

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

## **Поляризация света. Закон Малюса**

*Методические указания  
по курсу общей физики*

Составитель: *О. Я. Березина*, ст. преподаватель

Рецензент: *С. А. Чудинова*, доцент, кандидат физ.-мат. наук

Петрозаводск  
2007

### Цель работы:

- 1) Определить плоскость поляризации лазерного луча;
- 2) Определить зависимость силы света, прошедшего через поляризатор, от углового положения поляризатора;
- 3) Проверить закон Малюса.

**Принадлежности:** Лазер гелий-неоновый (1 мВт), оптическая скамья, поляризатор в держателе с поворотным устройством, фотоэлемент, цифровой мультиметр.

### Введение

#### 1. Естественный и поляризованный свет

Световые волны имеют электромагнитную природу. Структура электромагнитной волны может быть очень сложной. Наиболее простой является плоская гармоническая волна, описываемая следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = \mathbf{E}_m \cos(\omega t - \mathbf{k}r) \\ \mathbf{H} = \mathbf{H}_m \cos(\omega t - \mathbf{k}r) \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_m$  и  $H_m$  – амплитуды колебаний векторов напряженности электрического и магнитного полей волны;  $\omega$  – круговая частота колебаний;  $k$  – волновой вектор. Известно, что  $\omega = 2\pi/T$ ;  $k = \omega/v$ ;  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $T$  – период колебаний,  $\lambda$  – длина волны,  $v$  – скорость распространения волны. Для слабых полей  $E_m \approx 10^{-2}$  В/см, в лазерных пучках  $E_m \approx 10^6$  В/см.

Волна, описываемая уравнениями (1), является монохроматической. Моментальный снимок волны, распространяющейся вдоль оси  $Z$ , показан на рисунке 1.

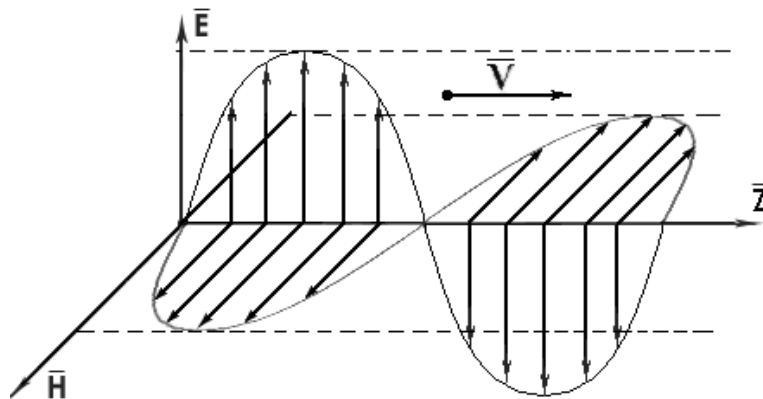


Рис.1. Моментальный снимок волны

Основные свойства волны:

- $\mathbf{E} \perp \mathbf{H} \perp \mathbf{v}$ ,  
 $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{v}$  – правая тройка векторов.
- Колебания электрического и магнитного полей происходят в одной фазе.
- $\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H$ , (2)  
где  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды,  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные.
- Скорость электромагнитных волн зависит от диэлектрических и магнитных свойств среды:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0 \mu\mu_0}}. \quad (3)$$

Распространение электромагнитной волны связано с переносом энергии. Перенос энергии характеризуется *вектором плотности потока энергии* (вектор Умова – Пойнтинга):

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}].$$

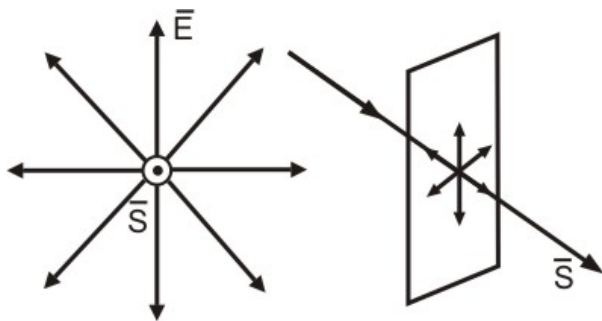
Направление вектора  $\mathbf{S}$  определяет направление переноса энергии, т.е. светового луча.

