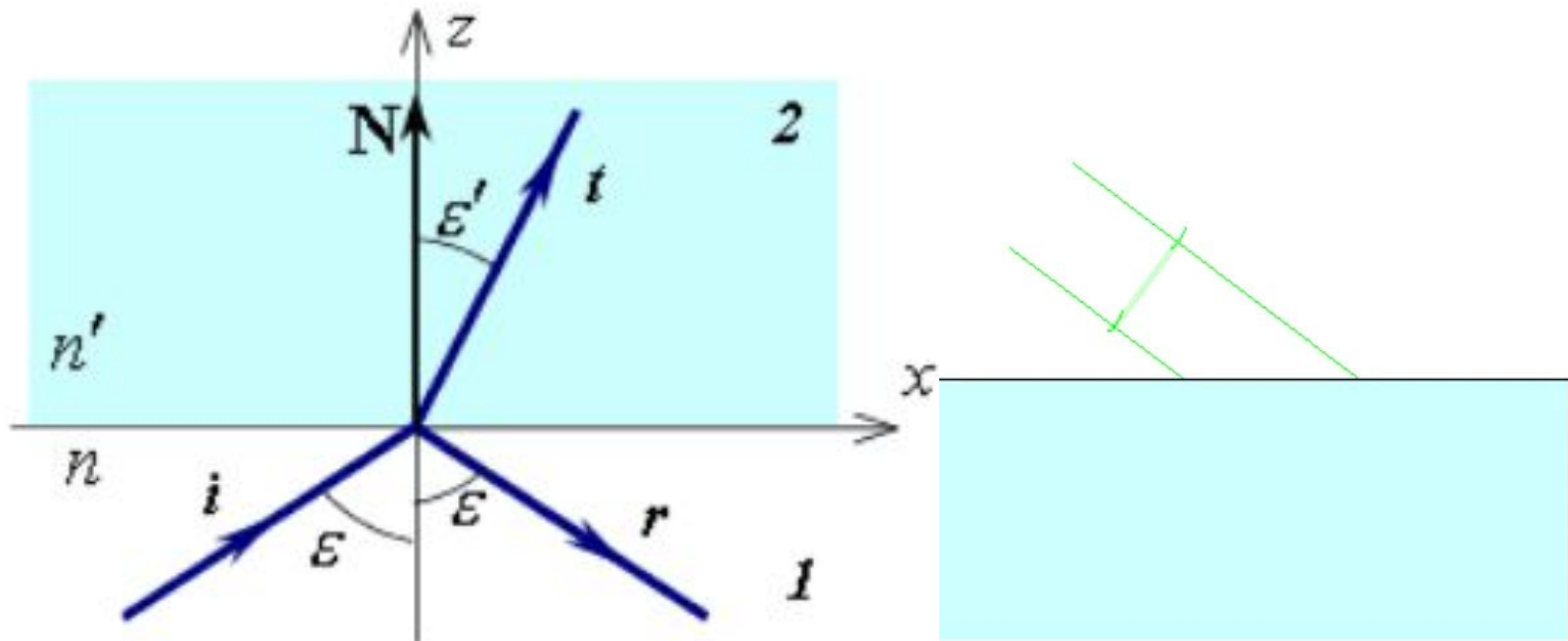


# Оптика.

## Лекция 3.

**Прохождение света через  
границу раздела двух сред**

# Отражение и преломление света на границе раздела двух сред



**Угол падения  $\epsilon$**  – это угол между лучом , падающим на преломляющую или отражающую

поверхность, и нормалью к поверхности в точке падения.

**Угол преломления  $\epsilon'$**  – это угол между преломленным лучом и нормалью к поверхности

в точке преломления.

**Угол отражения  $\epsilon$**  – это угол между отраженным лучом и нормалью **N** к

поверхности.

# Закон преломления

$U_i(\mathbf{r}) = U_i e^{ik_0(\mathbf{q}_i, \mathbf{r})}$  - уравнение падающей плоской волны

$U_t(\mathbf{r}) = U_t e^{ik_0(\mathbf{q}_t, \mathbf{r})}$  - уравнение преломленной плоской волны

$U_r(\mathbf{r}) = U_r e^{ik_0(\mathbf{q}_r, \mathbf{r})}$  - уравнение отраженной плоской волны

где  $\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_t, \mathbf{q}_r$  – оптические векторы падающей, отраженной и преломленной волн,

$k_0$  – волновое число,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор произвольной точки.  
 $(\mathbf{q}_i, \mathbf{r}) = (\mathbf{q}_t, \mathbf{r})$  - совпадение значений

