

## Лабораторная работа 3-16

### ЭФФЕКТ КЕРРА

Э.Н. Колесникова

#### Цель работы

Исследование электрооптического эффекта Керра и определение постоянной Керра.

#### Теоретическое введение

##### Общие сведения о поляризации

Поляризация света — совокупность явлений волновой оптики, в которых проявляется поперечность электромагнитных световых волн. Поскольку  $\vec{E} \perp \vec{B}$  (см. рис. 16.1), для поляризации достаточно исследовать поведение лишь одного из них, а именно вектор  $\vec{E}$ , который называют *световым вектором*.

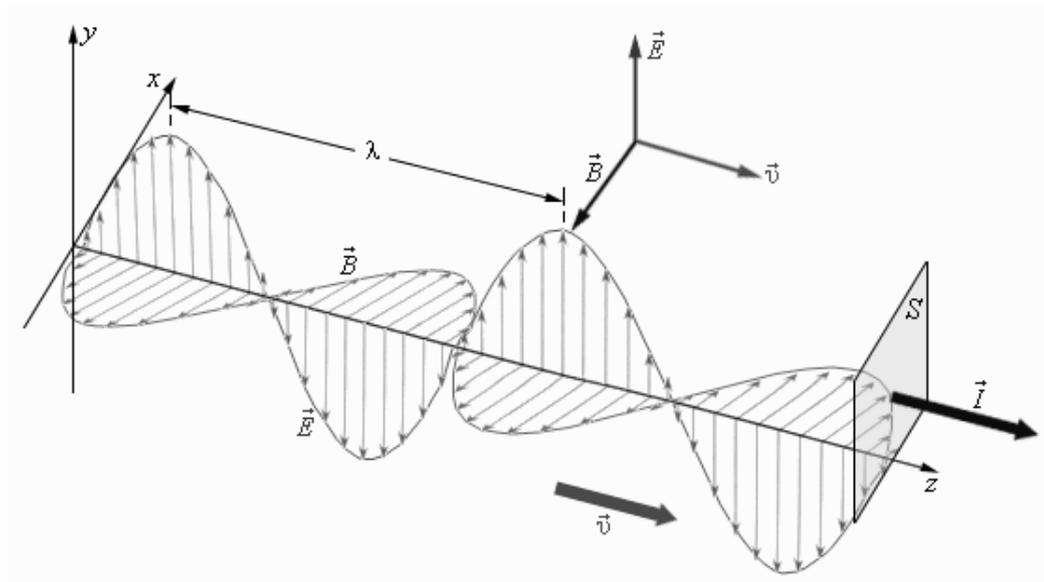


Рис. 16.1. Гармоническая (синусоидальная) электромагнитная волна. Векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{k}$  взаимно перпендикулярны.

Различают *естественный* и *поляризованный* свет. *Поляризованный свет* — свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены. *Естественный свет* — свет со всевозможными равновероятными направлениями колебаний вектора  $\vec{E}$  (а, следовательно, и  $\vec{B}$ ) (см. рис. 16.2). Направление распространения света на рис. 16.2 перпендикулярно плоскости рисунка. Равномерное распределение векторов  $\vec{E}$  в естественном свете объясняется большим числом атомарных излучателей, а равенство амплитудных значений векторов  $\vec{E}$  — одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения каждого из атомов.

Обычные (не лазерные) источники оптического излучения (свечение раскаленных твердых тел, свечение возбужденных атомов газа) испускают естественный свет.

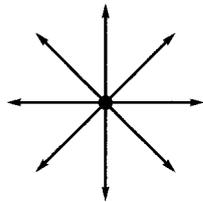


Рис.16.2. Естественный свет.

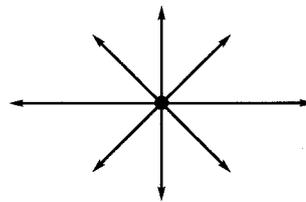


Рис.16.3. Частично поляризованный свет.

*Частично поляризованный свет* — свет с преимущественным направлением колебаний вектора  $\vec{E}$  (см. рис. 16.3).

*Плоскополяризованный (линейно-поляризованный) свет* — свет, в котором вектор  $\vec{E}$  (а, следовательно, и вектор  $\vec{B}$ ) колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу (см. рис. 16.4). Линейно поляризованный свет испускается лазерными источниками.

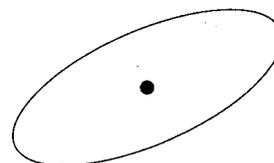


Рис.16.4. Плоскополяризованный свет.

Рис.16.5.Эллиптически-поляризованный свет.

*Эллиптически-поляризованный свет* — свет, для которого вектор  $\vec{E}$  изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной лучу (см. рис. 16.5). В каждый момент времени вектор  $\vec{E}$  может быть спроектирован на две взаимно перпендикулярные оси (рис. 16.6).

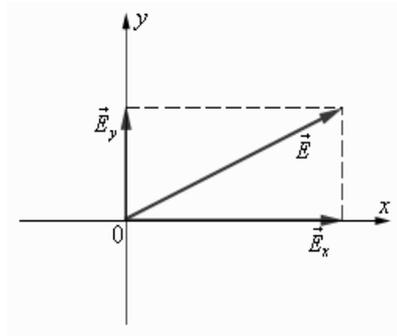


Рис. 16.6. Разложение вектора  $\vec{E}$  по осям.

Любую волну (поляризованную и неполяризованную) можно представить как суперпозицию двух линейно поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях волн:  $\vec{E}(t) = \vec{E}_x(t) + \vec{E}_y(t)$ . В поляризованной волне обе составляющие  $\vec{E}_x(t)$  и  $\vec{E}_y(t)$  когерентны, а в неполяризованной — некогерентны, т. е. в первом случае разность фаз между  $\vec{E}_x(t)$  и  $\vec{E}_y(t)$  постоянна, а во втором она является случайной функцией времени.

