

*Хроматическая aberrация* обусловлена зависимостью показателя преломления материала линз от цвета проходящих лучей. Обычно для синих лучей показатель преломления больше, чем для красных и фокусное расстояние линзы для синих лучей оказывается меньше, чем для красных. Изображение в естественном белом свете будет иметь радужные границы между светлыми и темными участками. Исправление хроматической aberrации достигается склеиванием положительной и отрицательной линзы из различных материалов.

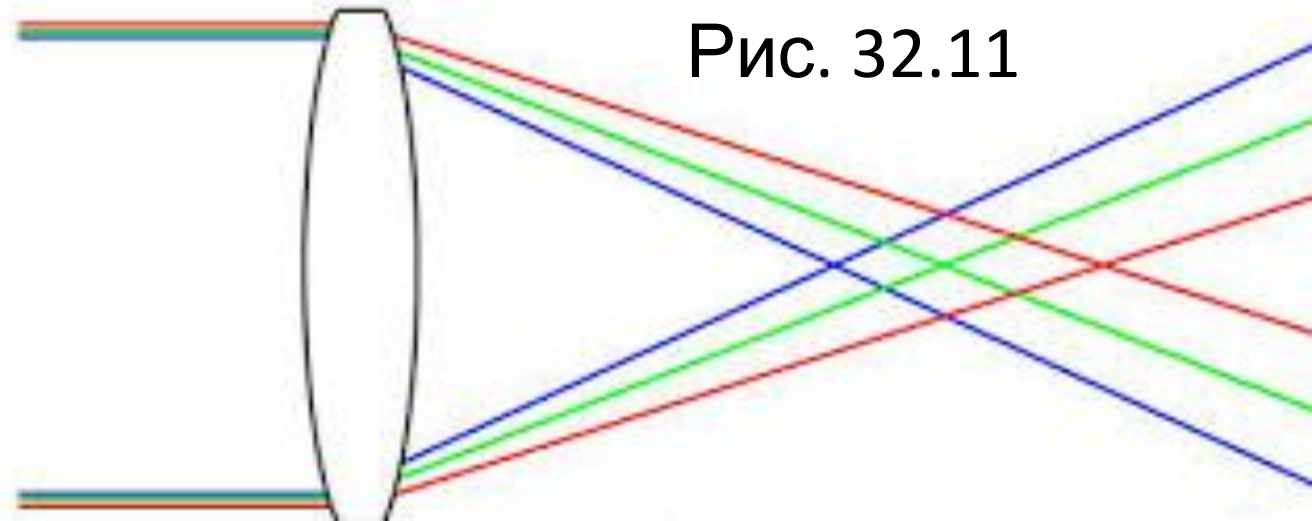
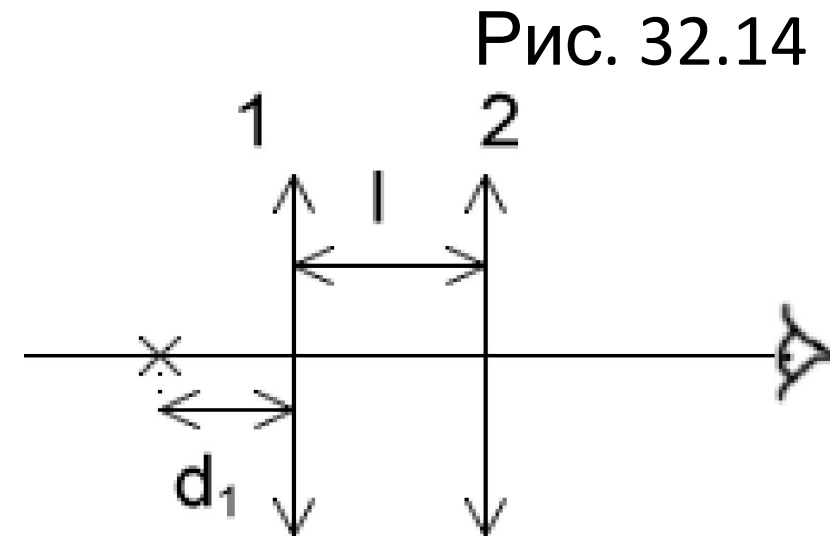