$(\mathbf{q}_t, \mathbf{r}) - (\mathbf{q}_i, \mathbf{r}) = 0$  при  $(\mathbf{r}, \mathbf{N}) = 0$  эйконалов

$$(\mathbf{q}_t - \mathbf{q}_i) \parallel \mathbf{N}$$

$$(\mathbf{q}_t - \mathbf{q}_i) = \mathbf{N} \cdot \Gamma \quad \Gamma - \text{некоторый}$$

$$[(\mathbf{q}_t - \mathbf{q}_i) \times \mathbf{N}] = 0 \quad \text{скаляр} \quad [\mathbf{q}_t \times \mathbf{N}] = [\mathbf{q}_i \times \mathbf{N}] \quad \text{- закон преломления в векторной форме}$$

качественная часть закона:

падающий луч, преломленный луч и нормаль к поверхности раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.

количественная часть закона:

произведение показателя преломления на синус угла между лучом и нормалью сохраняет свое значение при переходе в следующую среду:

$$|\mathbf{q}_t| = n', |\mathbf{q}_i| = n \longrightarrow n \cdot \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'$$

# Закон преломления

$$(\mathbf{N} \cdot \mathbf{q}') - (\mathbf{N} \cdot \mathbf{q}) = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{N}) \cdot \Gamma$$

$$n' \cos \varepsilon' - n \cdot \cos \varepsilon = \Gamma$$

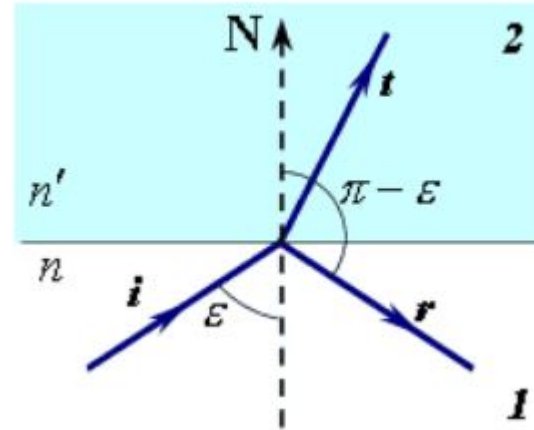
$$\mathbf{q}' = \mathbf{q} + \mathbf{N} \cdot \Gamma$$

Величина  $\Gamma$  имеет большое значение в математическом аппарате расчета лучей

(*ray tracing*) на компьютере.

# Закон отражения

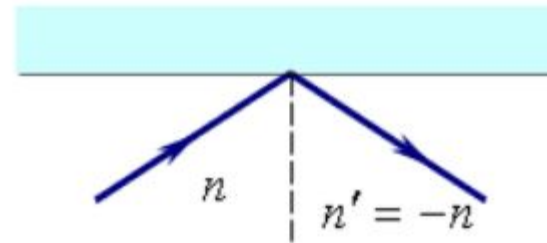
$$n \cdot \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'$$



Закон отражения можно вывести как частный случай закона преломления при  $n' = -n$  (это просто прием для удобства расчета лучей в [геометрической оптике](#), в отрицательном значении показателя преломления нет никакого физического смысла). Тогда случай отражения можно не выделять, а включать его в закон преломления при условии, что  $n' = -n$

$$(\mathbf{q}_r - \mathbf{q}_i) = \mathbf{N} \cdot \Gamma$$

$$\Gamma = -2n \cos \varepsilon$$



# Полное внутреннее отражение

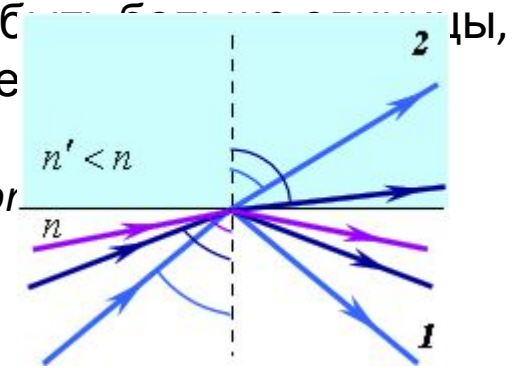
Если угол падения невелик, то часть поля отражается, а часть преломляется.

Однако,

при переходе из более плотной среды в менее плотную, при некотором угле падения

синус угла преломления по закону преломления должен быть больше единицы, что невозможно. Поэтому в таком случае преломления не происходит.

**полное внутреннее отражение** (ПВО, *entire inner reflection*)



Нарушенное полное внутреннее отражение (НПВО), которое возникает при оптическом

контакте границы раздела со средой, используется в спектроскопии.

