

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

**Цель работы:** изучить законы отражения и преломления света на границе двух сред, определить показатель преломления и коэффициенты отражения света для диэлектриков.

### 1. Отражение и преломление электромагнитных волн на границе раздела двух сред.

Из курса электричества известно, что для сплошных сред в предположении, что на их границах раздела нет свободных зарядов и токов проводимости, должны быть непрерывны тангенциальные составляющие векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  и нормальные составляющие  $\vec{D}$  и  $\vec{B}$ :

$$E_1^\tau = E_2^\tau, \quad H_1^\tau = H_2^\tau \quad (1)$$

и

$$D_1^n = D_2^n, \quad B_1^n = B_2^n. \quad (2)$$

Эти условия являются следствиями макроскопических уравнений Максвелла в интегральной форме.

Рассмотрим распространение плоской электромагнитной волны через границу раздела двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ . На границе раздела волна частично преломляется, частично отражается. Обозначим индексами 0, 1, 2 соответственно величины, которые описывают волну падающую, отраженную и преломленную

$$\vec{E}_0 = E_{00} e^{i(\omega_0 t - \vec{k}_0 \vec{r})} \quad (3)$$

$$\vec{E}_1 = E_{01} e^{i(\omega_1 t - \vec{k}_1 \vec{r})} \quad (4)$$

$$\vec{E}_2 = E_{02} e^{i(\omega_2 t - \vec{k}_2 \vec{r})} \quad (5)$$

Волновые числа определяются условиями

$$k_0 = \frac{\omega_0}{v_0}, \quad k_1 = \frac{\omega_1}{v_1} \quad \text{и} \quad k_2 = \frac{\omega_2}{v_2},$$

где  $v_0$ ,  $v_1$  и  $v_2$  – скорости волн соответственно падающей, отраженной и преломленной. Очевидно, что

$$v_1 = v_0 = \frac{c}{n_1} \quad \text{и} \quad v_2 = \frac{c}{n_2},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления первой и второй среды соответственно. С учетом (3–5) граничные условия (1) могут быть записаны в виде

$$E_{00}^\tau e^{i(\omega_0 t - \vec{k}_0 \vec{r})} + E_{01}^\tau e^{i(\omega_1 t - \vec{k}_1 \vec{r})} = E_{02}^\tau e^{i(\omega_2 t - \vec{k}_2 \vec{r})} \quad (6)$$

Равенство (6) может выполняться при любых  $t$  и  $\vec{r}$  только при условии, что

$$\omega_0 = \omega_1 = \omega_2 = \omega \quad (7)$$

и

$$\vec{k}_0 \vec{r} = \vec{k}_1 \vec{r} = \vec{k}_2 \vec{r}. \quad (8)$$

Из (7) следует, что частота электромагнитной волны при отражении или преломлении не изменяется.

Направление может выбираться произвольно, поэтому расположим  $\vec{r}$  таким образом, чтобы он был перпендикулярным  $\vec{k}_0$ , т.е.

$$\vec{k}_0 \vec{r} = 0.$$

Тогда

$$\vec{k}_1 \vec{r}_1 = 0 \quad \text{и} \quad \vec{k}_2 \vec{r}_2 = 0. \quad (9)$$

Последнее означает, что  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  также перпендикулярны  $\vec{r}_0$ . Это возможно только при условии, что  $\vec{k}_0$ ,  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  лежат в одной плоскости – *плоскости падения*. (Плоскостью падения называют плоскость, проходящую через падающий луч ( $\vec{k}_0$ \*) и нормаль ( $\vec{N}$ ) к границе раздела, проведенную в точку падения луча (см. рис.1)).

