

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Цель работы – экспериментально проверить формулы Френеля при отражении поляризованного излучения от стеклянной пластинки, определить угол Брюстера, показатель преломления стекла и плоскости колебания светового вектора \vec{E} .

Краткие теоретические сведения

1. Естественный и поляризованный свет. Поляризаторы

Как известно, свет представляет собой поперечную электромагнитную волну. Световые волны бывают естественными и поляризованными, в которых (в отличие от естественных) колебания вектора \vec{E} каким либо образом упорядочены. Способы упорядочения, а в соответствии с ними и виды поляризации проанализированы в [1, § 134]. Оптические приспособления, с помощью которых свет поляризуется, называются *поляризаторами*. Их устройство рассмотрено в [1, § 136 и 2, § 77].

2. Отражение плоской линейно поляризованной волны от диэлектрической пластинки

При рассмотрении данного вопроса обычно падающую волну представляют в виде суперпозиции двух волн $E_{\parallel 0}$ и $E_{\perp 0}$, электрические векторы которых колеблются соответственно в плоскости падения волны и перпендикулярно к ней (рис. 1). Зависимость амплитуд отраженной и преломленной волн от угла падения описывается *формулами Френеля*.

Так, например, амплитуды отраженных волн E'_{\parallel} и E'_{\perp} согласно этим формулам

$$\begin{aligned} E'_{\parallel} &= E_{\parallel 0} \frac{\operatorname{tg}(\theta_1 - \theta_2)}{\operatorname{tg}(\theta_1 + \theta_2)} \\ E'_{\perp} &= E_{\perp 0} \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \end{aligned} \quad (1)$$

и имеют различную зависимость от угла падения. Здесь n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления воздуха и стекла; θ_1 и θ_2 – углы соответственно падения и преломления волны.

Из формул Френеля (1) следует, что при $\theta_1 + \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ амплитуда отраженной волны E'_{\parallel} становится равной нулю, а отраженный свет имеет только компонент E'_{\perp} , т.е. является полностью поляризованным. Величина

угла падения, при котором это происходит, находится из условия $\operatorname{tg} \theta_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1}$. Последнее соотношение носит название *закона Брюстера*. Электронная трактовка этого закона дана в [3, § 1.5.3].

Так как углы θ_1 и θ_2 в (1) связаны законом преломления света, то θ_2 можно выразить через θ_1 и таким образом амплитуды отраженных волн представить в виде функций угла падения θ_1 . На рис. 2 показаны

график функций: $\frac{E'_{\parallel}}{E_{\parallel 0}} = f_1(\theta_1)$ и $\frac{E'_{\perp}}{E_{\perp 0}} = f_2(\theta_1)$, рассчитанных для случая, когда $n_1 = 1$ и $n_2 = 1,5$.

Как видно из рис. 2, кривые зависимостей для \perp и \parallel поляризаций существенно различаются, что позволяет по результатам эксперимента определить плоскость поляризации падающей волны, величину угла Брюстера и показатель преломления стекла.

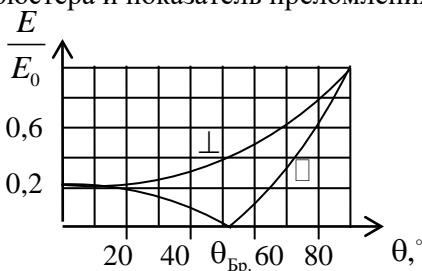


Рис. 2

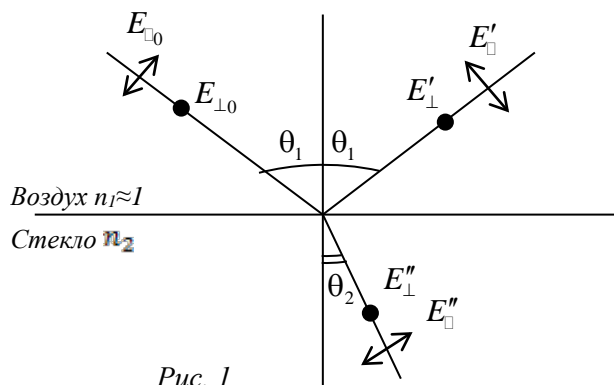


Рис. 1

3. Прохождение линейно поляризованной волны через пластинку из одноосного кристалла