# Формулы Френеля

$$E_x^{(i)} = -A_{\parallel} \cos \varepsilon$$

$$E_y^{(i)} = A_{\perp}$$

$$E_z^{(i)} = A_{\parallel} \sin \varepsilon$$

Поскольку вектор

$\mathbf{n}$  перпендикулярен вектору  $\mathbf{E}$ , то его

компоненты можно выразить следующим

образом.

$$H_x^{(i)} = -A_{\perp} n \cos \varepsilon$$

$$H_y^{(i)} = A_{\parallel} n$$

$$H_z^{(i)} = A_{\perp} n \sin \varepsilon$$

Для преломленной волны

$$E_x^{(t)} = -T_{\parallel} \cos \varepsilon \quad H_x^{(t)} = -T_{\perp} n \cos \varepsilon$$

$$E_y^{(t)} = T_{\perp} \quad H_y^{(t)} = T_{\parallel} n$$

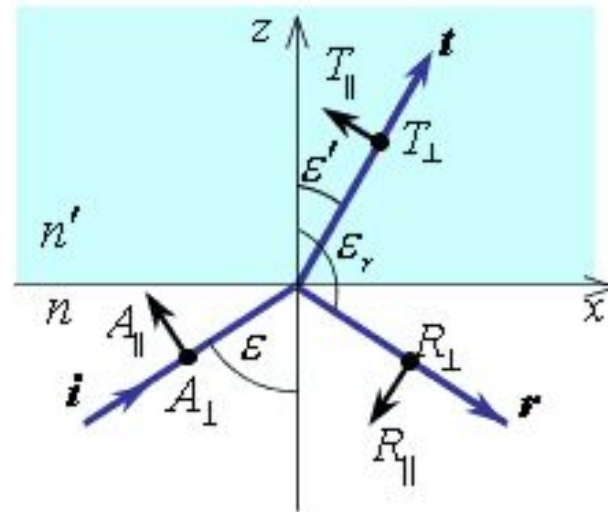
$$E_z^{(t)} = T_{\parallel} \sin \varepsilon \quad H_z^{(t)} = T_{\perp} n \sin \varepsilon$$

Для отраженной волны

$$E_x^{(r)} = -R_{\parallel} \cos \varepsilon \quad H_x^{(r)} = -R_{\perp} n \cos \varepsilon$$

$$E_y^{(r)} = R_{\perp} \quad H_y^{(r)} = R_{\parallel} n$$

$$E_z^{(r)} = R_{\parallel} \sin \varepsilon \quad H_z^{(r)} = R_{\perp} n \sin \varepsilon$$



# Формулы Френеля

$$E_x^{(i)} + E_x^{(r)} = E_x^{(t)} \quad H_x^{(i)} + H_x^{(r)} = H_x^{(t)}$$

$$E_y^{(i)} + E_y^{(r)} = E_y^{(t)} \quad H_y^{(i)} + H_y^{(r)} = H_y^{(t)}$$

- равенство тангенциальных составляющих векторов

$$\cos \varepsilon_r = \cos(\pi - \varepsilon) = -\cos \varepsilon$$

$$\cos \varepsilon (A_{\parallel} - R_{\parallel}) = \cos \varepsilon' T_{\parallel}$$

$$A_{\perp} + R_{\perp} = T_{\perp}$$

$$n \cos \varepsilon (A_{\perp} - R_{\perp}) = n' \cos \varepsilon' T_{\perp}$$

$$n(A_{\parallel} + R_{\parallel}) = n' T_{\parallel}$$

Решаем относительно компонент отраженной и прошедшей

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ВОЛН} \\ T_{\parallel} = \frac{2n \cos \varepsilon}{n' \cos \varepsilon + n \cos \varepsilon'} A_{\parallel} \\ T_{\perp} = \frac{2n \cos \varepsilon}{n' \cos \varepsilon' + n \cos \varepsilon} A_{\perp} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} R_{\parallel} = \frac{n' \cos \varepsilon - n \cos \varepsilon'}{n' \cos \varepsilon + n \cos \varepsilon'} A_{\parallel} \\ R_{\perp} = \frac{n \cos \varepsilon - n' \cos \varepsilon'}{n \cos \varepsilon + n' \cos \varepsilon'} A_{\perp} \end{array} \right.$$

Исключаем показатели

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\parallel} = \frac{2 \sin \varepsilon' \cos \varepsilon}{\sin(\varepsilon + \varepsilon') \cos(\varepsilon - \varepsilon')} A_{\parallel} \\ T_{\perp} = \frac{2 \sin \varepsilon' \cos \varepsilon}{\sin(\varepsilon + \varepsilon')} A_{\perp} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} R_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}(\varepsilon - \varepsilon')}{\operatorname{tg}(\varepsilon + \varepsilon')} A_{\parallel} \\ R_{\perp} = \frac{\sin(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin(\varepsilon + \varepsilon')} A_{\perp} \end{array} \right.$$