Рассмотрим два взаимно перпендикулярных электрических колебания, совершающихся вдоль осей  $x$  и  $y$  и различающихся по фазе на  $\delta$  (рис. 16.6):

$$E_x = A_1 \cos \omega t, \quad E_y = A_2 \cos(\omega t + \delta). \quad (16.1)$$

Угол  $\varphi$  между направлениями векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{E}_x$  определяется выражением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos(\omega t + \delta)}{A_1 \cos \omega t}. \quad (16.2)$$

Допустим, что световые волны  $E_x$  и  $E_y$  когерентны, причем  $\delta$  равно нулю (или  $\pi$ ).

Тогда согласно (16.2)  $\operatorname{tg}\varphi = \pm \frac{A_2}{A_1} = \operatorname{const}$ . Следовательно, результирующее колебание совершается в фиксированном направлении — волна оказывается *плоскополяризованной*, как на рис.16.4.

В случае, когда  $A_1 = A_2$  и  $\delta = \pm\pi/2$ ,  $\operatorname{tg}\varphi = \pm\operatorname{tg}(\omega t)$ . Отсюда вытекает, что плоскость колебаний поворачивается вокруг направления луча с угловой скоростью, равной частоте колебания  $\omega$ . Свет в этом случае будет поляризованным по *кругу*.

Из учения о колебаниях известно, что два взаимно перпендикулярных гармонических колебания одинаковой частоты при сложении дают в общем случае движение по эллипсу (в частности, может получиться движение по прямой или по окружности). Аналогично для точки с координатами, определяемыми выражениями (16.1), конец вектора  $\vec{E}$ , движется по эллипсу. Следовательно, две когерентные плоскополяризованные световые волны, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны, при наложении друг на друга дают эллиптически поляризованную световую волну (рис.16.5). Если по отношению к направлению, противоположному направлению луча, вектор  $\vec{E}$  вращается по часовой стрелке, поляризация называется *правой*, в противном случае — *левой*.

Плоскость, в которой колеблется световой вектор  $\vec{E}$ , называют *плоскостью колебаний*, а плоскость, перпендикулярную к ней, т.е. плоскость, в которой колеблется вектор  $\vec{B}$  — *плоскостью поляризации*.

### ***Получение и анализ плоскополяризованного света***

*Плоскополяризованный* свет получают, пропуская естественный свет через *поляризаторы* ( $P$ ), в качестве которых используются среды, *анизотропные* в отношении колебаний вектора  $\vec{E}$ . Поляризаторы свободно пропускают колебания, параллельные

плоскости, которую называют *плоскостью поляризатора*, и полностью (идеальные поляризаторы) задерживают колебания, перпендикулярные к этой плоскости.

Для анализа плоскополяризованного света используют те же поляризаторы, которые в этом случае называются *анализаторами* ( $A$ ). Если плоскости  $P$  и  $A$  параллельны друг другу (рис. 16.7а), то плоскополяризованный свет проходит через анализатор. Если плоскости  $P$  и  $A$  перпендикулярны друг другу (рис. 16.7б), то плоскополяризованный свет не проходит через анализатор. Если плоскости  $P$  и  $A$  ориентированы произвольно (составляют угол  $\alpha$ ) (рис. 16.7в), то анализатор пропускает составляющую  $E_{\parallel} = E_0 \cos \alpha$ , где  $E_0$  — амплитуда светового вектора луча, прошедшего сквозь поляризатор;  $\vec{E}_{\parallel}$  и  $\vec{E}_{\perp}$  — соответственно компонента вектора  $\vec{E}_0$ , параллельная и перпендикулярная главной плоскости анализатора.

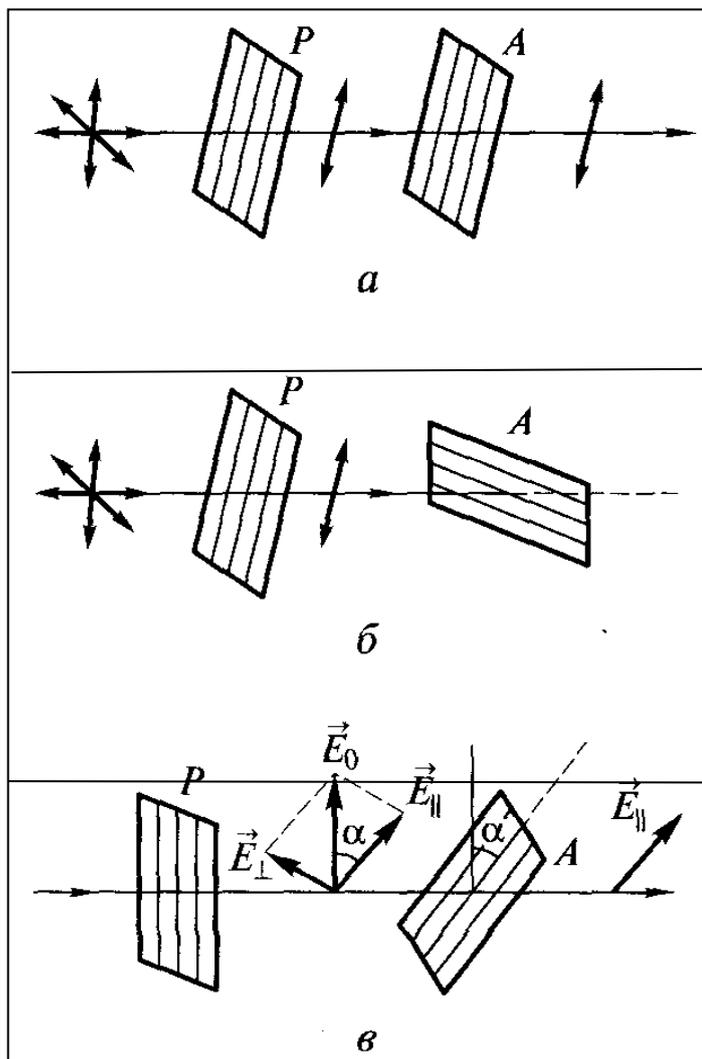


Рис.16.7. Прохождение света через поляризатор  $P$  и анализатор  $A$ .

Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды колебаний, поэтому интенсивность света, прошедшего через анализатор, есть:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha . \quad (16.3)$$

Соотношение (16.3) носит название *закона Малюса*.

### ***Поляризация света при двойном лучепреломлении***

*Двойное лучепреломление* — способность анизотропных веществ (кристаллов) расщеплять падающий световой луч на два луча, распространяющихся в разных направлениях с различной фазовой скоростью и поляризованных во взаимно-перпендикулярных плоскостях. *Анизотропия* — зависимость физических свойств веществ от направления.

Существуют *одноосные* и *двуосные* кристаллы. *Оптическая ось* кристалла — направление в оптически анизотропном кристалле, по которому распространяется луч света, не испытывая двойного лучепреломления. Одноосные и двуосные кристаллы — кристаллы с *одним* или *двумя* направлениями, вдоль которых *отсутствует двойное лучепреломление*. *Главная плоскость* одноосного кристалла — плоскость, проходящая через направление луча света и оптическую ось кристалла.

### ***Двойное лучепреломление в одноосном кристалле.***

При падении светового пучка на кристалл (см. рис.16.8) из него выходят два пространственно разделенных луча, параллельных друг другу, — *обыкновенный* ( $o$ ) и *необыкновенный* ( $e$ );  $MN$  — оптическая ось кристалла.

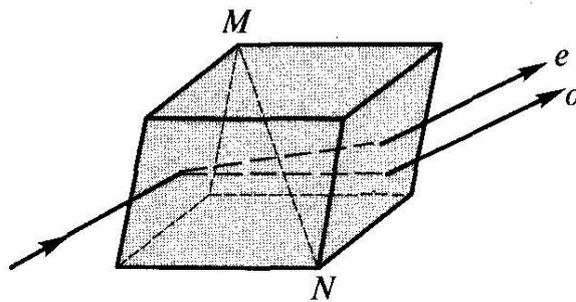


Рис.16.8. Двойное лучепреломление в одноосном кристалле.

У одноосных кристаллов один из преломленных лучей подчиняется обычному закону преломления; в частности, он лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к преломляющей поверхности. Этот луч называется *обыкновенным*. Для другого луча, называемого *необыкновенным*, закон преломления не выполняется. Даже при нормальном падении света на кристалл необыкновенный луч, вообще говоря, отклоняется от нормали (рис.16.9). Кроме того, необыкновенный луч не лежит, как, правило, в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к преломляющей поверхности.

Вдоль оптической оси обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются не разделяясь и с одинаковой скоростью.

Обыкновенный и необыкновенный лучи полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. Плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна к главному сечению кристалла. В необыкновенном луче колебания светового вектора совершаются в плоскости, совпадающей с главным сечением кристалла.

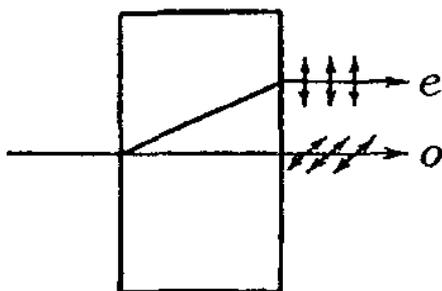


Рис.16.9. Обыкновенный (o) и необыкновенный (e) лучи в анизотропном кристалле.

Двойное лучепреломление объясняется анизотропией кристаллов. В кристаллах некубической системы диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  оказывается зависящей от направления. В одноосных кристаллах  $\varepsilon$  в направлении оптической оси и в направлениях, перпендикулярных к ней имеет различные значения  $\varepsilon_{\parallel}$  и  $\varepsilon_{\perp}$ . В других направлениях  $\varepsilon$  имеет промежуточные значения. Из анизотропии  $\varepsilon$  вытекает, что электромагнитным волнам с различными направлениями колебаний вектора  $\vec{E}$  соответствуют разные значения показателя преломления  $n$  (согласно формуле  $n = \sqrt{\varepsilon}$ ). Поэтому скорость световых волн зависит от направления колебаний светового вектора  $\vec{E}$ .

Скорости обыкновенного ( $v_o$ ) и необыкновенного ( $v_e$ ) лучей равны соответственно:

$$v_o = c/n_o = c/\sqrt{\varepsilon_{\perp}}, \quad v_e = c/n_e = c/\sqrt{\varepsilon_{\parallel}},$$

где  $n_o$  и  $n_e$  — показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.

#### Волновые поверхности в одноосном кристалле.

*Сферическая волновая поверхность.* Колебания вектора  $\vec{E}$  при любом направлении (1—3 на рис. 16.10) обыкновенного луча ( $o$ -луч) перпендикулярны оптической оси кристалла (ее направление показано штриховой линией), поэтому  $o$ -луч распространяется в кристалле по всем направлениям с одинаковой скоростью  $v_o = c/n_o$ . Пусть в точке  $S$  кристалла точечный источник света испускает световую волну. Тогда  $o$ -луч будет распространяться в кристалле со скоростью  $v_o = const$ , поэтому волновая поверхность обыкновенного луча — *сфера*.

*Эллипсоидальная волновая поверхность.* Для  $e$ -луча угол между направлением колебаний вектора  $\vec{E}$  и оптической осью отличен от прямого и зависит от направления луча, поэтому  $e$ -луч распространяется в кристалле по различным направлениям с разной скоростью  $v_e = c/n_e$ . Если в точке  $S$  на рис. 16.11 точечный источник испускает световую волну, то  $e$ -луч распространяется в кристалле со скоростью  $v_e \neq const$ , а потому волновая поверхность необыкновенного луча — *эллипсоид*. Вдоль оптической оси  $v_o = v_e$ . Наибольшее

расхождение в скоростях  $o$ - и  $e$ -лучей — в направлении, перпендикулярном оптической оси кристалла.