За интенсивность ( $I$ ) волны принимается среднее значение плотности потока энергии:

$$I = \varepsilon\varepsilon_0 \tilde{E}^2 \quad \text{или} \quad I = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 v E_m^2 \quad (4)$$

При распространении волны, описываемой уравнением (1), во всех точках светового луча вектор  $\mathbf{E}$  колеблется вдоль фиксированного направления, параллельного  $\mathbf{E}_m$ . Свет, электрический вектор которого колеблется вдоль некоторого фиксированного направления, называется *линейно поляризованным* (ЛПС) или плоско поляризованным. Плоскость, в которой все время лежит вектор  $\mathbf{E}$ , а также расположена нормаль к фронту волны (или вектор  $\mathbf{S}$ ), называется *плоскостью колебаний* или *плоскостью поляризации*.

Излучение обычных источников света не поляризовано. В *естественном свете* все направления колебаний вектора  $\mathbf{E}$  в плоскости, ортогональной направлению распространения света, представлены в равной степени (рис. 2). Связано это с тем, что в случае спонтанного излучения различные атомы источника испускают отдельные цуги волн независимо друг от друга в случайные моменты времени. Процесс излучения отдельного атома длится  $10^{-8} - 10^{-8}$  с. Фазы колебаний и направления поляризации в излучении различных атомов не скоррелированы друг с другом.



Кроме линейной существуют и другие типы поляризации: свет, в котором концы векторов  $\mathbf{E}$  в каждой точке волнового поля описывают со временем эллипс, называется *эллиптически поляризованным*; свет, в котором концы векторов  $\mathbf{E}$  в каждой точке волнового поля описывают со временем окружность, называется *циркулярно поляризованным*.

Рис. 2. Все направления колебаний вектора  $\mathbf{E}$  в естественном свете равновероятны.

## 2. Поляризаторы. Закон Малюса

Линейно поляризованный свет получают, пропуская естественный свет через оптические *поляризаторы*. Плоскость, в которой колеблется вектор  $\mathbf{E}$  в волне, прошедшей через поляризатор, называется *плоскостью пропускания* или *главной плоскостью* поляризатора (рис. 3).

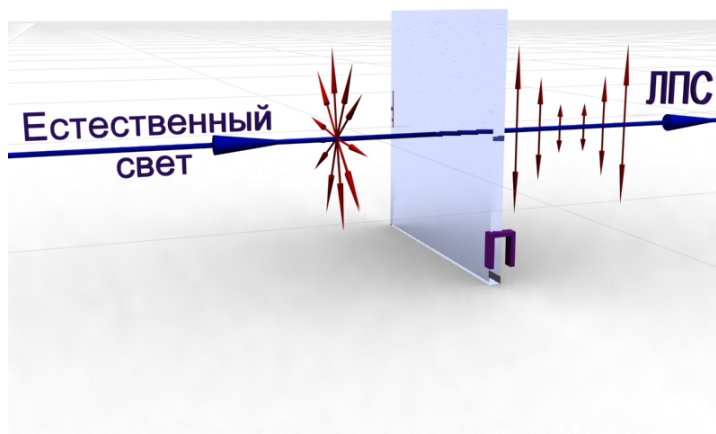


Рис. 3. Действие поляризатора. П – плоскость пропускания поляризатора

Если поляризатор используется для анализа характера поляризации, то его называют *анализатором*.

Рассмотрим прохождение через анализатор линейно поляризованной волны. Пусть  $E_0$  и  $I_0$  – вектор амплитуды и интенсивность света, падающего на анализатор;  $E_1$  и  $I_1$  – вектор амплитуды и интенсивность света, прошедшего через анализатор;  $\varphi$  – угол между плоскостью пропускания анализатора и плоскостью колебаний электрического поля  $E_0$  падающей волны (рис.4).

Из рис.4 видно, что пропускаемая анализатором амплитуда  $E_1 = E_0 \cos \varphi$ . Составляющая  $E_2$  не пройдет через анализатор. Так как интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды ( $I \sim E_m^2$ ), то  $I_1 = I_0 \cos^2 \varphi$  (4).

Формула (4) дает содержание *закона Малюса*. Если на анализатор падает естественный или циркулярно поляризованный свет, то угол « $\varphi$ » изменяется со временем, и в результате усреднения