Рис. 32.11

## Пятиминутка:

Оптическая система состоит из двух собирающих линз, расположенных на расстоянии  $l=0,75$  м друг от друга (см. рис 30.14) Наблюдателю, смотрящему справа, источник  $S$ , помещенный на главной оптической оси на расстоянии  $d_1=0,25$  м от первой линзы, кажется удаленным на очень большое расстояние. Чему равна оптическая сила второй линзы, если оптическая сила первой линзы  $D_1=6$  дптр?



**Лк-33**

***Фотометрия.***

***Волновая оптика***

Мгновенная мощность, переносимая ЭМ волной через единичную площадку, выражается вектором пойнтинга через напряженности электрической и магнитной составляющих ЭМ

волны:

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}; \quad |\vec{\Pi}| = EH = \frac{E^2}{Z_c} \text{ [Вт/м}^2\text{]} \quad (33.1)$$

Поскольку величины  $E$  и  $H$  очень быстро колеблются во времени используется средняя величина модуля вектора пойнтинга за период колебаний волны. Эта средняя величина называется интенсивностью ЭМ волны:

$$I = \langle \Pi \rangle = \left\langle \frac{E^2}{Z_c} \right\rangle \text{ [Вт/м}^2\text{]} \quad (33.2)$$

Единица измерения интенсивности - Вт/м<sup>2</sup>.

Напомним, что вектор напряженности электрического поля –  $E$  называется световым вектором. Через него стараются выразить другие параметры волны. Пусть модуль  $E$  колеблется по гармоническому закону:  $E = E_m \cos(\omega t)$ . Тогда средняя за период колебаний величина  $E$

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E_m^2 \cos^2(\omega t) dt = \frac{1}{2} E_m^2 \quad (33.3)$$

Интенсивность световой волны согласно (33.3) будет равна

$$I = \frac{E_m^2}{2Z_c} \text{ [Вт/м}^2\text{]} \quad (33.4)$$

Часто требуется только относительная величина интенсивности, которая пропорциональна  $E_m^2$  (квадрату амплитуды).

Можно не вводить дополнительных единиц для определения энергетических характеристик света. Однако исторически сложился другой подход к определению энергетических показателей света. Вводится специальная система характеристик светового излучения, учитывающая особенности восприятия света человеческим глазом. Для этого система СИ дополняется еще одной фундаментальной единицей - это единица силы света – КАНДЕЛА (Кд). Исходной единицей является световой поток, который выражается через интенсивность ЭМ волны:  $\Phi = I * S$ , где  $S$  - площадь, на которую перпендикулярно падает волна с интенсивностью  $I$ .

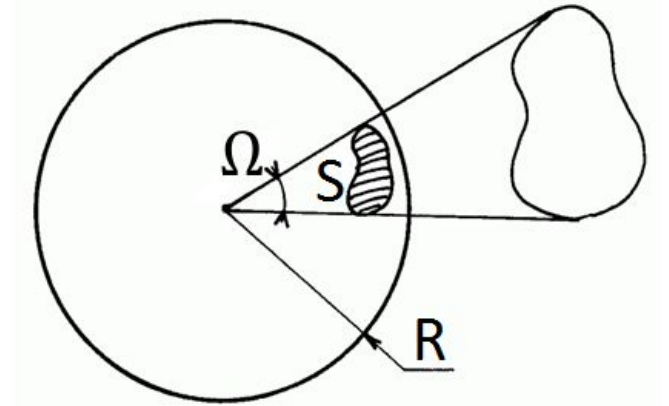
Единицей измерения потока в СИ является Вт. Но для светотехнических измерений единица потока - *Люмен* (Лм). Это мощность оптического излучения, оцениваемая по вызываемому им световому ощущению. Люмен является производной единицей. Основной же единицей является *сила света* источника, которая определяется как величина светового потока даваемая источником в единицу телесного угла.