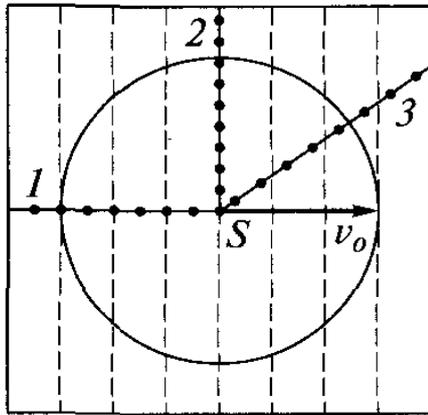


Рис. 16.10. Сферическая волновая поверхность  $o$ -луча.

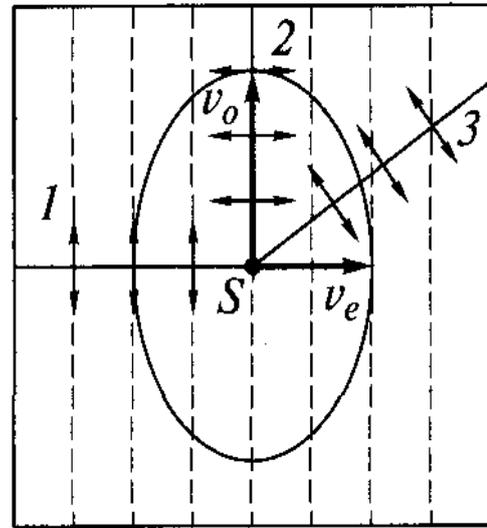


Рис. 16.11. Эллипсоидальная волновая поверхность  $e$ -луча.

Положительные и отрицательные кристаллы

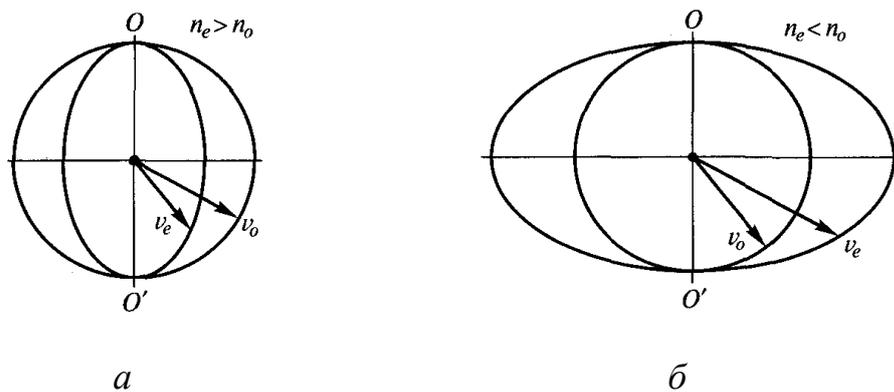


Рис. 16.12. Волновые поверхности  $o$ - и  $e$ -лучей:

$a$  - положительный кристалл;  $б$  - отрицательный кристалл.

На рис. 16.12а эллипсоид и сфера касаются друг друга в точках пересечения с оптической осью  $OO'$ . В направлении перпендикулярном оптической оси  $v_e < v_o$  ( $n_e > n_o$ ), т.е.

эллипсоид необыкновенного луча вписан в сферу обыкновенного луча (эллипсоид скоростей вытянут относительно оптической оси).

На рис.16.12б эллипсоид и сфера касаются друг друга в точках пересечения с оптической осью  $OO'$ . В данном случае  $v_e > v_o$ , ( $n_e < n_o$ ), т.е. эллипсоид необыкновенного луча описан вокруг сферы обыкновенного луча (эллипсоид скоростей растянут в направлении, перпендикулярном оптической оси).

Пусть плоская световая волна падает нормально к преломляющей грани положительного одноосного кристалла, как показано на рис. 16.13 (оптическая ось  $OO'$  составляет с ней некоторый угол). С центрами в точках  $A$  и  $B$  построим сферические волновые поверхности, соответствующие обыкновенному лучу, и эллипсоидальные — необыкновенному лучу. В точке, лежащей на  $OO'$ , эти поверхности соприкасаются. Согласно *принципу Гюйгенса*, поверхность, касательная к сферам, будет фронтом ( $a—a$ ) обыкновенной волны, а поверхность, касательная к эллипсоидам, — фронтом ( $b—b$ ) необыкновенной волны. Проведя к точкам касания прямые, получим направления распространения обыкновенного ( $o$ ) и необыкновенного ( $e$ ) лучей.

Как видно из рис. 16.13,  $o$ -луч пойдет вдоль первоначального направления, а  $e$ -луч отклонится от первоначального направления.

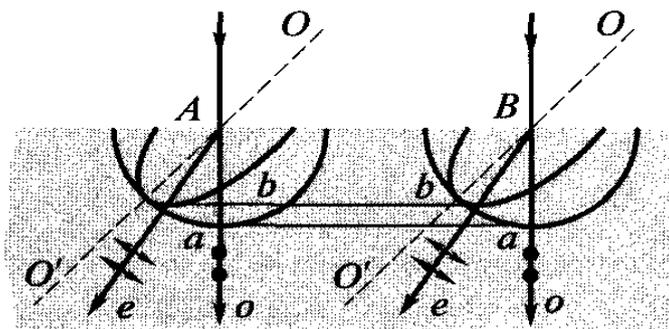
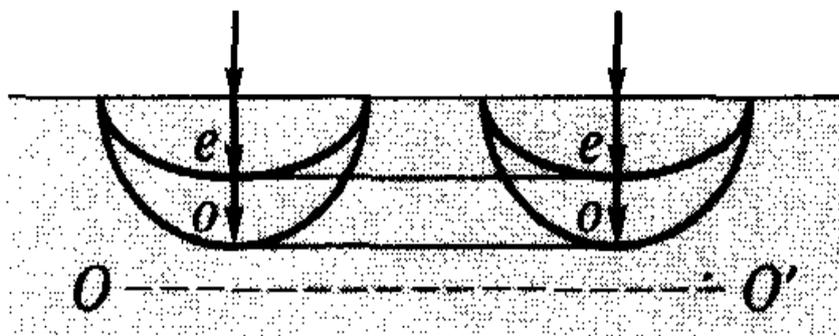