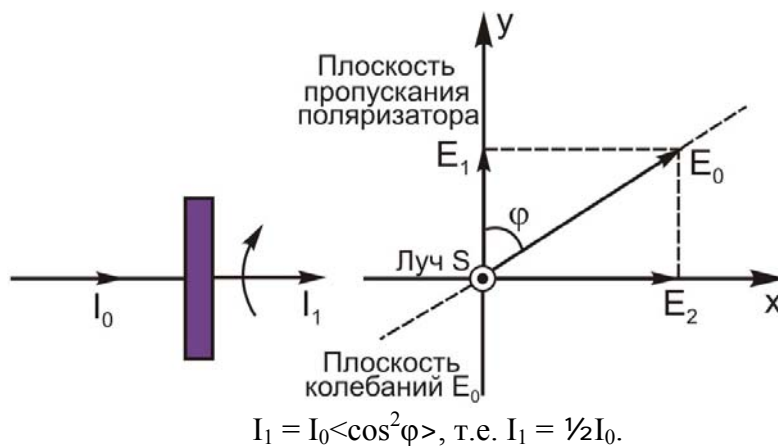


Рис.4(2). Закон Малюса

### 3. Анализ состояния поляризации света

На практике часто возникает необходимость выяснить, каков характер поляризации исследуемого света. Линейно поляризованный свет можно идентифицировать с помощью поляризатора, если вращать его в своей плоскости вокруг направления пучка (рис. 4а).

При этом поворачивается плоскость пропускания поляризатора и изменяется угол  $\varphi$  (рис. 4). В соответствии с законом Малюса будет изменяться интенсивность  $I_1$  света, прошедшего через поляризатор. При некотором положении поляризатора ( $\varphi = 90^\circ$ ), свет полностью гасится ( $I_1 = 0$ ). Данный факт говорит о том, что исследуемый пучок имеет линейную поляризацию.

### 4. Двойное лучепреломление

В кристаллических твердых телах наблюдается анизотропия многих физических свойств. Почти все прозрачные кристаллические диэлектрики оптически анизотропны. Оптическая анизотропия заключается в зависимости диэлектрической проницаемости вещества  $\epsilon$  от направления в кристалле. Физическая природа анизотропии связана с зависимостью от направления поляризуемости молекул, а также с особенностями кристаллической решетки, в узлах которой находятся атомы или ионы. В одних направлениях заряды в атомах под действием электрического поля волны смещаются легче, чем в других. Так как показатель преломления  $n = \sqrt{\epsilon}$ , то от направления вектора  $E$  волны оказываются зависящими и  $n$ , и скорость распространения волны  $v = c/n$ . Анизотропия диэлектрической проницаемости может возникать и в аморфных твердых телах, и в жидкостях при направленном внешнем воздействии, таком как внешнее электрическое поле (эффект Керра) или односторонняя деформация.

Вследствие оптической анизотропии возникают явления, называемые *двойным лучепреломлением* – падающий на кристалл пучок света разделяется внутри кристалла на два пучка, распространяющиеся в разных направлениях и с разными скоростями.

Кристаллы существуют одноосные (кварц, исландский шпат, турмалин) и двуосные (слюда). *Оптической осью* называется выделенное направление (а не прямая линия) в кристалле, вдоль которого свет распространяется с одинаковой скоростью, независимо от направления колебаний вектора  $\mathbf{E}$ . В направлении оптической оси анизотропия оптических свойств не проявляется. Любую плоскость, проходящую через оптическую ось и луч, называют *главной плоскостью* или *главным сечением* кристалла.

У одноосных кристаллов один из преломленных пучков подчиняется обычному закону преломления ( $\sin\alpha / \sin\beta = n_2/n_1$ ), он называется обыкновенным (o). Другой пучок не подчиняется обычному закону преломления и называется необыкновенным (e). Он, как правило, не лежит в плоскости падения и даже при нормальном падении света на кристалл может отклоняться от нормали (рис.5).

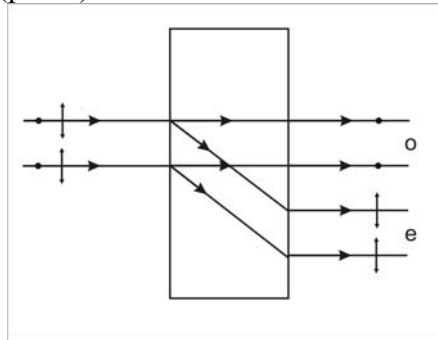
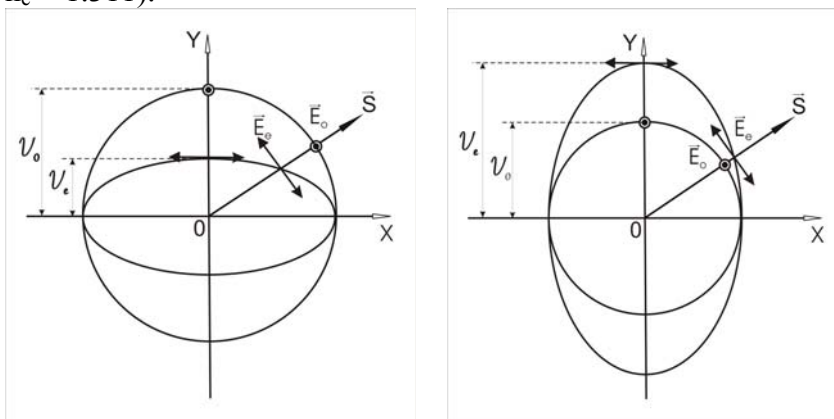