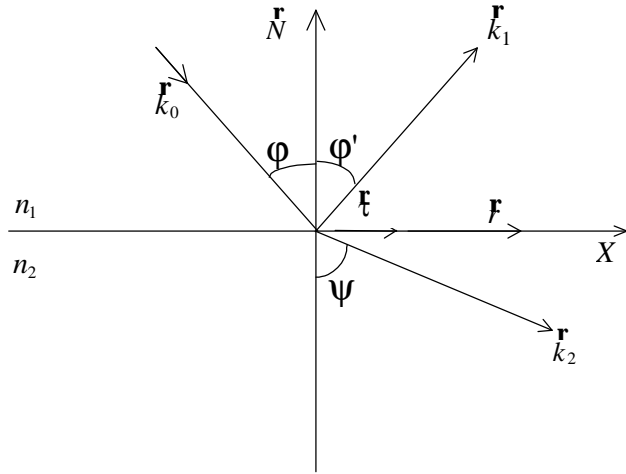
Углы  $\varphi$ ,  $\varphi'$  и  $\psi$ , откладываемые от нормали к падающему, отраженному и преломленному лучам будем называть соответственно *углами падения, отражения и преломления* (рис. 1).

Расположим  $\vec{r}$  вдоль оси X. Тогда

$$\vec{r} = r \vec{\tau} \quad (10)$$

где  $\vec{\tau}$  – единичный вектор, направленный вдоль оси X.

\* Лучом называют направление, совпадающее с вектором  $\vec{k}$



**Рис.1.** Отражение и преломление световой волны на границе раздела двух сред

Перепишем соотношение (9) с учетом (10) в виде

$$\vec{k}_0 \vec{r} = \begin{pmatrix} \vec{k}_0 \vec{r} \\ k_0 \tau \end{pmatrix} r = k_0 r \sin \phi_1,$$

$$\vec{k}_1 \vec{r} = \begin{pmatrix} \vec{k}_1 \vec{r} \\ k_1 \tau \end{pmatrix} r = k_1 r \sin \phi_2,$$

$$\vec{k}_2 \vec{r} = \begin{pmatrix} \vec{k}_2 \vec{r} \\ k_2 \tau \end{pmatrix} r = k_2 r \sin \psi.$$

Тогда  $k_0 r \sin \phi_1 = k_1 r \sin \phi_2 = k_2 r \sin \psi$  или

$$\frac{\sin \phi_1}{v_1} = \frac{\sin \phi_2}{v_1} = \frac{\sin \psi}{v_2}.$$

Из последних соотношений следует, что

$$\phi = \phi' \quad (11)$$

и

$$n_1 \sin \phi = n \sin \psi \text{ или } \frac{\sin \phi}{\sin \psi} = n_{21}, \quad (12)$$

где  $n_{21}$  – относительный показатель преломления второй среды,

$$\text{т.е. } n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Равенства (11) и (12) выражают закон отражения и преломления, открытый Снеллиусом задолго до создания теории Максвелла.

Таким образом, *луч падающий, отраженный и преломленный и нормаль к границе раздела двух сред проведенная в точку падения луча, лежат в одной плоскости, называемой плоскостью падения.* Соотношения между углами отражения и преломления определяются формулами (11) и (12).

Граничные условия (1) и (2) позволяют определить также связь амплитуд падающей, отраженной и преломленной волн.

Разложим электрическое поле каждой волны на две составляющие. Одна из них лежит в плоскости падения, другая перпендикулярна этой плоскости. Часто эти составляющие называют *главными составляющими* соответствующих волн. Они обозначаются значками  $\parallel$  и  $\perp$  соответственно. Рассмотрим два наиболее характерных случая.

## 2. Вектор $\vec{E}_0$ падающей волны лежит в плоскости падения.

В соответствии с законом отражения и преломления  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  лежат также в плоскости падения (рис. 2). Запишем граничные условия для тангенциальных составляющих (при условии, что  $\mu_1 = \mu_2 = 1$ ):

$$E_{00}^{\parallel} \cos \phi + E_{01}^{\parallel} \cos \phi = E_{02}^{\parallel} \cos \psi,$$

$$B_{00}^{\parallel} - B_{01}^{\parallel} = B_{02}^{\parallel}.$$

Поскольку  $nE = cB$ , то

$$E_{00}^{\parallel} + E_{01}^{\parallel} = E_{02}^{\parallel} \frac{\cos \psi}{\cos \phi},$$