$$j = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (33.5)$$

Поскольку телесный угол - величина безразмерная единицей измерения силы света в традиционной системе мер является также Вт или Вт/ср

# (Справка) Телесный угол - это

- Часть пространства. Является объединением
- всех лучей, выходящих из данной точки и пересекающих некоторую поверхность  $S$
- Измеряется отношением площади части сферы с центром в вершине угла, которая вырезается этим телесным углом, к квадрату радиуса сферы. Единица – **стерадиан** (ср)
- Стерадиан равен телесному углу, вырезающему из сферы единичного радиуса поверхность с площадью в 1 квадратную единицу. Полный телесный угол равен  $4\pi$ .





За единицу силы света принята *1 кандела*, которая равна  $\frac{1}{683}$  Вт/ср при монохроматической ЭМ волне с длиной волны  $\lambda=555$  нм. Выбранная длина волны соответствует максимуму спектральной чувствительности человеческого глаза.

Все остальные фотометрические единицы выражаются через канделу. Так, люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником силой света 1 кд в телесном угле, равном 1 ср.

Пример. Источник света силой  $J=1$  Кд испускает свет равномерно во все стороны. Определить суммарный световой поток.

Полный поток  $\Phi=4\pi J=12.56$  Лм.

Примерные фотометрические характеристики различных источников приведены в таблице.

<b>Источник</b>	<b>Мощн., Вт</b>	<b>сила св., кд</b>
<b>Свеча</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Лампа накаливания</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Сигнальный светодиод</b>	<b>15мВт</b>	<b>5 мКд</b>
<b>Сверх яркий светодиод</b>	<b>1</b>	<b>25</b>
<b>Сверх яркий светодиод с коллиматором</b>	<b>1</b>	<b>1500</b>
<b>Люминесцентная лампа</b>	<b>20</b>	<b>100</b>

**Освещенность  $E$**  связывает световой поток с площадью той поверхности, на которую этот поток падает. Освещенность в данной точке поверхности равна отношению светового потока  $\Delta\Phi$ , падающего на элемент поверхности, к площади этого элемента  $\Delta S$ :

$$E = \Delta\Phi/\Delta S \text{ [Лм/м}^2\text{]} \quad (33.6)$$

Единица освещенности в СИ — люкс (Лк) — равен освещенности поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$  при падающем на нее перпендикулярно световом потоке  $1 \text{ лм}$ .  $1 \text{ Лк} = 1 \text{ Лм}/1 \text{ м}^2$ . Если бы световой поток выражался не в люменах, а в ваттах, то освещенность совпала бы с интенсивностью световой волны. ***Поэтому для определения освещенности разных участков вычисляют интенсивность волны, или квадрат ее амплитуды.***

Часто бывает нужно выразить освещенность поверхности через силу света, даваемого освещающим источником. Для точечного источника сделать это просто. Пусть свет падает на поверхность перпендикулярно, и она видна из точки источника под телесным углом  $\Delta\Omega$ . Тогда световой поток, освещающий поверхность равен  $\Delta\Phi = j * \Delta\Omega$ . Следовательно,  $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} = \frac{j\Delta\Omega}{\Delta S}$ .

Элемент поверхности  $\Delta S$  выражается через телесный угол  $\Delta\Omega$ , под которым он виден, геометрической формулой:  $\Delta S = R^2 \Delta\Omega$ , где  $R$  - расстояние от источника до элемента поверхности. С учетом этого будем иметь:

$$E = \frac{j}{R^2} \quad (33.7)$$

В том случае, когда одну поверхность освещают несколько независимых источников, общая освещенность поверхности равна сумме освещенностей, созданных каждым источником в отдельности.

### **Яркость поверхности**

Обычно источник света не является точечным. Для таких источников вводится понятие *яркости* -  $B$ . Сила света -  $\Delta J$ , излученного элементом светящейся поверхности  $\Delta S$  в перпендикулярном к ней направлении, пропорциональна площади этого элемента:  $\Delta J = B \Delta S$ . Коэффициент пропорциональности – это яркость поверхности:

$$B = \frac{\Delta J}{\Delta S} \left[ \frac{\text{кД}}{\text{м}^2} \right] \quad (33.8)$$

Как видим, яркость определена для направления излучения, перпендикулярного поверхности.

