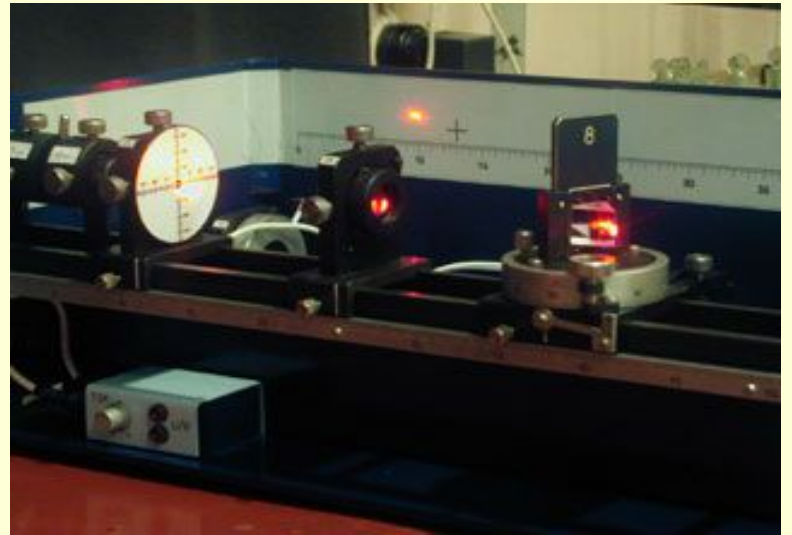


Оптика и квантовая физика

для студентов
2 курса ФТФ и ГГФ



Кафедра общей физики



Интерференция света

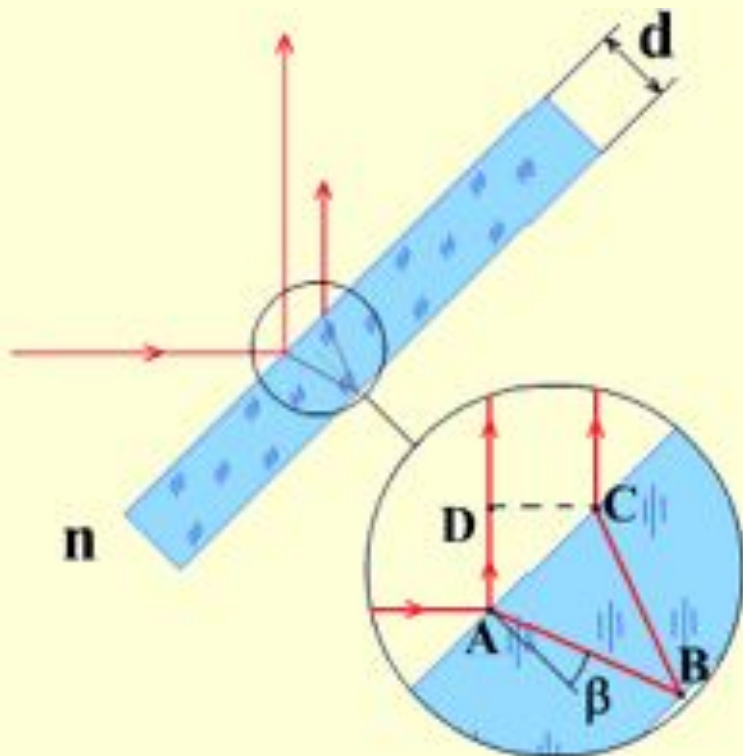
Часть 2

- ✓ Интерференция в тонких пленках
- ✓ Интерферометры
- ✓ Временная когерентность
- ✓ Условие пространственной когерентности