Рис. 5. Двойное лучепреломление в одноосном кристалле

Обыкновенная и необыкновенная волны линейно поляризованы. Направление колебаний вектора  $\mathbf{E}$  в обыкновенной волне перпендикулярно главному сечению кристалла; в необыкновенной волне – параллельно главному сечению (см. рис.5).

Скорость  $v_o$  обыкновенного луча не зависит от направления в кристалле, его *волновая поверхность* (или *поверхность лучевых скоростей*) представляет собой *сферу*. Показатель преломления обыкновенного луча  $n_o = c/v_o$ . Скорость необыкновенного луча равна  $v_o$  в направлении оптической оси. По мере отклонения от оптической оси скорость постепенно возрастает до значения  $v_e$  в направлении, перпендикулярном оптической оси, в случае *положительного* кристалла и убывает до  $v_e$  в случае *отрицательного* кристалла. *Волновая поверхность* необыкновенного луча представляет собой *эллипсоид вращения* с полуосями  $v_o$  и  $v_e$ . Показатель преломления необыкновенного луча, перпендикулярного оптической оси,  $n_e = c/v_e$ . Т.о. одноосные кристаллы подразделяются на положительные ( $v_o > v_e$ ;  $n_o < n_e$ ) и отрицательные ( $v_o < v_e$ ;  $n_o > n_e$ ) (см. рис.6). Например, исландский шпат является отрицательным кристаллом ( $n_o = 1.658$ ,  $n_e = 1.486$ ), а кварц – положительным ( $n_o = 1.309$ ,  $n_e = 1.311$ ).



а)

б)

Рис.6. Лучевые поверхности обыкновенной и необыкновенной волн в одноосных кристаллах: а) положительный кристалл; б) отрицательный кристалл

## Основные особенности обыкновенной и необыкновенной волн:

	<b>Обыкновенная волна</b>	<b>Необыкновенная волна</b>
1	Волновая поверхность – сфера	Волновая поверхность – эллипсоид вращения
2	Вектор <b>E</b> перпендикулярен главному сечению	Вектор <b>E</b> лежит в плоскости главного сечения, составляя разные углы с оптической осью
3	Скорость волны по любому направлению $v_o = c/n_o = c/\sqrt{(\epsilon_{\perp})}$	Скорость волны зависит от направления $v_o \leq v \leq v_e$ или $v_e \leq v \leq v_o$ (в зависимости от знака кристалла)

### 5. Поляризационные устройства

Для получения линейно поляризованного света используются устройства, работа которых основана на особенностях распространения света в анизотропной среде. В принципе поляризатором может быть отдельный кристалл, в котором наблюдается двойное лучепреломление. Выделив обыкновенную или необыкновенную волну, получим свет линейной поляризации. Действие двокопреломляющего кристалла как поляризатора видно из рис.5.

Но кристалл должен быть однородным и достаточной толщины, а световой пучок узким. В противном случае не получим пространственного разделения пучков.

Наибольшее распространение получили комбинации кристаллов, называемые поляризационными призмами. Рассмотрим призму, изобретенную Николем. Ее часто называют просто «николь». Призма изготавливается из двух половинок кристалла исландского шпата, склеенных канадским бальзамом, который образует тонкий прозрачный слой с показателем преломления « $n$ », имеющим промежуточное значение между  $n_o$  и  $n_e$ :  $n_o < n < n_e$ . Для обыкновенного луча канадский бальзам представляет собой оптически менее плотную среду, для необыкновенного – более плотную, чем исландский шпат. Кристалл вырезается так, чтобы обыкновенный луч испытывал полное отражение на границе с бальзамом. Необыкновенный же луч частично проходит, и в результате выходящий из николя луч оказывается полностью поляризованным. Ход луча через призму Николя изображен на рис. 6.

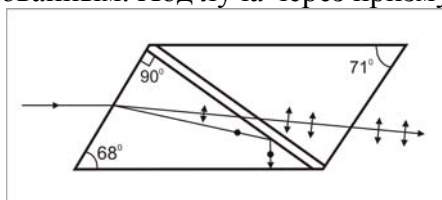


Рис. 6. Призма Николя.