однако для некоторых источников яркость может от направления не зависеть. Они называются источниками, подчиняющимися закону Ламберта. Строго говоря, таким источником является только абсолютно черное тело. Матированная поверхность или мутная среда, каждый участок которых рассеивает свет равномерно во все стороны, служат более или менее хорошими подобиями ламбертова источника. Поверхность Солнца излучает по закону, довольно близкому к закону Ламберта. Поэтому солнце видится не шаром а диском. Единица яркости  $\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$  называется Нит.

**Светимость поверхности -  $M$ .** Это поток, посылаемый светящейся поверхностью во все стороны, отнесенный к площади этой поверхности.

$$M = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} \quad (33.9)$$

Из данной формулы видно, что светимость имеет ту же размерность, что и освещенность и представляет собой световой поток, отнесенный к единице поверхности.

**Пятиминутка 1.** Светильник в виде шара радиусом  $R=10$  см имеет силу света  $J=100$  кд. Определите полный световой поток -  $\Phi$ , светимость –  $M$ .

## *Зависимость от угла наблюдения за элементом поверхности.*

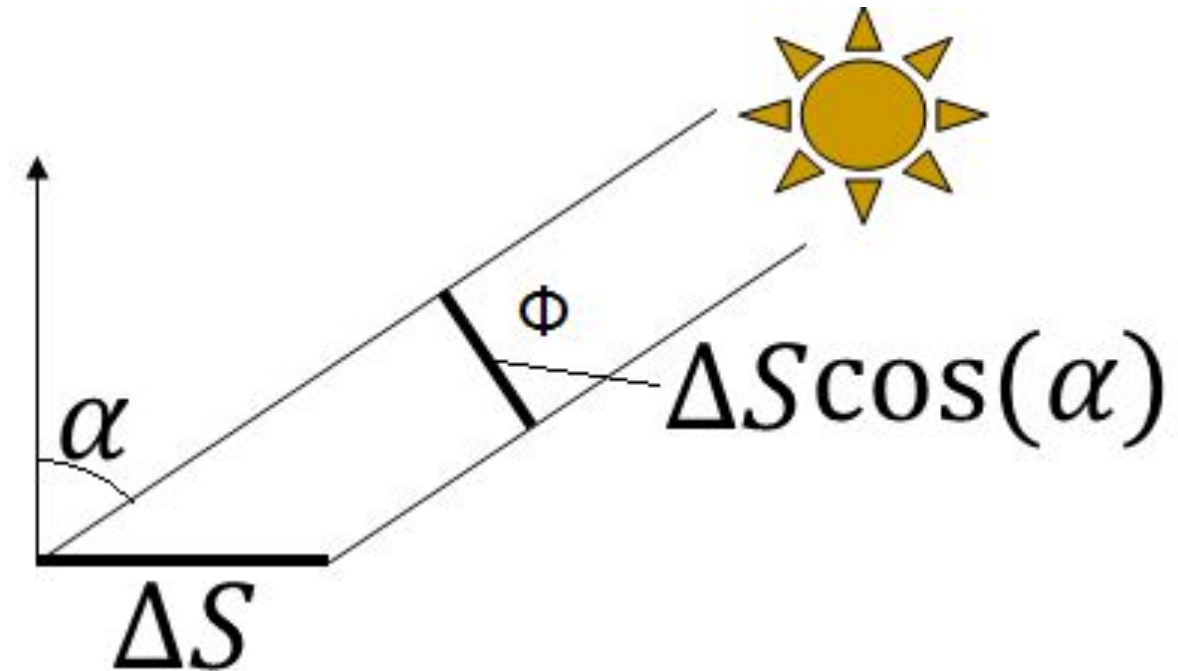
В тех случаях, когда световой поток не перпендикулярен к поверхности, а направлен под углом  $\alpha$ , формулы для  $E$ ,  $B$ ,  $M$  немного изменяются. Освещенность уменьшится, поскольку световой поток распределяется на большей площади

