

## Формулы Френеля

Цель работы: экспериментально доказать, что коэффициент отражения света от диэлектрика зависит от угла падения и поляризации падающего излучения.

Если на границу раздела двух прозрачных диэлектриков падает под углом, отличным от нуля, естественный свет, то отраженная и преломленная световая волна будут частично поляризованы.

На рис.1 изображены и обозначены соответствующими значками  $\perp$  и  $\parallel$  составляющие векторов напряженности электрического поля падающей, отраженной и преломленной волн (они обозначены индексами 0, 1 и 2, соответственно).

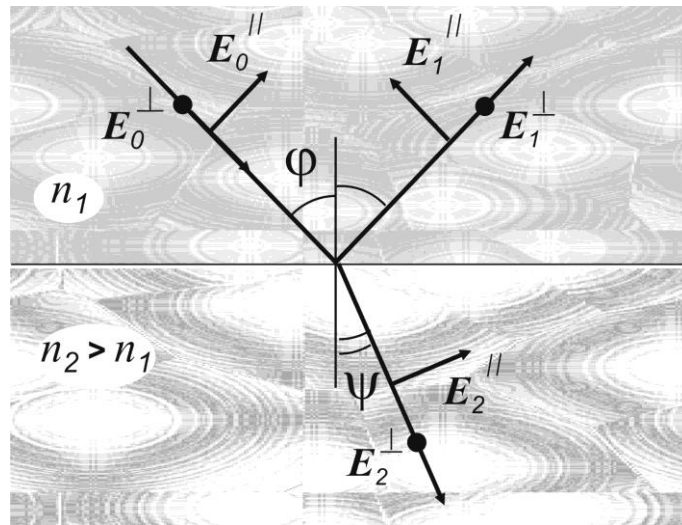


Рис.1. Перпендикулярные и параллельные составляющие вектора  $E$  в падающей (индекс 1), отраженной (индекс 2) и преломленной (индекс 3) волнах.

Относительные значения этих величин следуют из граничных условий, налагаемых на электрическое и магнитное поле световой волны. Формулы, связывающие компоненты векторов  $E$ , были впервые получены О.Френелем и носят название **формулы Френеля**:

$$E_1^\perp = -E_0^\perp \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (1), \quad E_1^\parallel = E_0^\parallel \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}(\varphi + \psi)} \quad (2)$$

$$E_2^\perp = E_0^\perp \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (3), \quad E_2^\parallel = E_0^\parallel \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)} \quad (4)$$

Так как интенсивность ( $I$ ) пропорциональна квадрату амплитуды электромагнитной волны, то для коэффициентов отражения параллельной ( $R_\parallel$ ) и перпендикулярной составляющих ( $R_\perp$ ) можно записать:

$$R_\perp = \left( \frac{E_1^\perp}{E_0^\perp} \right)^2 = \frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)}, \quad (5) \quad R_\parallel = \left( \frac{E_1^\parallel}{E_0^\parallel} \right)^2 = \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}^2(\varphi + \psi)}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) следует, что при выполнении условия  $\varphi + \psi = \pi/2$  коэффициент  $R_\parallel = 0$ . Этот угол называется углом Брюстера. Используя закон преломления, можно связать этот угол с показателями преломления диэлектриков:

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{n_2}{n_1} . \quad (7)$$

Если пропустить частично поляризованный свет через поляризатор, то при его вращении вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться в пределах от  $I_{\max}$  до  $I_{\min}$ , причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте на угол, равный  $\pi/2$ .

Выражение

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

называется *степенью поляризации*.

Для плоскополяризованного света  $I_{\min}=0$  и  $P=1$ ; для естественного света  $I_{\max}=I_{\min}$  и  $P=0$ .

#### Решаемые задачи:

- приобрести навыки юстировки оптической схемы для изучения зависимости коэффициента отражения от угла падения и поляризации падающего излучения;
- получить экспериментальные зависимости коэффициента отражения от угла падения и поляризации падающего света;
- определить угол Брюстера и показатель преломления для пластинки из диэлектрика;
- определить степень поляризации отраженного света при различных углах падения.