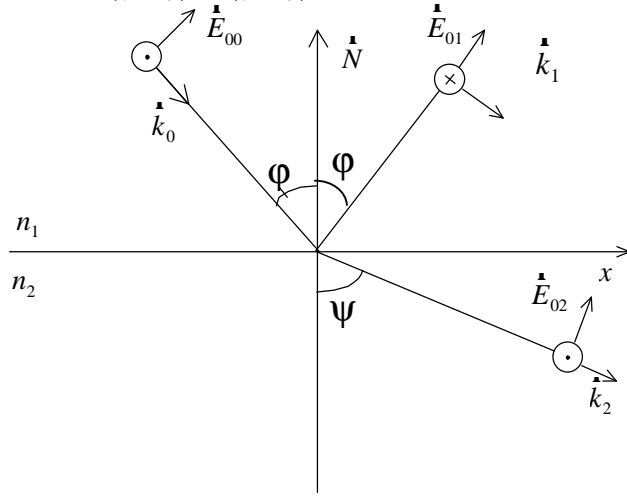
$$E_{00}^{\parallel} - E_{01}^{\parallel} = E_{02}^{\parallel} \frac{\sin \phi}{\sin \psi}.$$

Откуда после преобразований получим

$$E_{01}^{//} = -E_{00}^{//} \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}(\varphi + \psi)} \quad (13)$$

и

$$E_{02}^{//} = E_{00}^{//} \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)} \quad (14)$$



**Рис. 2.** Отражение и преломление на границе раздела двух сред для случая, когда вектор  $\vec{E}_0$  падающей волны лежит в плоскости падения

### 3. Вектор $\vec{E}$ лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.

Запишем граничные условия

$$E_{00}^{\perp} + E_{01}^{\perp} = E_{02}^{\perp}, \quad (15)$$

$$B_{00}^{\perp} \cos \varphi - B_{01}^{\perp} \cos \varphi = B_{02}^{\perp} \cos \psi$$

или

$$E_{00}^{\perp} - E_{01}^{\perp} = E_{02}^{\perp} \frac{\sin \varphi \cos \psi}{\sin \psi \cos \varphi}. \quad (16)$$

Из (15) и (16) после преобразований получим

$$E_{01}^{\perp} = -E_{00}^{\perp} \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (17)$$

и

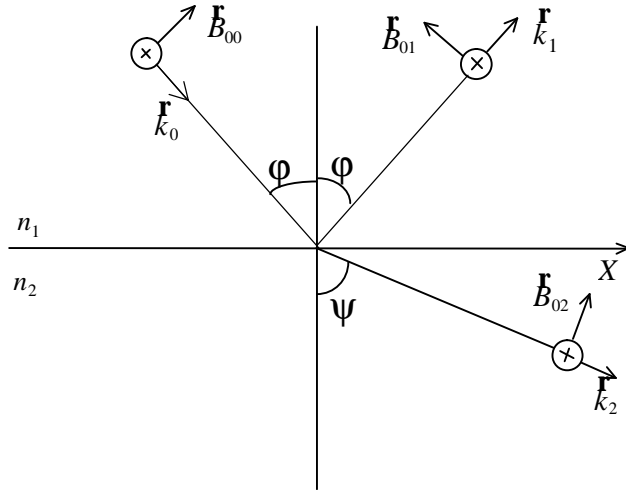
$$E_{02}^{\perp} = E_{00}^{\perp} \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (18)$$

**Рис. 3.** Отражение и преломление на границе раздела двух сред для случая, когда вектор  $\vec{E}_0$  падающей волны лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости падения

Формулы (13), (14) и (17), (18) были впервые получены Френелем и носят название *формул Френеля*. Проведем анализ полученных формул.