$$E = \frac{\Delta\Phi \cos(\alpha)}{\Delta S} \quad (33.10)$$

Яркость и светимость возрастут, так как излучение идет с большей площади

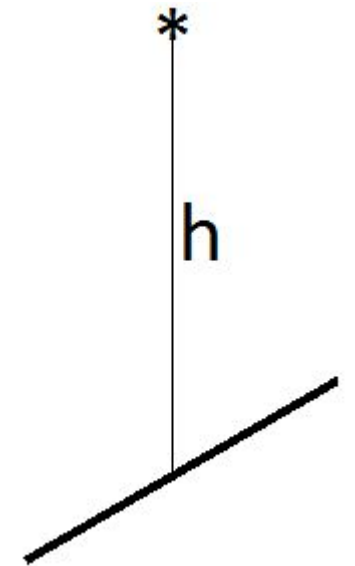
$$B = \frac{\Delta J}{\Delta S \cos(\alpha)} \quad (33.11)$$

$$M = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S \cos(\alpha)} \quad (33.12)$$





**Пятиминутка 2.** На какую высоту над электромонтажным верстаком необходимо повесить светильник с лампочкой мощностью  $P=300$  Вт, чтобы освещенность стола под светильником составляла  $E=100$  лкс. Наклон стола составляет  $30^\circ$  с горизонталью, а световая отдача светильника  $\text{лм/Вт}$ . (Отв. 2м)



## Волновая оптика

Рассматривает оптические явления, основываясь на том, что свет является электромагнитной волной. Волновое уравнение для светового вектора плоской волны имеет вид:

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}),$$

Где  $\vec{k}$  – волновой вектор, направлен в сторону распространения волны,  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки в которой рассматривается волна. Если параметры  $\omega$  и  $k$  остаются неизменными во времени, волна называется монохроматической (одноцветной). Аргумент косинуса  $\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}$  называется фазой волны

# Интерференция волн – это их сложение

**Когерентные волны.** Волны

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{m1} \cos(\omega_1 t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1) \quad \text{и} \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{m2} \cos(\omega_2 t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2)$$

называются когерентными, если разность их фаз не изменяется с течением времени, т.е.  $(\omega_1 t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1) - (\omega_2 t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2) = \text{const}$

Видно, что для когерентности необходимо чтобы  $\omega_1 = \omega_2$ , т.е. частоты должны совпадать.

