

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

Рассмотрено и рекомендовано к печати на заседании  
редакционной комиссии по отрасли науки и техники  
«Общая и ядерная физика» 2 сентября 2006 года

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Петрозаводского государственного университета

## **ОТРАЖЕНИЕ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ОТ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА**

*Методические указания  
к лабораторной работе*

Составители:

*Чудинова С. А.*, к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики

Рецензент:

*Назаров А. И.*, профессор, доктор педагогических наук

Петрозаводск  
2007

© Петрозаводский государственный университет, 2007

## Отражение линейно поляризованного света от поверхности диэлектрика

### Задача:

изучить теорию Френеля для отражения и преломления света на границе двух диэлектриков, исследовать энергетические соотношения при отражении и преломлении и проверить изменение поляризации волны.

### Цель работы:

1. Получить на опыте зависимость коэффициентов отражения от угла падения для двух случаев поляризации падающей волны (параллельно и перпендикулярно плоскости падения).
2. Рассчитать зависимость коэффициентов отражения от угла падения по формулам Френеля и сравнить с опытом.
3. Определить угол полной поляризации (угол Брюстера).
4. Изучить экспериментально зависимость угла поворота плоскости поляризации при отражении.

### Принадлежности:

лазер He-N (1 мВт); два поляроида; призма из флинтгласа ( $n = 1.63$ , преломляющий угол  $60^\circ$ ); столик с транспортиром для призмы; штативы, опоры, держатели; радиальное зажимное приспособление; фотоэлемент; многопредельный измерительный прибор с усилителем.

**Внимание!** Лазерное излучение опасно для глаз. Не смотрите навстречу пучку. Положение пучка отмечайте по следу на экране.

## Теоретическое введение

### 1. Формулы Френеля

Когда свет достигает границы раздела двух сред с разными оптическими свойствами, он частично проходит во вторую среду и частично возвращается обратно (рис. 1). Направления отраженного и преломленного света описываются известными законами отражения и преломления. Однако эти законы ничего не говорят об интенсивности и поляризации отраженной и преломленной

волн. Эта задача решается на основе электромагнитной теории света. Появление отраженной и преломленной волн объясняется тем, что электрическое поле падающей волны “раскачивает” входящие в состав вещества заряженные частицы, которые становятся источником вторичных волн. Френель, используя граничные условия для электромагнитного поля, вытекающие из уравнений Максвелла, получил формулы, устанавливающие связь между амплитудами и фазами падающей, отраженной и преломленной волн.

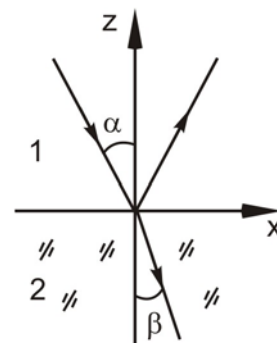


Рис. 1. Направления падающей, отраженной и преломленной волн

Формулы получены для двух предельных случаев поляризации волны, падающей на прозрачную границу: а) электрическое поле волны параллельно плоскости падения (рис. 2а); б) электрическое поле волны перпендикулярно плоскости падения (рис. 2б). На рис. 2 изображены волновые вектора ( $\vec{S}^{\text{пад}}$ ,  $\vec{S}^{\text{отр}}$ ,  $\vec{S}^{\text{пр}}$ ), а также направле-

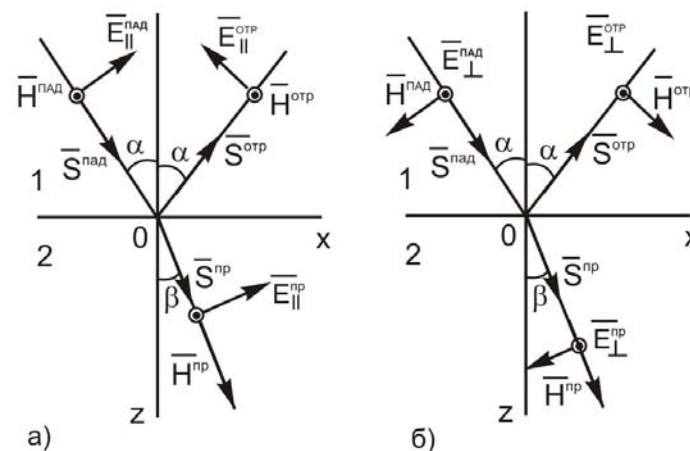


Рис. 2. Схемы расположения волновых векторов и напряженностей в падающей, отраженной и преломленной волнах

ния колебаний вектора напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  и вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  для этих случаев.