1. Знак величин  $E_{02}^{//}$  и  $E_{02}^{\perp}$  всегда совпадает со знаком  $E_{00}^{//}$  или  $E_{00}^{\perp}$ .
2. а) Если  $n_1 > n_2$ , то  $\varphi < \psi$  и знак  $E_{01}^{//}$  и  $E_{01}^{\perp}$  также совпадает со знаком  $E_{00}^{//}$  и  $E_{00}^{\perp}$ ;

б) Если  $n_1 < n_2$ , то  $\varphi > \psi$  и  $E_{01}^{//}$  и  $E_{01}^{\perp}$  имеют знаки, противоположные знакам  $E_{00}^{//}$  и  $E_{00}^{\perp}$ , т.е. при отражении от оптически более плотной среды имеет место скачок фазы на  $\pi$  («потеря полу-волны»). Величина  $B$  в случае (а) испытывает изменение фазы на  $\pi$ , а в случае (б) изменения фазы не испытывает.



При нор-

мальном падении волн на границу раздела

$\varphi = \psi = 0^\circ$  и  $E_{||} \equiv E^\perp$ . В этом случае Формулы Френеля будут иметь вид

$$E_{01} = -E_{00} \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1},$$

$$E_{02} = E_{00} \frac{2n_1}{n_2 + n_1}.$$

4. При  $\varphi \rightarrow 90^\circ$ ,  $E_{02} \rightarrow 0$  и  $E_{01} \approx E_{00}$ .

5. Рассмотрим случай, когда  $\varphi + \psi = 90^\circ$ . При этом условии  $E_{01}^{||} = 0$ . Это означает, что компонента, параллельная плоскости падения, не будет отражаться от границы раздела. Запишем закон отражения

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n_{21} \quad \text{или} \quad \tan \varphi = n_{21}. \quad (19)$$

Выражение (19) носит название закона Брюстера.

Проверяя формулы Френеля, мы имеем дело не с амплитудами, а с интенсивностью световой волны, которая пропорцио-

нальна квадрату амплитуды. Интенсивность падающей волны  $I_0$  может быть определена как

$$I_0 = \left( E_{00}^{||} \right)^2 + \left( E_{00}^\perp \right)^2 = I_0^{||} + I_0^\perp.$$

Интенсивность отраженной волны  $I_1$  будет равна

$$I_1 = \left( E_{01}^{||} \right)^2 + \left( E_{01}^\perp \right)^2 = I_1^{||} + I_1^\perp.$$

Аналогично для интенсивности преломленной волны  $I_2$  можем записать

$$I_2 = \left( E_{02}^{||} \right)^2 + \left( E_{02}^\perp \right)^2 = I_2^{||} + I_2^\perp.$$

Отношение амплитуды световой волны, отраженной от поверхности, к амплитуде падающей волны называется ко-

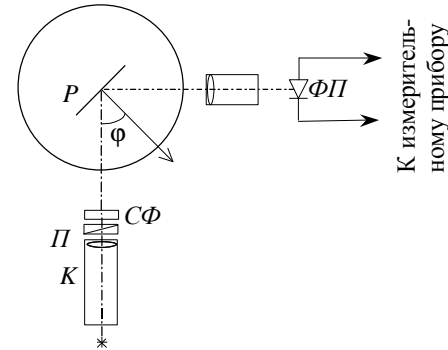


Рис. 6. Оптическая схема установки

эффицентом отражения (по амплитуде) соответственно

$$\rho^{||} = \frac{E_{01}^{||}}{E_{00}^{||}} \quad \text{и} \quad \rho^\perp = \frac{E_{01}^\perp}{E_{00}^\perp}.$$

Учитывая, что интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды, коэффициенты отражения по интенсивности для па-

параллельной и перпендикулярной составляющей интенсивности

$$\text{определяться как } R^{\parallel} = \frac{I_1^{\parallel}}{I_0^{\parallel}} \text{ и } R^{\perp} = \frac{I_1^{\perp}}{I_0^{\perp}}.$$

Из формул Френеля видно, что во всех случаях, за исключением  $\varphi = 0^\circ$ ,  $R^{\perp} > R^{\parallel}$ , т.е. в отраженном свете преобладают колебания, совершенные в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Отраженный свет будет частично поляризован, и при  $\varphi = \varphi_B$ ,  $R^{\parallel} = 0$ . Как уже отмечалось, в данном случае составляющая волны, поляризованная в плоскости падения, отражаться от границы раздела не будет. При падении естественного света под углом Брюстера отраженный свет будет полностью поляризован. Его плоскость поляризации будет перпендикулярна плоскости падения. Прошедший через границу раздела свет будет при этом максимально поляризован.