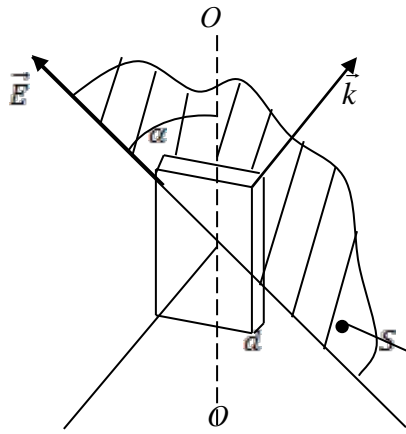


Рис. 3

Пусть плоская линейно поляризованная волна падает нормально на пластинку, вырезанную из одноосного кристалла. Пластинка вырезана так, что ее входная и выходная грани параллельны оптической оси кристалла OO (рис. 3). Для удобства на рис. 3 изображены только волновой \vec{k} и электрический \vec{E} векторы световой волны. Плоскость колебания вектора \vec{E} составляет с оптической осью кристалла угол α .

Как известно [1, § 136], упавшая на однородный кристалл световая волна разделяется внутри него на две волны: *обыкновенную* и *необыкновенную*. Скорость и направление распространения их можно определить с помощью построений Гюйгенса. Эти построения показывают, что в рассматриваемом случае обе волны распространяются в одном и том же направлении, но с разными скоростями. После прохождения пластинки колебания обыкновенной и необыкновенной волн приобретают разность фаз $\delta = 2\pi(n_o - n_e)\frac{d}{\lambda}$, где d – толщина пластинки, λ_0 – длина волны света в вакууме, n_o и n_e – показатели преломления соответственно обыкновенной и необыкновенной волн. Пластинка, для которой разность хода обыкновенной и необыкновенной волн $\Delta = d(n_o - n_e) = m\lambda_0 + \frac{\lambda_0}{4}$ ($m=0, 1, 2, 3\dots$), называется *пластинкой в четверть волны*.

После прохождения такой пластинки обыкновенная и необыкновенная волны приобретут разность фаз $\frac{\pi}{2}$ и, если они одинаковы по амплитуде ($\alpha = 45^\circ$), то, складываясь на выходе из пластинки, дают *поляризованную по кругу волну*. При других значениях α получается *эллиптически* или *линейно* поляризованный свет.

4. Прохождение линейно поляризованной волны через поляризатор. Закон Малюса

Если линейно поляризованная световая волна падает нормально на поляризатор так, что плоскость колебаний ее вектора \vec{E} составляет с плоскостью пропускания поляризатора угол α (рис. 4), то интенсивность прошедшей волны I определяется выражением

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

где I_0 – интенсивность падающего света.

Это соотношение называется *законом Малюса*.

Зная плоскость поляризатора и наблюдая интенсивность прошедшего света, можно по закону Малюса определить плоскость колебаний исследуемого линейного поляризованного света.

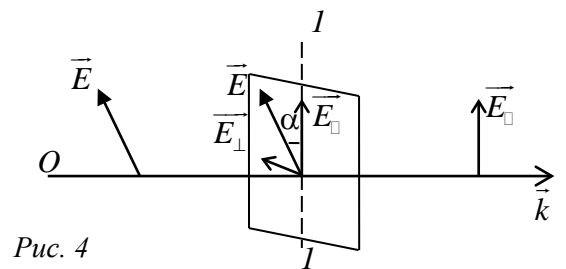


Рис. 4

Методика измерений

1. Измерение интенсивности и амплитуды световой волны.

Под интенсивностью I понимается усредненная величина модуля плотности потока энергии световой волны

$$I = \langle |\vec{S}| \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m^2, \quad (3)$$

где ϵ_0 и μ_0 – соответственно электрическая и магнитная постоянные; E_m – амплитуда световой волны.