При выводе формул Френеля принято, что  $\sin\alpha < n_2/n_1$ , то есть не рассматривается полное внутреннее отражение.

Формулы Френеля имеют вид:

$$E_{m\parallel}^{\text{отр}} = E_{m\parallel}^{\text{нал}} \frac{\text{tg}(\alpha - \beta)}{\text{tg}(\alpha + \beta)}; \quad (1)$$

$$E_{m\perp}^{\text{отр}} = -E_{m\perp}^{\text{нал}} \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad (2)$$

$$E_{m\parallel}^{\text{пр}} = E_{m\parallel}^{\text{нал}} \frac{2 \sin\beta \cos\alpha}{\sin(\alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta)}; \quad (3)$$

$$E_{m\perp}^{\text{пр}} = E_{m\perp}^{\text{нал}} \frac{2 \sin\beta \cos\alpha}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (4)$$

Как видно из (1) – (4), амплитуды колебаний в отраженной и преломленной волнах являются вещественными числами. Поэтому фазы отраженной, преломленной и падающей волн либо совпадают, либо отличаются на  $\pi$ .

## 2. Коэффициент отражения

Коэффициентом отражения называется отношение интенсивности отраженной волны к интенсивности падающей волны:

$$R = \frac{I^{\text{отр}}}{I^{\text{нал}}}. \quad (5)$$

Формулы (1) и (2) свидетельствуют, что коэффициент отражения зависит от направления поляризации волны по отношению к плоскости падения.

Так как интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды ( $I \sim E_m^2$ ), то из формулы (1) Френеля получаем для коэффициента отражения волны, поляризованной в плоскости падения, выражение:

$$R_{\square} = \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)}. \quad (6)$$

Для волны, поляризованной перпендикулярно плоскости падения, формула (2) дает:

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}. \quad (7)$$

При нормальном падении света на вещество ( $\alpha = 0$ ) формулы (6) и (7) с учетом закона преломления дают значение:

$$R_{\perp} = R_{\square} = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}. \quad (8)$$

При падении света под углом  $\pi/2$  получаем:  $R_{\perp} = R_{\square} = 1$ .

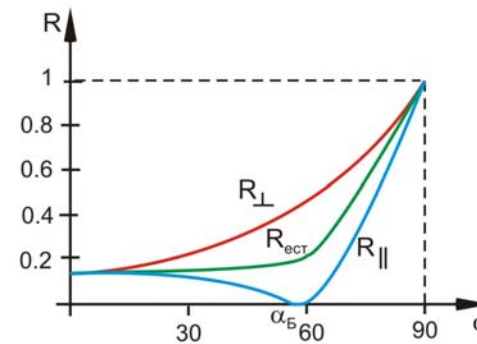


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения от угла падения выполняется при угле падения  $\alpha_B$

$$\alpha_B = \text{arctg} \frac{n_2}{n_1}. \quad (9)$$

Обращение в нуль коэффициента отражения  $R_{\square}$  называется законом Брюстера, а угол  $\alpha_B$  – углом Брюстера.

В естественном (неполяризованном) свете все направления колебаний электрического поля равновероятны. Естественный свет можно представить как сумму двух волн равной интенсивности, в которых колебания происходят соответственно параллельно и перпендикулярно плоскости падения. Коэффициент отражения естественного света:

$$R_{\text{ест}} = \frac{1}{2}(R_{\perp} + R_{\square}). \quad (10)$$

На рис. 3 средняя кривая соответствует зависимости коэффициента отражения естественного света ( $R_{\text{ест}}$ ) от угла падения  $\alpha$ .