Рис.16.13. Построение  $o$ - и  $e$ -лучей в положительном кристалле (свет падает нормально, оптическая ось составляет с преломляющей поверхностью некоторый угол).

На рис.16.14 показано направление распространения  $o$ - и  $e$ -лучей в положительном кристалле при нормальном падении света на переднюю грань, вырезанную параллельно оптической



оси.

Рис.16.14. Построение  $o$ - и  $e$ -лучей в положительном кристалле (свет падает нормально, оптическая ось параллельна преломляющей поверхности).

### ***Получение и анализ эллиптически поляризованного света***

Пусть пучок естественного света, прошедший сквозь поляризатор  $P$  и ставший на выходе плоскополяризованным, нормально падает на кристаллическую пластинку толщиной  $d$ , вырезанную из одноосного *отрицательного* кристалла *параллельно* его оптической оси  $OO'$  (рис.16.15). Внутри пластинки он разбивается на два луча: обыкновенный ( $o$ ) и необыкновенный ( $e$ ), которые распространяются в *одном направлении* (перпендикулярно оптической оси), но с *разными скоростями*. Колебания вектора  $\vec{E}$  в  $e$ -луче происходят *вдоль* оптической оси кристалла, а в  $o$ -луче — *перпендикулярно* оптической оси. Поскольку в  $o$ - и  $e$ -лучах колебания вектора  $\vec{E}$  *взаимно перпендикулярны*, то на выходе из пластинки получается *эллиптически поляризованный свет*.

В общем случае электрический вектор вышедшего из поляризатора плоскополяризованного луча составляет произвольный угол с оптической осью кристалла

(рис. 16.15). Тогда амплитудные значения электрических векторов в обыкновенном ( $\vec{E}_{o1}$ ) и необыкновенном ( $\vec{E}_{e1}$ ) лучах соответственно равны (рис. 16.16):

$$E_{o1} = E \sin \varphi, \quad E_{e1} = E \cos \varphi. \quad (16.4)$$

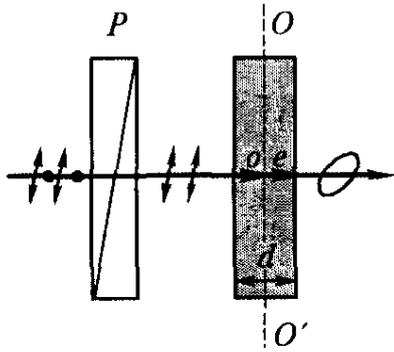


Рис.16.15. Схема получения эллиптически поляризованного света.

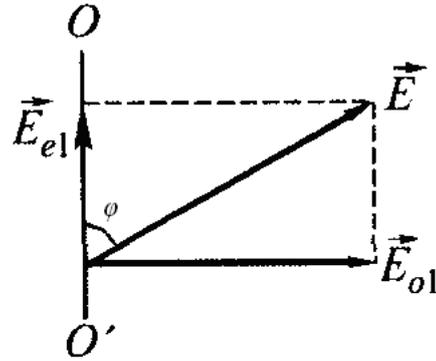


Рис.16.16. Амплитуды  $E_{o1}$  и  $E_{e1}$  обыкновенного и необыкновенного лучей.

Пройдя пластинку толщиной  $d$ , эти лучи приобретают оптическую разность хода  $\Delta = (n_o - n_e)d$ . Разность фаз между колебаниями электрического вектора  $o$ - и  $e$ -лучей на выходе из пластинки:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_o - n_e) d. \quad (16.5)$$

Для лучей, прошедших пластинку, имеем:

$$E_e = E_{e1} \cos \omega t = E \cos \varphi \cdot \cos \omega t, \quad (16.6)$$

$$E_o = E_{o1} \cos(\omega t - \delta) = E \sin \varphi \cdot \cos(\omega t - \delta), \quad (16.7)$$

Исключив из уравнений (16.6) и (16.7) время  $t$ , получим траекторию результирующего колебания:

$$\frac{E_o^2}{E_{o1}^2} = \frac{2E_o E_e}{E_{o1} E_{e1}} \cos \delta + \frac{E_e^2}{E_{e1}^2} = \sin^2 \delta. \quad (16.8)$$

Уравнение (16.8) — уравнение эллипса, ориентация осей которого зависит от направления колебаний, входящих в кристаллическую пластинку, т. е. от угла  $\varphi$  (см. рис. 16.16) и от разности фаз  $\delta$ , вносимой этой пластинкой. Таким образом, в результате прохождения через кристаллическую пластинку (ее ориентация показана на рис. 16.17) плоскополяризованный свет превращается в эллиптически поляризованный.

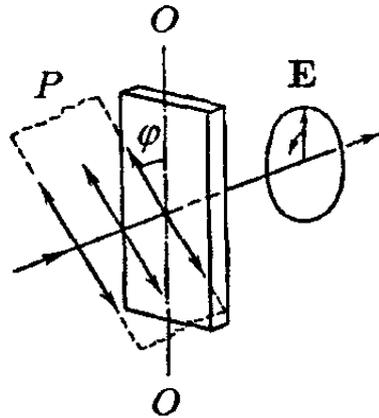


Рис. 16.17. Ориентация плоскости колебаний  $P$  в падающем луче и оси  $OO$  кристаллической пластинки.