Интенсивность и амплитуда световой волны в настоящей работе измеряются с помощью приемника излучения, в котором используется вентильный фотоэффект. Приемник состоит из фотоэлектрического датчика, преобразующего световой поток в фотоЭДС, и вольтметра для измерения последней.

Пропорциональность между фотоЭДС и интенсивностью световой волны (при слабых интенсивностях) следует из законов внутреннего фотоэффекта.

Таким образом, интенсивность световой волны оказывается пропорциональной показаниям вольтметра $I \sim U$, а ее амплитуда – корню квадратному из показаний прибора $E_m \sim \sqrt{U}$.

2. Определение вида поляризации световой волны.

Методика установления вида поляризации световой волны изложена в [1, § 138]. В качестве примера будет кратко рассмотрена методика идентификации только линейно и эллиптически поляризованных волн, с которыми чаще всего сталкивается студент, выполняя работу.

Линейно поляризованная волна легко узнается при пропускании ее через поляризатор. Как отмечалось ранее, интенсивность прошедшего света в этом случае подчиняется закону Малюса: $I = I_0 \cos^2 \alpha$. Вращая анализатор в плоскости, нормальной к направлению распространения волны, можно найти два его характерных положения: в первом интенсивность прошедшего света максимальна, во втором (отличающемся на 90° от первого) – нулевая. Для полной убедительности закон (2) может быть проверен в полном объеме.

Эллиптически поляризованный свет таким способом нельзя идентифицировать однозначно. При пропускании через поляризатор эллиптически поляризованной волны также существует зависимость интенсивности прошедшего света от углового положения поляризатора, хотя полного погашения не наблюдается. Однако точно так же ведет себя и частично поляризованная волна. Для уточнения вида поляризации исследуемую волну можно пропустить через четвертьволновую пластинку. После прохождения пластинки эллиптически поляризованная волна (при определенном угле α) преобразуется в линейно поляризованную. Частично поляризованная волна при этом своей поляризацией не изменит.

Описание экспериментальной установки

Основу экспериментальной установки составляет измерительная головка с оптическими элементами и лимбом 1 (рис. 5). Она может быть установлена в двух положениях:

- а) вертикальном – для снятия зависимости амплитуды отраженной волны от угла падения;
- б) горизонтальном – для проверки закона Малюса и вида поляризации световой волны.

В верхней части головки установлены плоскопараллельная стеклянная пластинка 2, первый фотоприемник 3, экран 4. В нижней ее части – полярироид 6 и второй фотоприемник 5. Фотоприемники соединены с вольтметром 10.

В качестве источника поляризованного света используется **He – Ne** лазер, состоящий из источника питания 7, газоразрядной трубки 8 и зеркал резонатора 9. Принцип работы и устройство лазера кратко изложены в

[2, § 120, 122]. Длина волны лазерного излучения $\lambda = 0,63$ мкм, расходимость пучка $30''$, мощность ~ 1 мВт.

На переднем торце лазера нарисованы взаимно перпендикулярные линии I и II; вдоль одной из них происходят колебания светового вектора \vec{E} . В установке предусмотрена возможность изменения направления колебания светового вектора относительно диэлектрической пластинки путем вращения лазера вокруг своей оси.

Внимание! Попадание в глаз прямого лазерного пучка опасно для зрения! Свет лазера можно наблюдать только после отражения от рассеивающих поверхностей.