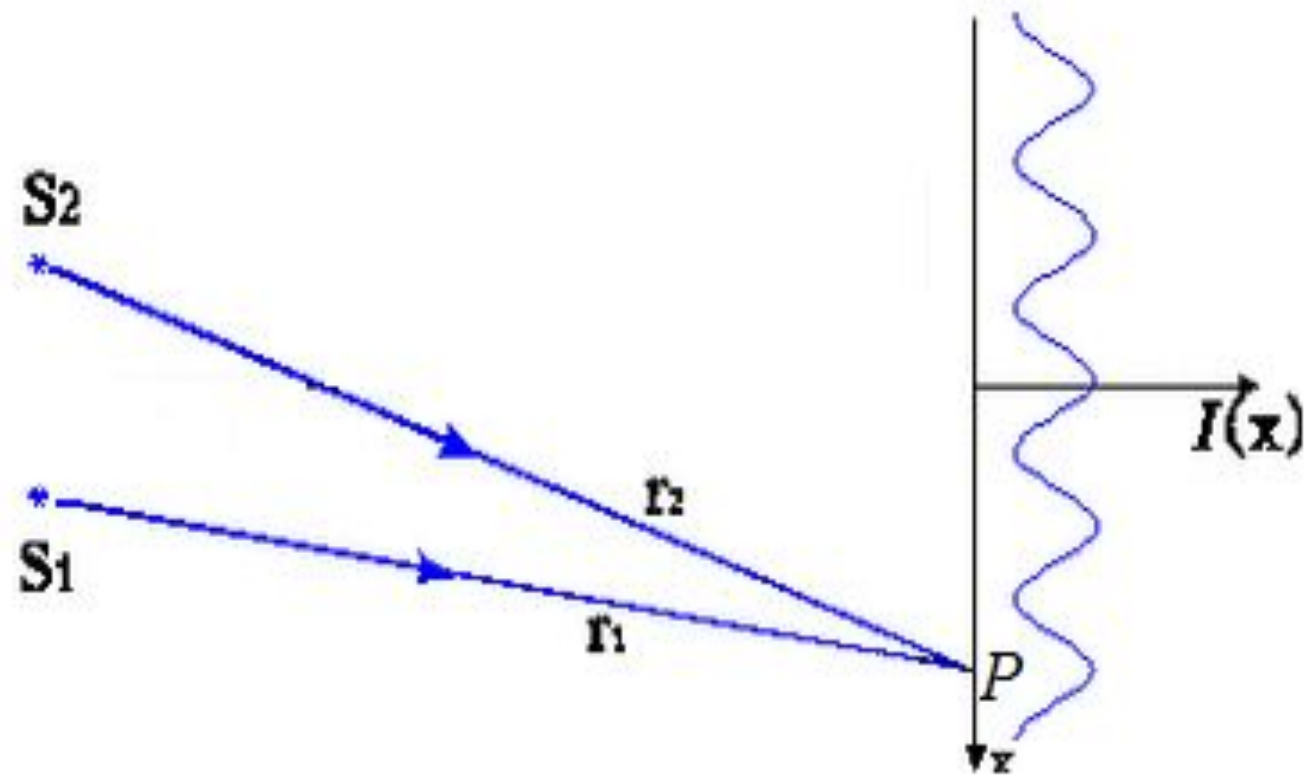
**Интерференция когерентных волн.** Пусть два когерентных источника посылают свет в точку Р, находящуюся на экране.

Просуммируем световые векторы этих волн в точке Р.

$$\vec{E} = \vec{E}_{m1} \cos(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1) + \vec{E}_{m2} \cos(\omega t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2) \quad (33.13)$$

Полагаем направление векторов  $E_{m1}$  и  $E_{m2}$  одинаковыми. Их суммирование заменяется суммированием модулей. Направления  $k_1$  и  $r_1$  также, как и направления  $k_2$   $r_2$  также считаем совпадающими, вследствие чего скалярные произведения можно заменить произведениями модулей. В результате получим скалярное равенство

$$E = E_{m1} \cos(\omega t - k_1 r_1) + E_{m2} \cos(\omega t - k_2 r_2) \quad (3.14)$$



Вычислим интенсивность света в точке Р. Для этого необходимо найти квадрат амплитуды светового вектора и усреднить его. Возводя в квадрат (3.14) и усредняя его за период колебаний, получим

$$I \sim E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos(k_1 r_1 - k_2 r_2) \quad (3.15)$$

Первые два слагаемых в правой части – это интенсивности первой и второй волн. Третье слагаемое  $- 2E_{m1}E_{m2} \cos(k_1 r_1 - k_2 r_2)$  называют интерференционным. В зависимости от аргумента косинуса  $- k_1 r_1 - k_2 r_2$  это слагаемое может принимать любое значение в диапазоне от  $-2E_{m1}E_{m2}$  до  $+2E_{m1}E_{m2}$ . Оба предельных случая соответствуют равенству  $k_1 r_1 - k_2 r_2 = \pi n$ , где  $n$  – целое число. Если  $n$  – нечетное число, то  $E_m^2 = (E_{m1} - E_{m2})^2$ . В этом случае интенсивность света в точке наблюдения минимальна. Если же  $n$  – четное, то  $E_m^2 = (E_{m1} + E_{m2})^2$  – максимум интенсивности в точке Р.