### 3. Поляризация при отражении и преломлении

А. Рассмотрим прохождение через границу двух диэлектриков неполяризованного (естественного) света. Различие в зависимости  $R_{\perp}$  и  $R_{\parallel}$  от угла падения приводит к тому, что при наклонном падении отраженный и преломленный свет в общем случае оказывается частично поляризованным. Так как  $R_{\perp} > R_{\parallel}$  (рис. 3), то в отраженном свете преимущество имеет направление электрического поля, перпендикулярное плоскости падения, а в преломленном свете – параллельное плоскости падения. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь естественного с линейно поляризованным. Для его характеристики вводят понятие степени поляризации  $P$ :

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}. \quad (11)$$

Для естественного света  $I_{\perp} = I_{\parallel}$  и  $P = 0$ . Свет, отраженный под углом Брюстера, имеет  $I_{\parallel}^{\text{отр}} = 0$  и для него  $P = 1$ , то есть он полностью поляризован перпендикулярно плоскости падения (рис. 4).

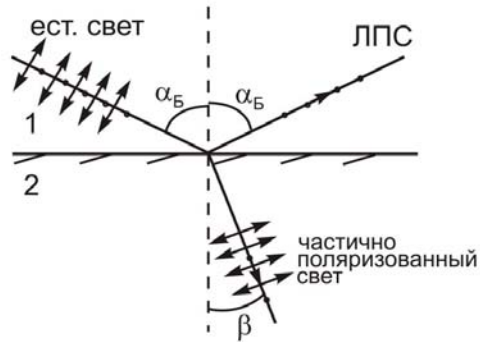


Рис. 4. Поляризация при отражении и преломлении:  $\alpha_B + \beta = \pi/2$

Б. Рассмотрим прохождение через границу линейно поляризованной волны, в которой электрическое поле совершает колебания под произвольным углом  $\delta$  к плоскости падения. Угол  $\delta$  называется азимутом колебания падающей волны. Для анализа отражения вектор амплитуды  $\vec{E}^{\text{пад}}$  надо разложить на две компоненты, для которых справедливы формулы Френеля (рис. 5). Очевидно, что

$$E_{\perp}^{\text{пад}} = E^{\text{пад}} \cdot \cos \delta; \quad E_{\parallel}^{\text{пад}} = E^{\text{пад}} \cdot \sin \delta. \quad (12)$$

Так как каждая из компонент имеет свой коэффициент отражения, то азимут колебания в отраженной волне будет другим (рис. 5).

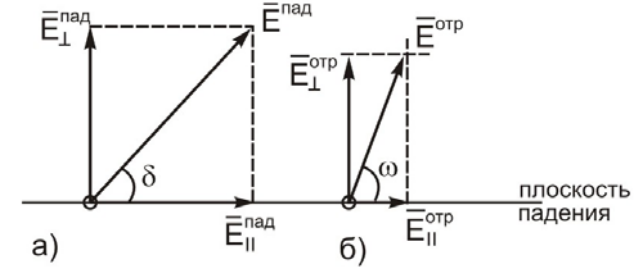


Рис. 5. Направление колебаний электрического поля в падающей (а) и отраженной (б) волнах.

Так как  $R_{\perp} > R_{\parallel}$  для всех углов падения, кроме 0 и  $\pi/2$ , то  $\omega > \delta$ . Плоскость колебания линейно поляризованной волны повернулась при отражении на угол

$$\psi = \omega - \delta. \quad (13)$$

Из рис. 5б следует, что

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{E_{\perp}^{\text{отр}}}{E_{\parallel}^{\text{отр}}}. \quad (14)$$

С учетом (1), (2), (12), (14) получим для азимута отраженной волны:

$$\operatorname{tg} \omega = -\operatorname{tg} \delta \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\alpha + \beta)}. \quad (15)$$

В. Рассмотрим частный случай. Установим азимут колебания в падающей волне  $\delta = \pi/4$ . Тогда

$$\operatorname{tg} \Psi = \operatorname{tg} \left( \omega - \frac{\pi}{4} \right) = \frac{1 - \operatorname{tg} \omega}{1 + \operatorname{tg} \omega}. \quad (16)$$

Из (15) и (16) после преобразований следует, что

$$\operatorname{tg} \Psi = -\frac{\cos \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \beta}}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}. \quad (17)$$

Заменяя в (17)  $\sin \beta$  по закону преломления, получим для угла поворота плоскости поляризации при отражении выражение:

$$\Psi = \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\sin^2 \alpha} \right). \quad (18)$$

Анализируя (18), можно заметить, что при падении света с азимутом колебаний  $\delta = \pi/4$  на границу диэлектриков под углом полной поляризации  $\alpha_B$ , плоскость колебаний поворачивается на угол  $\psi = \pi/4$ .