### ***Прохождение плоскополяризованного света через кристаллическую пластинку***

Кристаллическую пластинку, вырезанную параллельно ее оптической оси, для которой оптическая разность хода между  $o$ - и  $e$ -лучами составляет

$$(n_o - n_e)d = \pm(m + 1/2)\lambda_0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (16.9)$$

называют *полуволновой* (пластинкой  $\lambda/2$ ). Знак «+» соответствует отрицательному кристаллу, знак «—» — положительному.

Для полуволновой пластинки, согласно (16.5),  $\delta = \pi$  и уравнение (16.8) примет вид:

$$\frac{E_o}{E_{o1}} + \frac{E_e}{E_{e1}} = 0, \quad (16.10)$$

т.е. свет после прохождения пластинки  $\lambda/2$  остается плоскополяризованным, но направление колебаний меняется на угол  $(\pi - 2\varphi)$  (рис.16.18). Колебание  $\vec{E}$  в падающем луче, совершающееся в плоскости  $P$ , возбудит при входе в кристалл колебание  $\vec{E}_o$  обыкновенного луча и колебание  $\vec{E}_e$  необыкновенного луча (рис.16.18). За время прохождения через пластинку разность фаз между колебаниями  $\vec{E}_o$  и  $\vec{E}_e$  изменяется на  $\pi$ . Поэтому на выходе из пластинки фазовое соотношение между обыкновенным и необыкновенным лучами будет соответствовать взаимному расположению векторов  $\vec{E}_e$  и  $\vec{E}'_e$  (на входе в пластинку оно соответствует взаимному расположению векторов  $\vec{E}_e$  и  $\vec{E}_o$ ).

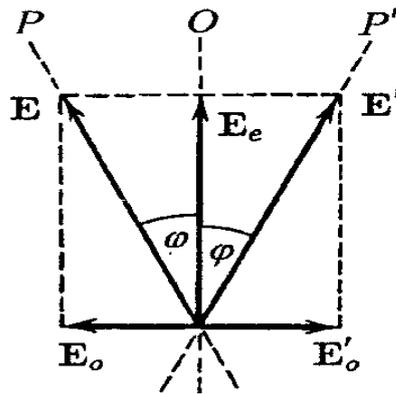


Рис. 16.18. Прохождение плоскополяризованного света через полуволновую пластинку.

Следовательно, свет, вышедший из пластинки, будет поляризован в плоскости  $P'$ . Плоскости  $P$  и  $P'$  расположены симметрично относительно оптической оси пластинки  $O$ . Таким образом, пластинка  $\lambda/2$  поворачивает плоскость колебаний прошедшего через нее света на угол  $2\varphi$  ( $\varphi$  — угол между плоскостью колебаний в падающем луче и осью пластинки).

### *Искусственное двойное лучепреломление*

*Искусственная оптическая анизотропия* — сообщение оптической анизотропии естественно изотропным веществам, если они подвергаются механическим напряжениям, помещаются в электрическое или магнитное поле. В результате вещество приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает с направлениями деформации, электрического или магнитного полей.

**Эффект Керра** — это возникновение двойного лучепреломления в оптически изотропных веществах под действием внешнего однородного электрического поля. Оптически изотропная среда, помещенная в однородное электрическое поле, становится анизотропной и приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого направлена вдоль поля.

Механизм *эффекта Керра* обусловлен различной *поляризуемостью* молекул диэлектрика по разным направлениям. Электрическое поле ориентирует полярные молекулы вдоль поля и индуцирует электрический момент у неполярных молекул. Поэтому показатели преломления (а, следовательно, и скорости распространения в веществе световых волн, поляризованных вдоль и перпендикулярно вектору напряженности электрического поля) становятся различными, и возникает двойное лучепреломление. Общая схема наблюдения этого явления изображена на рис.16.19.

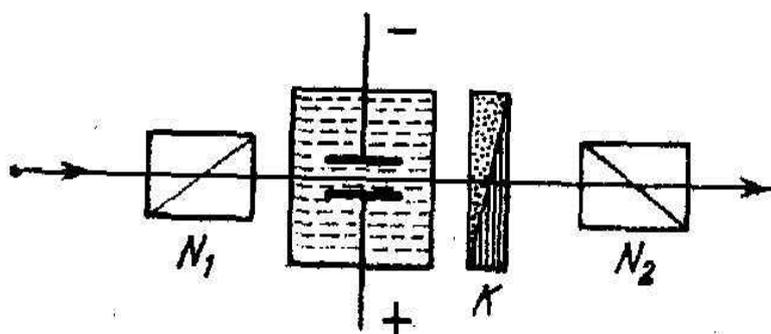


Рис.16.19. Схема расположения приборов для наблюдения двойного лучепреломления в электрическом поле.  $N_1$  и  $N_2$  – скрещенные николи (поляризаторы),

между которыми расположен конденсатор, заполненный исследуемым веществом, К – компенсатор.

В отсутствие внешнего электрического поля свет через систему не проходит. При наложении электрического поля возникает *двойное лучепреломление*, вследствие чего свет по выходе из конденсатора становится эллиптически поляризованным и частично проходит через николю  $N_2$ . С помощью компенсатора К можно измерить разность фаз между лучами, возникающими при двойном лучепреломлении.

В работе между поляризатором и анализатором, направления пропускания которых взаимно перпендикулярны (такие поляризаторы называются скрещенными), располагают *ячейку Керра*.