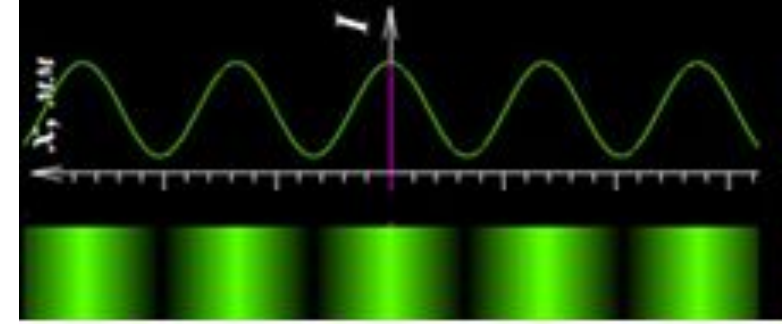
На рисунке показан график зависимости интенсивности от координаты  $x$  –

смещения точки экрана относительно

центра отрезка, который соединяет источники волн. Видно, что интенсивность периодически изменяется, достигая в точках миниму-

мов величины  $(E_{m1} + E_{m2})^2$  и в точках минимумов -  $(E_{m1} - E_{m2})^2$ .

На рисунке показана также видимая на экране картина. Образование различной освещенности экрана при облучении его когерентными волнами легко понять. Если колебания, доставляемые в какую-либо точку первой и второй волнами окажутся синфазными, они при сложении усилят друг друга и дадут максимум освещенности. Если же колебания будут противофазными, они при сложении взаимно ослабятся, и дадут минимум освещенности.



Интерференционное слагаемое  $2E_{m1}E_{m2} \cos(k_1r_1 - k_2r_2)$ , определяющее освещенность какой-либо точки экрана, зависит от разности величин  $kr$  суммируемых волн. Волновой вектор  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Длина волны  $\lambda$  выражается через длину волны в вакууме  $\lambda_0$

и показатель преломления среды  $n$ : 
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Поскольку волны когерентны длины волн  $\lambda_0$  у них совпадают. Тогда

$$k_1r_1 - k_2r_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} (r_1n_1 - r_2n_2)$$

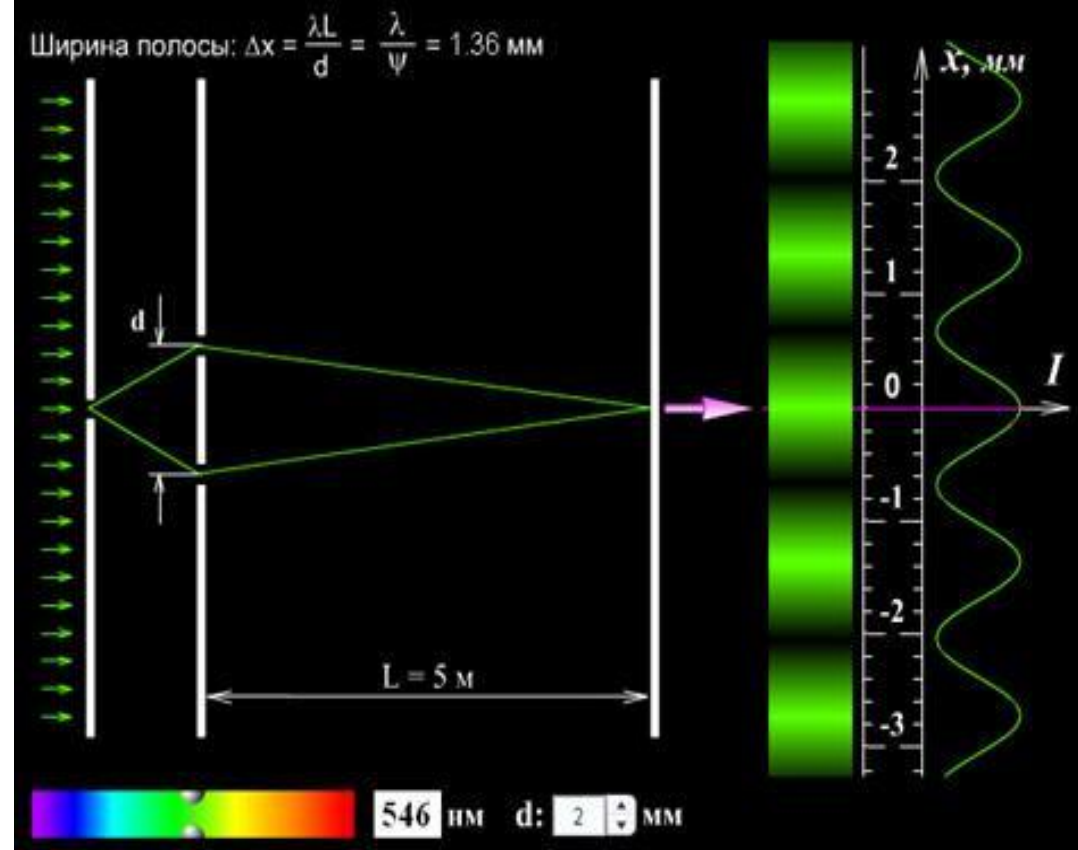
Произведение расстояния  $r$ , пройденного волной на показатель преломления среды  $n$  называется оптической длиной пути. Т.о. Величина интерференционного члена определяется разностью оптических путей складываемых волн.