### Методика эксперимента

В работе изучается отражение лазерного излучения от поверхности призмы из флинтгласа. Подбирая положение лазера и поляроида, устанавливается определенное направление колебаний электрического поля по отношению к плоскости падения. Экспериментально исследуются зависимости коэффициентов отражения  $R_{\perp}$  и  $R_{\parallel}$  от угла падения. Экспериментальные зависимости сравниваются с теоретическими, рассчитанными по формулам (6) и (7). Опытные данные позволяют определить угол полной поляризации  $\alpha_B$  и рассчитать показатель преломления флинтгласа.

Для более глубокого изучения теории отражения предлагается исследовать изменение направления поляризации при отражении под разными углами. Направление колебаний электрического поля в отраженной волне определяется с помощью поляроида-анализатора. В результате строится экспериментальная зависимость угла поворота  $\psi$  от угла падения  $\alpha$ . Экспериментальная кривая сравнивается с теоретической (17). По экспериментальной зависимости  $\psi(\alpha)$  можно еще раз оценить угол Брюстера и сравнить с результатом, полученным по зависимости коэффициента отражения  $R_{\parallel}$  от угла падения.

### Экспериментальная установка

Общий вид установки представлен на рис. 6. Установка включает в себя лазер, фотодатчик, измерительный прибор, поляризатор, анализатор, столик с призмой, поворотное радиальное устройство.



Рис. 6. Экспериментальная установка

На рис. 7. представлено радиальное зажимное приспособле-



Рис. 7. Установка радиального зажимного приспособления с призмой

ние, состоящее из треножника, в котором закрепляются штативные стержни, столика с призмой, транспортера со стрелкой. Пово-

ротное приспособление позволяет установить любой угол падения луча на призму и направить отраженный лазерный луч на фотодатчик.

На рис. 8 дана схема установки призмы, транспортира и лазерного луча при угле падения  $\alpha = 0$ .

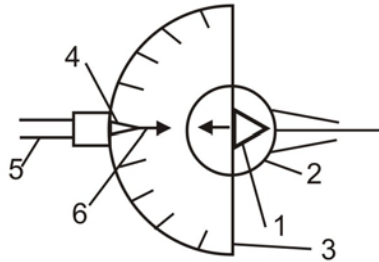


Рис. 8. Установка призмы при угле падения  $\alpha = 0$ .

На рис. 8:

- 1 – затемненная сторона призмы;
- 2 – столик;
- 3 – транспортир;
- 4 – стрелка-указатель;
- 5 – штативный стержень;
- 6 – лазерный луч.

### Ход работы

**Упражнение 1.** Изучение зависимости коэффициентов отражения от угла падения при параллельной и перпендикулярной поляризации

1. Установите лазер на стойке в H-образной опоре так, как показано на рис. 9. Включите лазер и прогрейте его в течение 10 минут.
2. Поляризатор установите так, чтобы плоскость колебаний электрического поля волны совпадала с плоскостью падения ( $90^\circ$  по шкале поляроида). Анализатора перед фотодатчиком не должно быть.
3. Положение лазера подберите так, чтобы луч распространялся параллельно стержню и проходил через центр столика для

призмы. Транспортир установите в положение «ноль».



Рис. 9

4. Разверните штативный стержень с фотоэлементом, установив его вдоль нулевого деления транспортира. Измерьте первичную интенсивность  $I_0''$  луча, поляризованного параллельно плоскости падения. Предел измерительного прибора возьмите  $\approx 30$  мкА.
5. Поместите призму на столик, отражающей поверхностью в центре (рис. 8). Падающий луч должен отражаться в обратном направлении. Это соответствует углу падения  $\alpha = 0$ .
6. Поворачивая столик, измените угол падения в пределах от  $10^\circ$  до  $85^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . При этом необходимо развернуть и стержень с фотоэлементом, установив его на максимальный ток. Для каждого угла падения измерьте силу фототока ( $I_{\square}^{\text{отр}}$ ), которая пропорциональна интенсивности отраженного света, поляризованного в плоскости падения.
7. Вычислите для каждого угла падения коэффициент отражения  $R_{\square}$  и постройте график зависимости  $R_{\square}(\alpha)$ .
8. Поверните лазер на  $90^\circ$  и закрепите его на штативном стержне (рис. 10). Поляризатор установите на  $0^\circ$ . Теперь колебания электрического поля в волне происходит перпендикулярно плоскости падения.