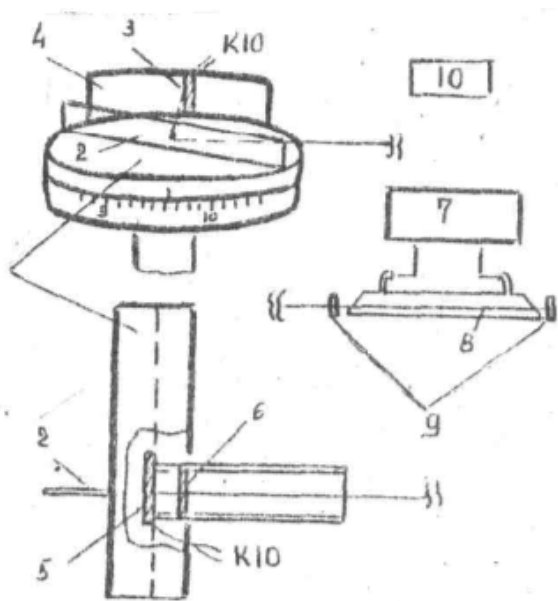


Рис. 5

Порядок выполнения работы

- Согласно инструкции на рабочем месте снять экспериментальные зависимости $\frac{I_{\parallel}}{I_0}$ и $\frac{I_{\perp}}{I_0}$ от угла падения. Результаты измерений занести в *таблицу 1*.

Таблица 1

Ориентация	Угол													
	θ^0	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
\perp , $U_{0\perp} = .$	U	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	$\frac{I_{\perp}}{I_0}$ эксп.													
	$\frac{I_{\perp}}{I_0}$ теор.													
\parallel , $U_{0\parallel} = .$	U	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	$\frac{I_{\parallel}}{I_0}$ эксп.													
	$\frac{I_{\parallel}}{I_0}$ теор.													

2. Дополнительное задание

Согласно инструкции на рабочем месте снять зависимость интенсивности прошедшего через поляризатор линейно поляризованного света от углового положения поляризатора. Результаты измерения занести в *таблицу 2*.

Таблица 2

α^0	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
U
$\cos^2 \alpha$																		

Поставить на пути лазерного пучка четвертьволновую пластинку, получить эллиптически поляризованную волну. Используя вторую четвертьволновую пластинку и поляризатор, исследовать поляризацию полученной волны.

Обработка экспериментальных данных

- По данным измерений найти угол Брюстера. Определить и отметить в *табл. 1*, с какой из компонент (\parallel или \perp) мы имеем дело в строке I и II *табл. 1*. (Отождествление компонентов приводится по *рис. 2*). Сделать вывод о плоскости колебания вектора \vec{E} лазерного пучка.
- По найденному значению угла Брюстера определить показатель преломления стеклянной пластинки согласно (2).
- По показаниям прибора найти относительные интенсивности световых волн.
- По формулам Френеля (1), используя формулу (3) и закон преломления света, рассчитать зависимость интенсивности отраженных волн от угла падения. Результаты расчета занести в соответствующий раздел *табл. 1*.
- По данным *табл. 1* построить графики теоретической и экспериментальной зависимости интенсивностей отраженных волн от угла падения. Сделать вывод о подтверждении теории.

Дополнительное задание

1. Используя экспериментальные данные *табл. 2*, построить график зависимости интенсивности прошедшего света от $\cos^2 \alpha$. Проверить закон Малюса.
2. Описать опыт с четвертьволновой пластинкой.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой световая волна? Основные характеристики монохроматической волны.
2. Какой свет называется естественным, поляризованным? Может ли быть поляризованной продольная волна?
3. Какие виды поляризации света вы знаете? Что такое плоскость колебаний?
4. Какие вы знаете поляризационные устройства? Что такое плоскость пропускания поляризатора?
5. Какой свет называется частично поляризованным?
6. Степень поляризации света. Какой смысл имеют I_{\max} и I_{\min} ?
7. Особенности прохождения поляризованного света через поляризатор. Закон Малюса.
8. Что такое $\overline{E_{\parallel}}$ и $\overline{E_{\perp}}$?
9. Откуда вытекают формулы Френеля?
10. Формулы Френеля для отраженных и преломленных волн.
11. Закон Брюстера. Его объяснение с точки зрения электронной теории.
12. Что такое обыкновенная и необыкновенная волна? Укажите плоскость их колебания.
13. Сформулируйте принципы работы оптического квантового генератора.
14. Объясните устройство и принцип работы $He - Ne$ лазера.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М.: Наука, 1982.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.4. – М.: Наука, 1985.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.; Наука, 1972.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. – М.: Наука, 1982.

Составители: Бригинец В.П., Гусева О.А., Моисеенко В.И., Пугач О.В.