Мерой поляризации света является соотношение  $P_\varphi = \frac{I^{\perp} - I^{\parallel}}{I^{\perp} + I^{\parallel}}$ , которое называется *степенью поляризации*. Степень поляризации отраженного света может быть определена по

формуле  $P_{1\varphi} = \frac{I_1^{\perp} - I_1^{\parallel}}{I_1^{\perp} + I_1^{\parallel}}$ , или, учитывая формулы Френеля, имеем

$$P_{1\varphi} = \frac{R^{\perp} - R^{\parallel}}{R^{\perp} + R^{\parallel}} = \frac{\cos^2(\varphi - \psi) - \cos^2(\varphi + \psi)}{\cos^2(\varphi - \psi) + \cos^2(\varphi + \psi)}. \quad (20)$$

### Практическая часть

#### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка создана на базе гониометра Г5М. С помощью коллиматора гониометра свет от источника  $S$  направляется параллельным пучком на отражающую пластинку  $P$ , которая помещена на предметном столике гониометра (рис. 6).

Источник света излучает неполяризованный свет. Для выделения поляризованной компоненты, на трубку гониометра надета насадка с поляроидом  $\Pi$ . Поляроид имеет два фиксированных положения  $\parallel$  и  $\perp$ , соответствующих поляризации света в плоскости падения и в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. За поляроидом может быть дополнительно установлена обойма со светофильтрами  $СФ$ , позволяющими производить измерения в монохроматическом свете.

К фотоприемнику присоединяется цифровой микроамперметр для измерения силы фототока, которая является пропорциональной интенсивности падающего света.

#### Методика проведения измерений

**Измерение углов падения** производится следующим образом. Включают источник света осветителя гониометра. Направляют пучок света на пластинку, установленную на столике. Поворачивают столик вместе с пластинкой (за нижнюю его часть) так, чтобы отраженный луч совпадал по направлению с падающим. Фиксируют столик гониометра. По отсчетному устройству определяют угол  $\varphi_0$ , соответствующий начальному положению пластинки. Затем поворачивают столик с пластинкой на некоторый угол, по отсчетному устройству снова определяют угол  $\varphi'$ . Угол падения  $\varphi$  определится как разность  $\varphi'$  и  $\varphi_0$ , т.е.  $\varphi = \varphi' - \varphi_0$ .

1. **Измерение коэффициента отражения.** Вначале определяем интенсивность падающего света  $I_0^{\perp}$  и  $I_0^{\parallel}$ . Для этого вынимаем пластинку  $P$ . Устанавливаем поляризатор сначала в положение  $\perp$  и, вращая фотоприемник  $\Phi\Pi$  вокруг оси, перпендикулярной к столику, выбираем такое его положение, чтобы на фотоэлемент падал максимальный световой поток. Это можно установить по показаниям цифрового вольтметра. Фиксируем значения  $u_0^{\perp}$ , которые прямо пропорциональны интенсивности падающего света т.е. величине  $I_0^{\perp}$ . Установив поляризатор в положение  $\parallel$ , изме-

ряют величину  $u_0^{\parallel}$ , которая пропорциональна  $I_0^{\parallel}$ . Выключаем источник света и измеряем показания вольтметра при отсутствии засветки —  $u_{\text{фон}}$ .