#### Оптические элементы и аппаратура (рис.2):

- ✓ осветитель с лампой накаливания (1);
- ✓ ирисовая диафрагма (2);
- ✓ линза с фокусным расстоянием  $f = +200$  мм (3);
- ✓ поляризатор со шкалой (4);
- ✓ держатель стеклянной пластинки (5);
- ✓ стеклянная пластинка (6);
- ✓ линза с фокусным расстоянием  $f = +150$  мм (7);
- ✓ кремниевый фотоэлемент (8);
- ✓ мультиметр (9);
- ✓ транспортер (10);
- ✓ подвижные штативы (11).



Рис.2 Внешний вид экспериментальной установки.

Свет от лампы накаливания 1 проходит сквозь ирисовую диафрагму 2 и падает на линзу 3. Параллельный пучок света, сформированный этой линзой, проходит через поляризатор 4 и падает на стеклянную пластинку 6. Отраженный от нее свет падает на собирающую линзу 7 и фокусируется на светочувствительную площадку кремниевого фотоэлемента 8. Интенсивность света в относительных единицах регистрируется мультиметром 9.

Порядок выполнения работы:

Упражнение 1. Сборка и юстировка оптической схемы для изучения зависимости коэффициента отражения от угла падения и поляризации падающего излучения.

Фотография экспериментальной установки приведена на рис.1.

1. На левой направляющей рейке, на отметке 15 см, установите осветитель 1 (все расстояния отсчитываются от левых краев держателей). Подсоедините осветитель к крайним клеммам источника питания (12 В).

2. На отметке 32 см установите ирисовую диафрагму (2). Вращая желтую ручку, сделайте диаметр диафрагмы 8-10 мм. Середина диафрагмы и середина линзы осветителя должна быть на одной высоте.

3. Включите осветитель и направьте луч света параллельно направляющей 5. Для этого возьмите лист белой бумаги и, наблюдая на ней яркое пятно, удаляйте лист от осветителя вдоль направляющей и следите за центром пучка. Он должен оставаться на одной высоте. При необходимости, можно повернуть или изменить его наклон, аккуратно ослабив соответствующие винты. Не забудьте затем крепко их затянуть.

4. На отметке примерно 49 см установите линзу 3 с фокусным расстоянием 200 мм. Перемещая линзу вверх-вниз, вновь направьте пучок параллельно направляющей. А перемещая линзу вдоль направляющей, добейтесь, чтобы пучок вновь был близок к параллельному.

5. Установите угол между направляющими  $100^{\circ}$ , перемещая треугольные основания 11. Угол отсчитывается по транспортиру 10. Установите нулевое деление транспортира напротив правой стороны направляющей.

6. Установите на столике с транспортом 10 стеклянную пластинку 6. Пластинка должна стоять вертикально, чтобы отраженный от нее пучок распространялся параллельно правой направляющей. Поворачивать пластинку вместе со столиком можно *только за вертикальный стержень 5*. Направьте отраженный свет вдоль правой направляющей и следите, чтобы середина светового пучка оставалась на той же высоте от направляющей. Поднимать и опускать луч можно наклоном пластинки.

7. На правой направляющей, на отметке  $\sim 49$  см, установите фотоэлемент 8. Поворачивая столик со стеклянной пластинкой, направьте световой пучок на фотоэлемент.

8. На отметке  $\sim 37$  см установите собирающую линзу 7 с фокусным расстоянием 150 мм. Перемещая линзу вверх-вниз и вдоль направляющей, соберите пучок на светочувствительной поверхности фотоэлемента в круг, диаметром примерно 8 – 10 мм.

9. Подсоедините к фотоэлементу мультиметр и включите его, нажав клавишу «on/off». Показания мультиметра пропорциональны интенсивности падающего света.

10. На левой направляющей, на отметке 53 см, установите поляризатор 4. Вращая поляризатор, наблюдайте, что показания мультиметра меняются. При положении поляризатора  $0^{\circ}$  плоскость поляризации будет вертикальной. Поскольку плоскость падения луча на пластинку горизонтальна, то в падающей волне будет присутствовать только перпендикулярная составляющая вектора  $\mathbf{E}$  падающей волны  $\mathbf{E}_0^{\perp}$ . При положении поляризатора  $90^{\circ}$ , в падающей волне, соответственно, будет присутствовать только параллельная составляющая  $\mathbf{E}_0^{\parallel}$ .