# Распределение энергии между отраженным и преломленным полями

Рассмотрим теперь, как энергия поля падающей волны распределяется между отраженным и преломленным полями. Для этого можно использовать [интенсивности](#) падающей, прошедшей и отраженной волн, определяемые через квадраты их амплитуд:

$$I_i = A^2 \cos \varepsilon \cdot n$$

$$I_t = T^2 \cos \varepsilon' \cdot n'$$

$$I_r = R^2 \cos \varepsilon \cdot n$$

**Коэффициент отражения** показывает, какая часть энергии отражается по отношению к падающей:

$$\rho = \frac{R^2 (\cos \varepsilon \cdot n)^2}{A^2 (\cos \varepsilon \cdot n)^2} = \frac{R^2}{A^2}$$

**Коэффициент пропускания** показывает, какая часть энергии проходит по отношению к падающей:

$$\tau = \frac{T^2 (\cos \varepsilon' \cdot n')^2}{A^2 (\cos \varepsilon \cdot n)^2}$$

В сумме коэффициенты отражения и пропускания равны единице:  
 $\rho + \tau = 1$

Коэффициенты отражения и пропускания зависят от направления поляризации падающей волны:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2(\varepsilon - \varepsilon')}{\operatorname{tg}^2(\varepsilon + \varepsilon')} \\ \rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin^2(\varepsilon + \varepsilon')} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \tau_{\parallel} = \frac{\sin^2 \varepsilon + \sin(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin^2(\varepsilon + \varepsilon') \cos^2(\varepsilon - \varepsilon')} \\ \tau_{\perp} = \frac{\sin^2 \varepsilon + \sin(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin^2(\varepsilon + \varepsilon')} \end{array} \right.$$

Отсюда следует, что при прохождении светом границы раздела двух сред его состояние поляризации изменяется.



# Нормальное падение

Математическое описание прохождения полем границы раздела двух сред имеет

большое значение при проектировании оптических систем, где встречается

ряд  $\epsilon \neq \epsilon' = 0$

практически (важно) частных случаев.  
 $\rho_{\perp} = \rho_{\parallel} = \rho = \left( \frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$  - коэффициент отражения

$\tau = \frac{2 \frac{n}{n'}}{\left( \frac{n}{n'} + 1 \right)^2} = \frac{4nn'}{(n' + n)^2}$  - коэффициент пропускания

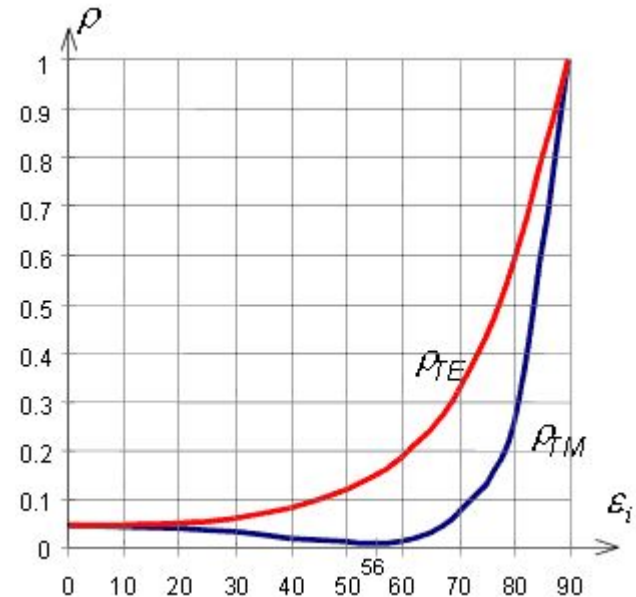
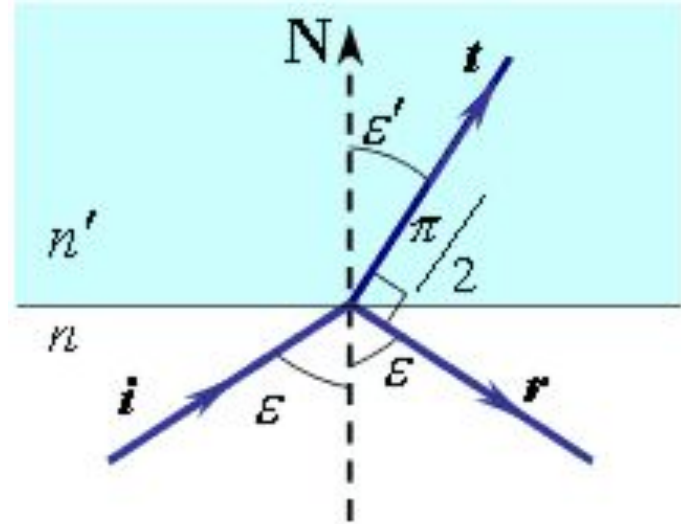
# Угол Брюстера

$$\varepsilon + \varepsilon' = \frac{\pi}{2} \longrightarrow \rho_{\parallel} = 0$$