**Ячейка Керра** представляет собой конденсатор, заполненный прозрачным **изотропным** веществом. Плоскость поляризации падающего на ячейку излучения составляет угол  $45^\circ$  с направлением электрического поля, так что в отсутствие электрического поля свет не проходит через анализатор. При включении поля среда приобретает **анизотропные** свойства, при этом происходит разделение луча на два: обыкновенный ( $o$ ) и необыкновенный ( $e$ ). Оба луча линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Показатели преломления обыкновенного ( $n_o$ ) и необыкновенного ( $n_e$ ) лучей и их скорости в направлении перпендикулярном полю различны. Проходя через вещество, обыкновенный и необыкновенный лучи приобретают разность фаз и, складываясь на выходе, дают в общем случае эллиптически поляризованный свет, частично проходящий через анализатор. Величина фазового сдвига  $\delta$  обыкновенного и необыкновенного лучей анизотропной среды определяется выражением:

$$\delta = \frac{2\pi\ell}{\lambda} \cdot (n_e - n_o), \quad (16.11)$$

где  $\ell$  — длина пути в веществе,  $\lambda$  — длина волны света (в работе она равна 633 нм),  $n_e$  — показатель преломления необыкновенного луча,  $n_o$  — показатель преломления обыкновенного луча.

При разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей, равной  $\frac{\lambda}{2}$  на выходе будет линейно поляризованная волна, плоскость поляризации которой повернута на  $90^\circ$  относительно падающей волны.

В электрических полях, применяемые в работе, величина фазового сдвига пропорциональна квадрату напряженности поля  $E$ :

$$\delta = 2\pi K \ell E^2, \quad (16.12)$$

где  $K$  — *постоянная Керра*, которая зависит от длины волны, температуры, агрегатного состояния вещества, структуры молекул вещества.

Напряженность внешнего электрического поля можно определить, зная прикладываемое напряжение  $U$  и расстояние между пластинами конденсатора  $d$ :

$$E = \frac{U}{d}. \quad (16.13)$$

С учетом формулы (16.13), будем иметь:

$$\delta = \frac{2\pi K \ell U^2}{d^2}. \quad (16.14)$$

Можно показать, что интенсивность света  $I$  на выходе из анализатора:

$$I = I_o \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (16.15)$$

где  $I_o$  — интенсивность света, падающего на анализатор при параллельном положении анализатора и поляризатора и при нулевом электрическом поле;  $I$  — интенсивность света на выходе из анализатора при наличии электрического поля, приложенном к ячейке Керра и направленном под углом  $45^\circ$  к скрещенным анализатору и поляризатору.

Подставляя (16.14) в (16.15), окончательно получим:

$$I = I_o \sin^2 \frac{\pi K l U^2}{d^2}. \quad (16.16)$$

### Описание экспериментальной установки

Общий вид установки для исследования эффекта Керра представлен на рис.16.20.

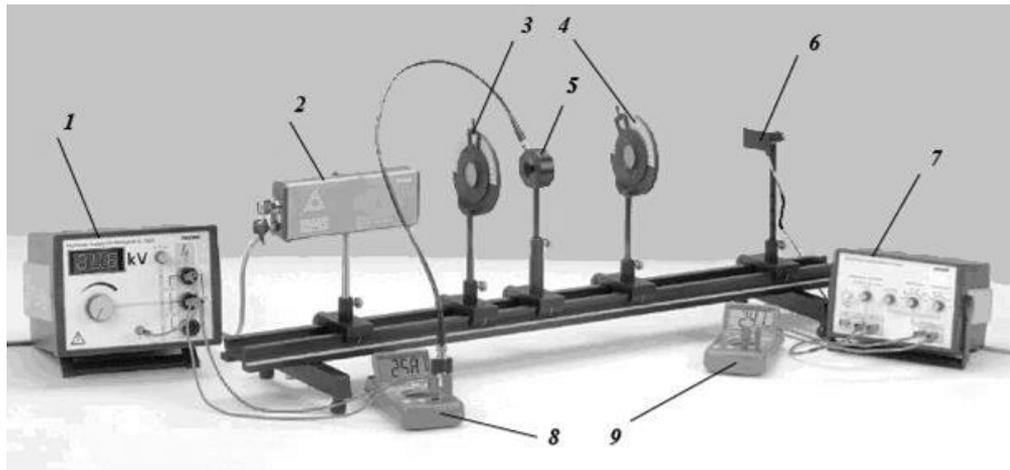


Рис.16.20. Экспериментальная установка для изучения эффекта Керра: 1 – источник высокого напряжения; 2 – He-Ne – лазер; 3 – поляризатор; 4 – анализатор; 5 – ячейка Керра; 6 – фотоэлемент; 7 – универсальный усилитель; 8,9 – цифровые вольтметры.

Эффект Керра исследуется на образце состава  $\text{Pb}_{0,9125}\text{La}_{0,0875}\text{Zr}_{0,65}\text{Ti}_{0,3503}$  (PLZT). Это вещество имеет величину постоянной Керра на два порядка больше, чем у других веществ, которые используются для демонстрации эффекта Керра. Образцы такого состава являются сегнетоэлектриками, внутри они разбиты на домены, определенным образом поляризованные, которые меняют направление поляризации при включении электрического поля.

Устройство ячейки Керра с образцом PLZT внутри показано на рис. 16.21.

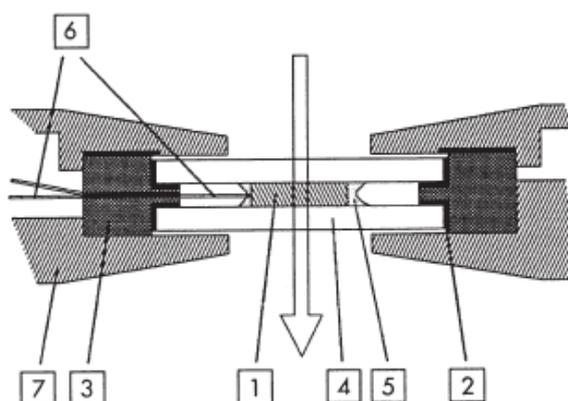


Рис.16.21. Ячейка Керра: 1 – образец PLZT; 2 – силиконовая прокладка; 3 – изолятор; 4 – стеклянная пластина; 5 – канадский бальзам (прозрачный клей); 6 – провод; 7 – оправа.