Упражнение 2. Исследование зависимости коэффициента отражения от угла падения и поляризации падающего света.

1. Установите угол между направляющими  $2\varphi = 30^{\circ}$ . Если теперь поворотом пластинки добиться, чтобы отраженный от пластинки луч попал на фотоэлемент, то угол падения света на пластинку будет равен  $\varphi$ , т.е. половине угла между направляющими, т.е. равен  $\varphi$ ). Установите поляризатор под углом  $0^{\circ}$ . Поворачивая столик с пластинкой, направьте отраженный луч на фотоэлемент. При этом показания фотоэлемента будут максимальными. Занесите эту величину в таблицу ( $I_1^{\parallel}$ ). Поверните поляризатор на  $90^{\circ}$ . Запишите показания мультиметра ( $I_1^{\perp}$ ). Верните поляризатор в положение  $0^{\circ}$ . Выполните измерения, последовательно увеличивая угол между

направляющими на 10 градусов (при этом угол  $\varphi$  будет меняться с шагом  $5^\circ$ ).  
Результаты занесите в таблицу:

$\varphi / \text{град}$	$I_1^{\parallel}$	$I_1^{\perp}$
15		
20		
25		
...		
75		

2. Поскольку падающий свет неполяризован, то интенсивности

$$I_0^{\parallel} = I_0^{\perp} = \text{const}.$$

Так как коэффициенты отражения равны:

$$R_{\parallel} = \frac{I_1^{\parallel}}{I_0^{\parallel}}, \text{ а } R_{\perp} = \frac{I_1^{\perp}}{I_0^{\perp}},$$

то величины  $R_{\parallel}$  и  $R_{\perp}$  будут с одинаковыми коэффициентами пропорциональны интенсивностям  $I_0^{\parallel}$  и  $I_0^{\perp}$ , соответственно. Поэтому зависимости  $I_0^{\parallel}$  и  $I_0^{\perp}$  от  $\varphi$  с точностью до выбора масштаба совпадают с зависимостями соответствующих коэффициентов отражения от угла падения.

3. Постройте зависимости  $I_0^{\parallel}$  и  $I_0^{\perp}$  от угла падения  $\varphi$  на одной координатной сетке.

4. Объясните полученные результаты.

Упражнение 3. Определение показателя преломления пластинки.

1. Из зависимости  $I_1^{\parallel}$  от угла падения  $\varphi$  определите угол Брюстера.
2. Определите показатель преломления пластинки по углу Брюстера.
3. Оцените возможный разброс значений.

Упражнение 4. Определение степени поляризации естественного света, отраженного от стеклянной пластинки.

1. Снимите поляризатор с левой направляющей и установите его перед собирающей линзой 7 на правой направляющей

2. Установите угол между направляющими  $2\varphi = 60^\circ$  и направьте отраженный свет на фотоэлемент.

3. Вращая поляризатор на  $180^\circ$ , определите максимальное и минимальное значение интенсивности.

4. По формуле (8) определите степень поляризации отраженного света для трех углов падения:  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $70^\circ$ . Результаты представьте в виде таблицы:

$\varphi / \text{град}$	$I_{\max}$	$I_{\min}$	$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$
30			

60			
70			

5. Объясните полученные данные.

Вопросы к обсуждению с преподавателем.

1. Отражение и преломление света на границе двух прозрачных диэлектриков. Формулы Френеля.
2. Объяснить необходимость и функции всех оптических элементов экспериментальной установки.
3. Объяснить порядок юстировки оптической схемы.
4. Объяснить полученные экспериментальные результаты, сравнить их с теоретическими данными.
5. Указать возможные источники экспериментальных ошибок.

Рекомендуемая литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика, Изд.6, М., Физматлит, 2006. §§135, 136.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3. М., Физматлит, 2005. §65.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Изд.10, М., Физматлит, 2008. §§134,135.
4. Бутиков Е.И. Оптика. Изд.2, С-Пб., Невский диалект, 2003. §3.1, §3.2
5. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. Изд.2., М., МГУ, 2004. Лекция 20.