Кроме призм для получения поляризованного света используются устройства, действие которых основано на явлении *дихроизма*, заключающемся в зависимости поглощения света от направления колебаний электрического поля. Сильным дихроизмом обладают кристаллы турмалина, в которых обыкновенный луч поглощается значительно больше необыкновенного. Уже при толщине пластинки турмалина порядка 1 мм выходящий из нее свет будет практически полностью поляризован. Но для некоторых участков спектра и необыкновенный луч поглощается, что ограничивает применение турмалина в качестве поляризатора.

В настоящее время широкое распространение получили устройства из синтетических материалов, названные *поляроидами*. Поляроид представляет собой целлулоидную пленку, прозрачную для видимого света, в которую вкраплены ориентированные микрокристаллики сильно дихроичного вещества герпатита или его соединений. Таким способом получают листы большой площади, обеспечивающие высокую степень поляризации проходящего света при больших апертурах. Поляроиды работают во всей видимой области спектра. Недостатки поляроидов связаны со спектральной селективностью поглощения

герпатита, из-за чего пленка получается неодинаково прозрачной для лучей разного цвета. Проходящий через поляририд видимый свет приобретает фиолетовый оттенок

### Экспериментальная установка

Общий вид установки представлен на рис.7. Она состоит из лазера He-Ne, поляризатора в поворотном устройстве с транспортиром, фотоэлемента и мультиметра, регистрирующего ток фотоэлемента. Сила тока фотоэлемента прямо пропорциональна интенсивности света, освещающего фотоэлемент.



Рис. 7. Экспериментальная установка

Перед началом работы лазер необходимо разогреть в течение 30 мин. Затем проверить юстировку установки, т.е. убедиться, что фотоэлемент полностью освещен.

При проведении эксперимента в незатемненной комнате следует определить фоновый ток  $i_0$  при выключенном лазере. В дальнейшем полученное значение необходимо учитывать при расчетах.

### Ход работы

1. Измерьте фоновый ток  $i_0$ , перекрывая лазерный луч экраном, до начала измерений и после их окончания. Результаты усредните.
2. Поворачивая поляризатор с шагом в  $5^\circ$  между положениями  $\alpha = \pm 90^\circ$ , определите соответствующий ток фотоэлемента  $i$ . Повторите измерения 3 – 5 раз. Результаты усредните.
3. Постройте график зависимости  $(i_{cp} - i_0)$  от  $\alpha$ . Найдите угол  $\alpha$ , при котором интенсивность света, прошедшего через поляризатор, максимальна. При таком положении поляризатора его плоскость пропускания совпадает с плоскостью колебаний вектора  $E$  лазерного луча, т.е. угол  $\varphi = 0$ .
4. Рассчитайте значения  $\varphi$ , соответствующие измеренным положениям поляризатора  $\alpha$ .
5. Постройте график зависимости  $(i - i_0)/(i_{max} - i_0)$  от  $\cos^2\varphi$ .
6. Сделайте выводы.

Таблица результатов.

$\alpha,^\circ$	$i_1, \text{мкА}$	$i_2, \text{мкА}$	$i_3, \text{мкА}$	$i_{cp} - i_0, \text{мкА}$	$\varphi,^\circ$	$\cos^2\varphi$	$(i_{cp} - i_0)/(i_{max} - i_0)$

### **Контрольные вопросы**

1. Запишите уравнения электромагнитной волны. Перечислите свойства электромагнитных волн.
2. Чем линейно-поляризованный свет отличается от естественного? Что называется плоскостью поляризации света?
3. Выведите закон Малюса.
4. Как практически можно отличить линейно-поляризованный свет от естественного?
5. Что такое оптическая анизотропия?
6. Когда наблюдается и в чем заключается двойное лучепреломление?
7. В чем отличие обыкновенного и необыкновенного лучей?
8. Что такое дихроизм?
9. Какие поляризационные устройства вам известны? Объясните принципы их действия.

### **Литература**

1. Матвеев А. Н. Оптика / *А. Н. Матвеев*. М. Высшая школа. 1985. Гл. 8.
2. Ландсберг Г. С. Оптика / *Г. С. Ландсберг*. М.: Физматлит. 2003. Гл. II, XVII XXVI.
3. Иродов И. Е. Волновые процессы / *И. Е. Иродов*. М. БИНОМ. Лаборатория знаний. 2004. Гл.6.
4. Бутиков Е. И. Оптика / *Е. И. Бутиков*. С.-П-г. Невский диалект. 2003. Гл. 4.