В точках экрана, где эта разность равна нулю или целому числу длин волн  $\lambda_0$ , будет интерференционный максимум освещенности. В точках экрана, где оптическая разность хода равна нечетному числу полуволн, наблюдается минимум освещенности.

**Формирование когерентных волн.** Излучение двух независимых источников никогда не будут когерентными. Атомы нагретого вещества излучают свет отдельными волновыми порциями – цугами. Длительность цуга составляет около  $10^{-8}$  с. За это время свет успевает пройти расстояние около 3 м. Оно называется длиной когерентности. Для получения интерференционной картины необходимо сложить волны одного цуга. Это достигается путем пропускания светового потока через узкую щель, деления полученной



Одним из первых был опыт Юнга, в котором мощный световой поток пропусклся через узкую щель, а затем еще через две параллельные щели и падал на экран. Две вторичные щели являются когерентными источниками света, и волны от них создают на экране интерференционную картину в виде параллельных щелям полос. Расстояние между максимумами освещенности соседних полос (или минимумами) называется шириной интерференционной полосы. Его легко вычислить для опыта Юнга, поскольку обе волны распространяются в одной среде ( $n_1=n_2$ ) и расстояние между источниками когерентных волн –  $d$ , а также расстояние от них до экрана –  $l$  известны



Направим ось  $X$  вдоль экрана, как показано на рис. Начало координат расположим напротив одной из щелей. При этих условиях квадраты расстояний от щелей до точки наблюдения с координатой  $x$  определяются теоремой Пифагора:

$$r_1^2 = l^2 + x^2 \qquad r_2^2 = l^2 + (x + d)^2$$

Вычитая из второго равенства первое, получим для разности расстояний:

$$r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_1 + r_2} \approx \frac{xd}{l}$$

Условие максимумов – это равенство оптической разности хода целому числу длин волны:  $n(r_2 - r_1) = m\lambda_0$ . Для среды в виде воздуха  $n=1$ , а для соседних полос разность хода должна отличаться на  $\lambda_0$ , т.е.  $r_2 - r_1 = \lambda_0$ .

Соответствующее этой разности хода приращение  $x$  будет шириной интерференционной полосы:

$$\Delta x = \frac{l\lambda_0}{d} \quad (3.11)$$

Благодаря возможности сделать большое отношение  $l/d$  получают макроскопический размер интерференционных полос. При  $d=2$  мм,  $l=5$  м и  $\lambda_0=500$  нм, получим  $\Delta x=1.25$  мм. Поскольку ширина полос зависит от длины волны, интерференция в белом свете даст радужные полосы.

**Пятиминутка 3.** В опыте Юнга расстояние между щелями 1 мм, расстояние от щелей до экрана 1 м, используется красный свет ( $\lambda=720$  нм). Определить ширину интерференционных полос.