Длина образца равна 1,5 мм – это соответствует пути  $\ell$  луча света в веществе. Ширина образца – 1,4 мм – это соответствует расстоянию  $d$  между пластинами конденсатора. Ячейка Керра соединяется с источником высокого напряжения (0 – 10 кВ). Параллельно ячейке присоединяется цифровой вольтметр для измерения напряжения, подаваемого на нее. Ячейка Керра устанавливается между поляризатором и анализатором.

В качестве источника излучения используется гелий – неоновый лазер мощностью 1мВт.

Свет от лазера проходит через поляризатор, ячейку Керра и анализатор. Плоскость пропускания поляризатора вертикальна, элемент PLZT устанавливается под углом  $45^\circ$  к вертикали. Плоскость пропускания анализатора устанавливается под углом  $90^\circ$  к плоскости пропускания поляризатора. За анализатором помещается фотодиод с усилителем для регистрации света, прошедшего через анализатор.

Технические характеристики используемых в лабораторной работе приборов необходимо занести в табл. 16.1.

*Таблица 16.1*

### **Технические данные приборов**

Название Прибора	Пределы измерений	Число делений	Цена деления	Класс точности	Абсолютная приборная погрешность
Источник высокого напряжения	0 – 10 кВ				
He–Ne лазер, 1 мВт, 220В					
Цифровой вольтметр					

### Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

**Внимание!** Нельзя во время эксперимента превышать напряжение 1000 В на ячейке Керра, иначе произойдёт разрушение образца PLZT.

Все измерения следует проводить в тёмной комнате.

1. Соберите установку, как показано на рис.16. 20.
2. Включите в сеть He-Ne лазер и дайте ему прогреться 10 – 15 минут (чтобы стабилизировать его излучение).
3. Включите в сеть источник высокого напряжения, универсальный усилитель, цифровые вольтметры и дайте им прогреться 5 – 7 минут.
4. Установите направление пропускания поляризатора и анализатора вертикально, ячейки Керра под углом  $45^\circ$  к вертикали.
5. Измерьте интенсивность света  $I_0$ , вышедшего из анализатора, при нулевом напряжении на ячейке Керра ( $U = 0$  В). Занесите значение  $I_0$  в таблицу 16.2.

6. Установите направления пропускания поляризатора вертикально, анализатора горизонтально, ячейки Керра под углом  $45^\circ$  к вертикали.

7. Исследуйте зависимость величины интенсивности света  $I$ , вышедшего из анализатора, от величины напряжения  $U$ , подаваемого на ячейку Керра.

Интенсивность света оценивается в условных единицах (вольтах), снимаемых с цифрового вольтметра, подключенного к универсальному усилителю. Напряжение на ячейке Керра изменяется от 300 В до 1000 В (**не превышая 1000 В!**) с шагом 50 В. Диапазон измеряемого напряжения и шаг может быть изменен в соответствии с индивидуальным заданием.

8. Занесите полученные экспериментальные результаты в табл. 16.2.

Таблица 16.2

### Экспериментальные результаты

$I_0$ , усл. ед.	$U$ , В	$I$ , усл. ед. (В)	$\frac{I}{I_0}$ , отн.ед.	$U^2$ , В <sup>2</sup>	$\delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}$ , град

### Обработка результатов эксперимента

1. Сделайте расчет величин  $\frac{I}{I_0}$  и  $\delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}$ .

где  $I_0$  — максимальное значение интенсивности света, падающего на анализатор;  
занесите полученные данные в табл. 16.2.

2. Постройте график зависимости фазового сдвига  $\delta$  от напряжения  $U$ , подаваемого на ячейку Керра, в спрямляющих координатах: по оси абсцисс откладывайте  $U^2$ , по оси ординат —  $\delta$  в градусах. Проведите прямую линию, используя полученные экспериментальные точки.

3. Оцените постоянную Керра по тангенсу угла наклона построенной линейной зависимости (см. формулу (16.14)).

4. Постройте график зависимости отношения интенсивностей  $\frac{I}{I_0}$  от напряжения  $U$ , приложенного к ячейке Керра: по оси абсцисс откладывайте напряжение  $U$  в вольтах, а по оси ординат —  $\frac{I}{I_0}$  в относительных единицах.

Экспериментальные точки соедините плавной кривой.

5. Определите по графику  $\frac{I}{I_0}$  от  $U$  напряжение  $U$ , при котором наблюдается первый максимум (так называемое «напряжение  $\frac{\lambda}{2}$ »). При этом напряжении внешнего электрического поля разность фаз обыкновенного и необыкновенного лучей, прошедших образец, становится равной  $180^\circ$ . Следовательно, этому напряжению соответствует первый максимум на графике.

6. Оцените по графику ошибку в определении постоянной Керра.

7. Запишите и обсудите окончательный результат.

## Библиографический список

### *а) основной*

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики: учебник для вузов. В 3 т. Т 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. / И.В. Савельев. – СПб.: Лань, 2006, 328 с.

2. *Капуткин Д.Е., Шустков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. – М.: МИСиС, 2007, 108 с.

### *б) дополнительный*

3. *Ландсберг Г.С.* Оптика: учеб. пособие для студ. физических спец. вузов. – 99е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2003, 848 с.

## Контрольные вопросы

1. Что называется поляризацией света?
2. Что такое линейно поляризованная волна?
3. Что такое эллиптически поляризованная волна?
4. Что называют обыкновенным и необыкновенным лучами?
5. Какова оптическая разность хода о- и е- лучей при прохождении ячейки Керра, от чего она зависит?
6. Какова зависимость фазового сдвига о- и е- лучей от напряженности электрического поля в ячейке Керра?
7. В чем заключается эффект Керра? От чего зависит постоянная Керра?