Угол, при котором происходит полная поляризация при отражении, называется **углом Брюстера**:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{n'}{n}$$

Индекс ТЕ обозначает такое состояние поляризации света, при котором электрический вектор перпендикулярен плоскости падения, а ТМ – состояние поляризации, при котором электрический вектор лежит в плоскости падения.

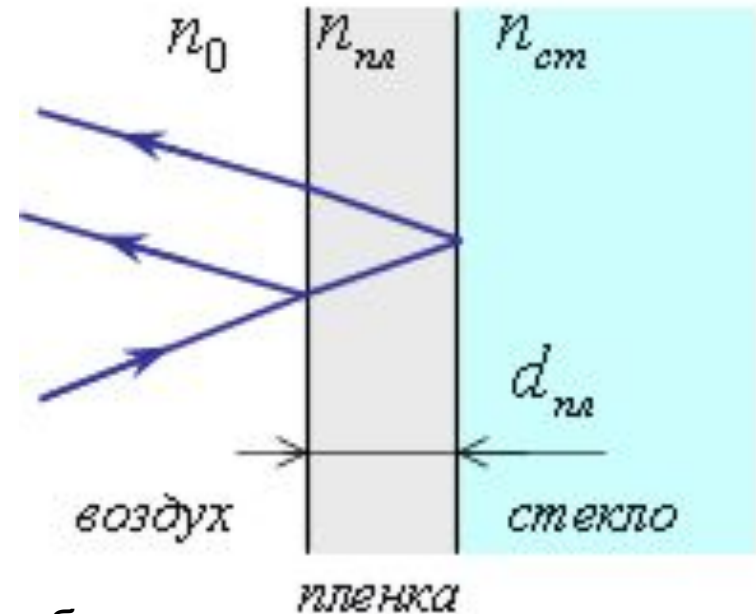


# Просветление оптики. Тонкие пленки

## ПЛЕНКИ

При прохождении света через сложные оптические системы с большим количеством оптических деталей на каждой поверхности теряется около 4% света. В результате через систему может пройти всего 20% светового потока. Применение тонкослойных пленок для ослабления френелевского отражения называется **просветлением оптики**.

Просветляющие покрытия могут уменьшить отражение в 3-4 раза.



$\rho_1 = \rho_2$  амплитуды двух отраженных волн должны быть

$E_1 - E_2 = \frac{\lambda}{2}$  равны фазы (эйконалы) должны отличаться на половину периода

$$n_{пл} = \sqrt{n_{ст}}$$

$$n_{пл} \cdot d_{пл} = \frac{\lambda}{4}$$



Многослойное просветляющее покрытие представляет собой последовательность из не менее чем трех чередующихся слоёв материалов с различными показателями преломления. Раннее считалось что для видимой области спектра достаточно 3-4 слоёв. Современные многослойные просветляющие покрытия практически всех изготовителей имеют 6-8 слоёв, и характеризуются низкими потерями на отражение во всей видимой области спектра. Основное преимущество многослойного просветления применительно к фотографической и наблюдательной оптике — незначительная зависимость отражательной способности от длины волны в пределах видимого спектра.

Оптика с многослойным просветлением ранее маркировалась буквами МС - МногоСлойное, MultiCoating (например, МС Мир-47М 2,5/20) Как правило, аббревиатура "МС" подразумевала трехслойное просветление. В настоящее время специальное обозначение многослойного просветления встречается редко, так как его использование стало стандартом. Иногда встречаются «фирменные» обозначения особых его разновидностей SMC (Super Multi Coating, Pentax), HMC (Hyper Multi Coating, Hoya), MRC (Multi-Resistant Coating, B+W), SSC (Super Spectra Coating, Canon), SIC (Super Integrated Coating), Nano (Nikon), EBC (Electron Beam Coating, Fujinon/Fujifilm), T\* (Zeiss), "мультипросветление" (Leica), "ахроматическое покрытие" (Minolta), и другие.