Рис. 10

9. Измерьте первичную интенсивность  $I_0^\perp$ , как в п. 4.
10. Проведите измерения интенсивности отраженного света ( $I_\perp^{\text{отр}}$ ), поляризованного перпендикулярно плоскости падения, как в п. 6.
11. Вычислите для каждого угла падения коэффициент отражения  $R_\perp$  и постройте график зависимости  $R_\perp(\alpha)$ .
12. По экспериментальной зависимости  $R_\perp(\alpha)$  определите величину угла Брюстера. Сравните полученное значение с теоретическим.

**Упражнение 2.** Исследование изменения направления поляризации при отражении

1. Установите лазер, как в п. 8 упражнения 1 (рис. 10). Поляризатор установите по шкале на  $45^\circ$ . Теперь колебания электрического поля в волне происходят под углом  $45^\circ$  к плоскости падения, т. е. азимут колебания падающей волны  $\delta = \pi/4$ .
2. Поворачивая столик с призмой, измените угол падения  $\alpha$  от  $20^\circ$  до  $80^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . При этом поверните штативный стержень с фотоэлементом, установив его на максимальный ток.
3. Вращая анализатор, установленный в отраженном пучке, найдите для каждого угла падения направление колебаний в от-

раженной волне ( $\omega$ ). Оно соответствует максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором. Угол поворота плоскости поляризации при отражении  $\psi = \delta - \omega = \pi/4 - \omega$ . Постройте график зависимости  $\psi(\alpha)$ .

4. По формуле (18) рассчитайте значения  $\psi$ , соответствующие разным углам падения ( $20^\circ \div 80^\circ$ ) и постройте теоретическую зависимость  $\psi(\alpha)$ .
5. Сравните экспериментальную и теоретическую зависимости. Определите угол Брюстера  $\alpha_B$ , зная, что при угле падения, равном  $\alpha_B$ , плоскость колебаний при отражении поворачивается на  $\pi/4$ .

**Контрольные вопросы**

1. Запишите формулы Френеля. Какие величины они связывают? Для какого света применимы?
2. Что называется коэффициентом отражения? От чего зависит его величина?
3. Как рассчитать коэффициент отражения при нормальном падении света на границу двух диэлектриков, а также при произвольном угле падения?
4. Какой свет называется естественным? Линейно поляризованным? Частично поляризованным?
5. В чем заключается закон Брюстера?
6. Что такое степень поляризации?
7. Что называется азимутом колебания электрического поля волны?
8. Если на границу двух диэлектриков падает под углом Брюстера естественный свет, то каким будет состояние поляризации отраженного света? Преломленного света?
9. Почему при отражении линейно поляризованной волны происходит поворот плоскости поляризации?
10. Начертите график зависимости коэффициента отражения от угла падения для волны:
  - а) поляризованной в плоскости падения;
  - б) поляризованной перпендикулярно плоскости падения;
  - в) неполяризованной.
11. Объясните существование угла полной поляризации, исходя из особенностей излучения атомного диполя.

## Литература

1. *Ландсберг Г. С.* Оптика / Г. С. Ландсберг. М.: Физматгиз, 2003. – Гл. XVI.
2. *Матвеев А. Н.* Оптика / А. Н. Матвеев. М.: Высшая школа, 1985. – §§ 16, 17, 18.
3. *Савельев И. В.* Курс общей физики / И. В. Савельев. М.: Наука, 1989. – Т. II. – §§ 134, 135.
4. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Оптика / Д. В. Сивухин. М.: Наука, 1980. – Т. IV, гл V. – §§ 62, 65.
5. *Бутиков Е. И.* Оптика / Е. И. Бутиков. С-Пб.: Невский диалект, 2003. – Гл. 3.
6. *Иродов И. Е.* Волновые процессы Основные законы / И. Е. Иродов. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – Гл. 6. – §§ 6.1, 6.2.

Таблица вариантов

№ варианта	Задания			
1	1а	2а	3а	5а
	1б	2б	3б	5б
3	1в	2в	3в	5в
4	1г	2г	4а	6а
5	1д	2д	4б	6б
6	1е	2е	4в	6в