышедшего из кристалла.

Заменив экран фотодиодом (рис. 3) и подав на кристалл переменное напряжение, можно исследовать поляризацию луча с помощью осциллографа.

## ЗАДАНИЕ

В работе предлагается: 1) измерив радиусы интерференционных колец, определить разность показателей преломления  $n_o - n_e$ ; 2) подав на кристалл постоянное напряжение, получить свет, поляризованный по кругу; 3) определить полуволновое напряжение по фигурам Лиссажу на экране осциллографа.

### I. Юстировка системы

1. Соберите оптическую схему согласно рис. 1. Включите лазер и установите анализатор (без кристалла в схеме) так, чтобы лазерное излучение через него не проходило (скрещенные поляризации).

Чтобы убедиться, что лазерный луч поляризован вертикально, определите разрешённое направление анализатора: посмотрите сквозь поляроид на дневной свет от окна, отражённый от светлой поверхности (от стола, подоконника); вращая поляроид, найдите минимум освещённости и заметьте отсчёт угла на лимбе. Вблизи угла Брюстера в отражённом свете преобладает компонента светового вектора, параллельная плоскости стола («правило иглой»), следовательно, минимум отражённого света соответствует вертикальному разрешённому направлению поляроида.

2. Поставьте кристалл и установите перед ним вплотную к кювете матовую пластинку. Расстояние от кристалла до экрана определяет размер интерференционной картины и её контрастность: 70–80 см — оптимальное расстояние для тёмной комнаты, в светлое время дня — около 30 см.
3. Получите на экране интерференционную картину. Отклоняя кристалл с помощью юстировочного винта (рис. 1) и поворачивая рейтер с кюветой вокруг вертикальной оси, добейтесь совмещения центра коноскопической картины с положением луча на экране в отсутствие матовой пластинки.

Поверните анализатор на  $90^\circ$  и убедитесь, что коноскопическая картина изменилась на негативную. Верните анализатор в прежнее положение (горизонтальное разрешённое направление).

## II. Измерения

4. Измерьте радиусы тёмных колец  $r(m)$  и расстояние  $L$  от середины кристалла до экрана.

Постройте график  $r^2 = f(m)$ . По углу наклона прямой определите двулучепреломление ( $n_o - n_e$ ) ниобата лития, пользуясь формулой (2). Величины  $n_o$ ,  $l$  и  $\lambda$  указаны в описании работы.

5. Ещё раз убедитесь, что направление лазерного луча совпадает с направлением на центр интерференционной картины, и уберите матовую пластинку. Можно немного подъюстировать кристалл до получения минимальной интенсивности луча после прохождения анализатора.

Подключите разъём блока питания на постоянное напряжение (=), установите регулятор напряжения на минимальное напряжение и включите блок питания в сеть.

С увеличением напряжения на кристалле яркость пятна на экране увеличивается и достигает максимума при  $U = U_{\lambda/2}$ . При  $U = 2U_{\lambda/2} = U_\lambda$  яркость снова будет минимальной и т. д. Прделайте то же для параллельных поляризаций лазера и анализатора. Определите полуволновое напряжение ниобата лития.

6. Подайте на кристалл напряжение  $U = \frac{1}{2}U_{\lambda/2} = U_{\lambda/4}$  (четверть-волновое напряжение). Поляризация на выходе кристалла должна быть круговой. Убедитесь в этом, вращая анализатор и наблюдая за яркостью пятна на экране.
7. Установите вместо экрана фотодиод (рис. 3) и подключите его к  $Y$ -входу осциллографа. Убрав напряжение до нуля, переключите разъём с постоянного (=) на переменное напряжение ( $\sim$ ). С трёхвольтового выхода блока питания подайте сигнал на вход  $X$  осциллографа. Отклонение луча осциллографа по оси  $X$ , таким образом, будет пропорционально напряжению  $U$  на кристалле, а по оси  $Y$  — интенсивности прошедшего через анализатор сигнала  $I_{\text{вых}}$ .
8. Постепенно повышая напряжение на кристалле, наблюдайте на экране осциллографа фигуры Лиссажу, соответствующие зависимости  $I_{\text{вых}}(U)$  для скрещенных поляризаций лазера и анализатора. Слегка поворачивая кристалл, сделайте фигуру Лиссажу симмет-

ричной. Определите по фигурам Лиссажу полуволновое напряжение  $U_{\lambda/2}$  как  $\Delta U$ , соответствующее переходу от максимума к минимуму сигнала на осциллограмме. Сравните значения полуволнового напряжения, полученные при постоянном и переменном напряжениях.

9. Зарисуйте фигуры Лиссажу для напряжений  $U_{\lambda/2}$ ,  $U_\lambda$ ,  $U_{3\lambda/2}$  при скрещенных поляризациях лазера и анализатора. Проследите, как меняется картина при переходе к параллельным поляризациям.

### Контрольные вопросы

1. Можно ли наблюдать эффект Поккельса в жидкости?
2. Почему при повороте анализатора на  $90^\circ$  интерференционная картина на экране меняется с позитива на негатив?
3. Что такое полуволновое напряжение  $U_{\lambda/2}$ ? Как оно зависит от длины волны  $\lambda$ ?
4. Почему при  $U = \frac{1}{2}U_{\lambda/2}$  поляризация на выходе из кристалла круговая?
5. Оцените относительное изменение показателя преломления данного кристалла при подаче напряжения  $U = U_{\lambda/2}$ .
6. Выведите формулу (5).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г.С. Оптика. — М.: Наука, 1976. §§ 148, 150–153.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. — М.: Наука, 1985. §§ 76, 91.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970. §§ 14.3, 14.4.
4. Яриш А.О. Квантовая электроника. — М.: Советское радио, 1980. §§ 14.1–14.5.