Коэффициенты отражения определяем по формулам

$$R_{\varphi}^{\parallel} = \frac{u_{1\varphi}^{\parallel} - u_{\text{фон}}}{u_0^{\parallel} - u_{\text{фон}}} \quad \text{и} \quad R_{\varphi}^{\perp} = \frac{u_{1\varphi}^{\perp} - u_{\text{фон}}}{u_0^{\perp} - u_{\text{фон}}}. \quad (21)$$

**Вначале целесообразно измерять интенсивность перпендикулярной составляющей, а затем — параллельной.**

**Определение степени поляризации.** Используя полученные выше значения  $R^{\parallel}(\varphi)$  и  $R^{\perp}(\varphi)$ , по формуле (20) вычисляем степень поляризации отраженного света  $P_{\varphi}$  при различных углах падения.

#### Порядок выполнения работы

1. Соблюдая полярность, подсоединить соответствующие выводы фотодиода к цифровому вольтметру.
2. Устанавливаем поляризатор в положение  $\perp$  и определяем  $u_0^{\perp}$ .
3. Устанавливаем поляризатор в положение  $\parallel$  и определяем  $u_0^{\parallel}$ .
4. Помещаем на столик пластинку и измеряем угол  $\varphi_0$  (см. методику измерения углов падения).
5. Направляем на пластинку пучок света под углом падения  $\varphi_1 = 15^\circ$  и производим измерение напряжений  $u_{1\varphi}^{\perp}$  и  $u_{1\varphi}^{\parallel}$ .
6. Изменяя угол  $\varphi$  через каждые  $3\text{--}5^\circ$  до  $80^\circ$ , измеряем  $u_{\varphi}^{\parallel}$  а также  $u_{\varphi}^{\perp}$ .
7. Выключаем источник света и фиксируем показания вольтметра при отсутствии засветки  $u_{\text{фон}}$ .
8. Используя выражения (21), вычисляем соответствующие значения коэффициентов отражения  $R_{\varphi}^{\parallel}$  и  $R_{\varphi}^{\perp}$ .

9. По формуле (20) рассчитываем значение степени поляризации  $P_{1\varphi}$  отраженного света.

10. Построить графики зависимостей  $R_{\varphi}^{\parallel} = f(\varphi)$ ,  $R_{\varphi}^{\perp} = f(\varphi)$  и  $P_{1\varphi} = f(\varphi)$ .

11. Используя формулу (20), рассчитать значения  $R_{\text{теор}}^{\parallel}$ , при изменении угла от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

12. *Сопоставление экспериментальных и теоретических данных.* Вначале каждому значению угла падения  $\varphi$  надо определить соответствующее значение угла преломления  $\psi$ . Из графика  $P_{\varphi} = f(\varphi)$

находим угол Брюстера: при падении света на пластинку под углом Брюстера,  $P_{\varphi}$  имеет наибольшее значение. Тогда из выражения (19) вычисляем показатель преломления  $n$  отражающей пластинки. Зная показатель преломления, на основании закона преломления (12) для каждого значения  $\varphi$  определяем соответствующее значение угла преломления  $\psi$ . Подставляя найденные значения  $\varphi$  и  $\psi$  в формулы (8) и (12), вычисляем теоретические значения  $(P_{\varphi})_{\text{теор}}$  а также  $R_{\text{теор}}^{\parallel} = \left( \frac{\text{tg}(\varphi - \psi)}{\text{tg}(\varphi + \psi)} \right)^2$ . Зависимость величин

$(P_{\varphi})_{\text{теор}}$  и  $R_{\text{теор}}^{\parallel}$  от угла падения представляем графически и сопоставляем с экспериментальными результатами.

#### Контрольные вопросы

1. В чем суть граничных условий?
2. Как, используя граничные условия, получить законы отражения и преломления света?
3. Используя граничные условия, получите формулы Френеля. В чем заключаются основные следствия из формул Френеля?
4. В чем физический смысл закона Брюстера?
5. Приведите примеры практического применения закона Брюстера.
6. В чем суть явления полного внутреннего отражения, в каком случае оно возможно?

7. Что понимают под степенью поляризации света?
8. Объясните полученные зависимости коэффициентов отражения и степени поляризации от угла падения света.