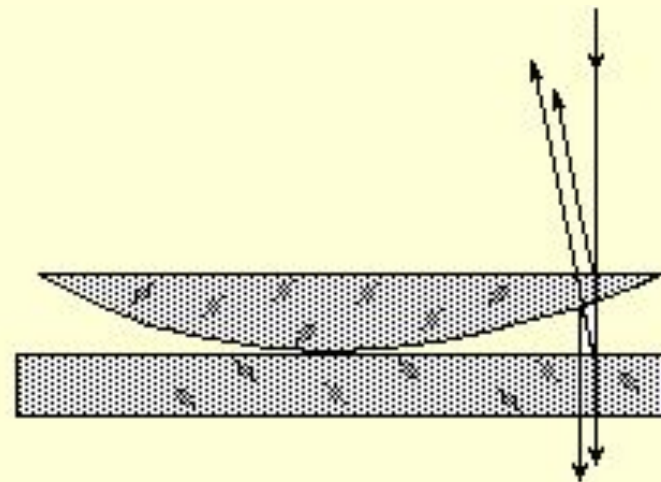


Методы деления амплитуды

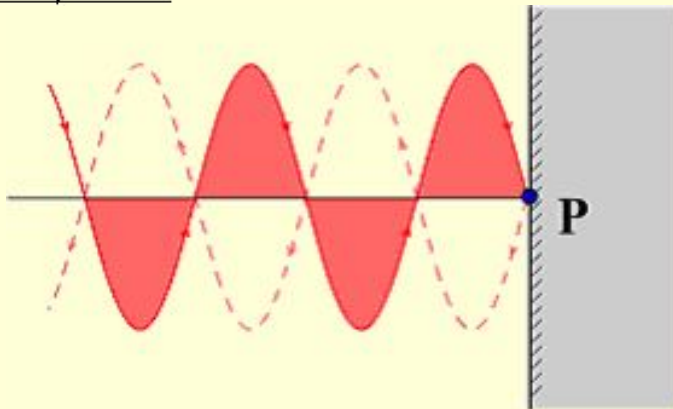
- Тонкие пленки



- Кольца Ньютона



Интерференция в тонких пленках



Отражение от более плотной среды

$$L_1 = (AD) \cdot n_1 (+\lambda/2) \quad (\text{"+"}, \text{если } n > n_1)$$

$$L_2 = (ABC) \cdot n (+\lambda/2) \quad (\text{"+"}, \text{если } n_2 > n)$$

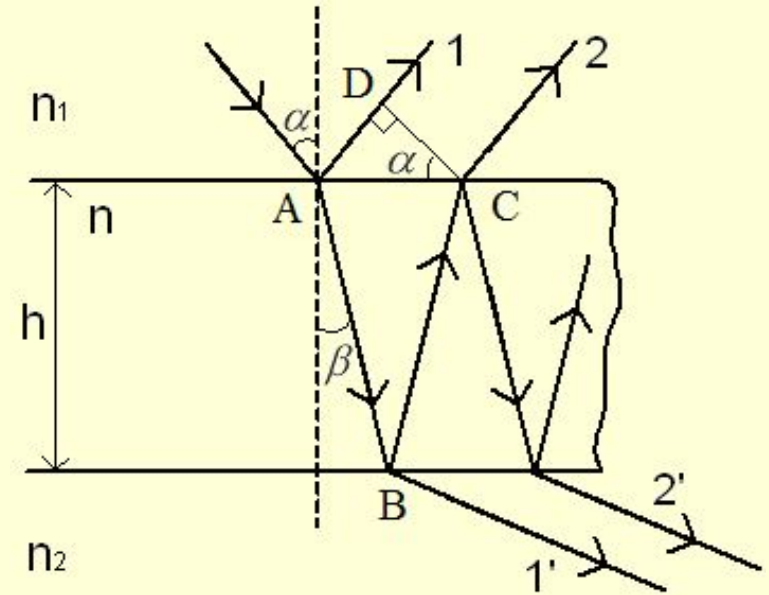
$$\Delta_{12} = L_2 - L_1 = (ABC) \cdot n - (AD) \cdot n_1 \pm \lambda/2$$

$$\Delta_{12} = m \lambda$$

- условие максимума интерференции

$$2hn \cos \beta \pm \frac{\lambda}{2} = m \lambda$$

- условие максимума при интерференции на тонкой пленке



$$AD = AC \cdot \sin \alpha$$

$$AB = BC = \frac{h}{\cos \beta}$$

$$AC = 2h \cdot \operatorname{tg} \beta$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n}{n_1}$$

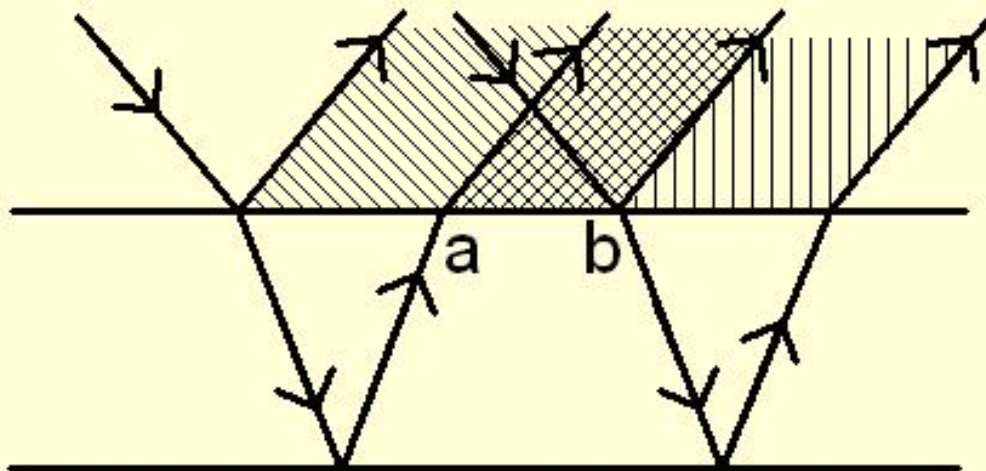
$$\Delta_{12} = 2hn \cos \beta \pm \frac{\lambda}{2}$$

Виды интерференционных картин на тонких пленках

1. Цвета тонких пленок

– интерференция при освещении пленки широким пучком

Условия: $h = \text{const}$, пучок лучей широкий и параллельный



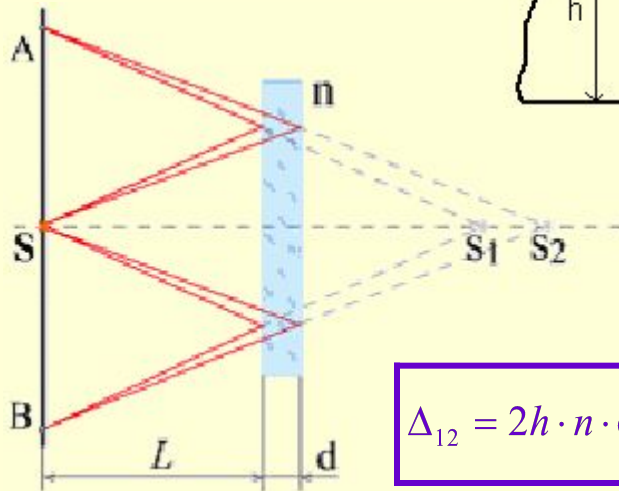
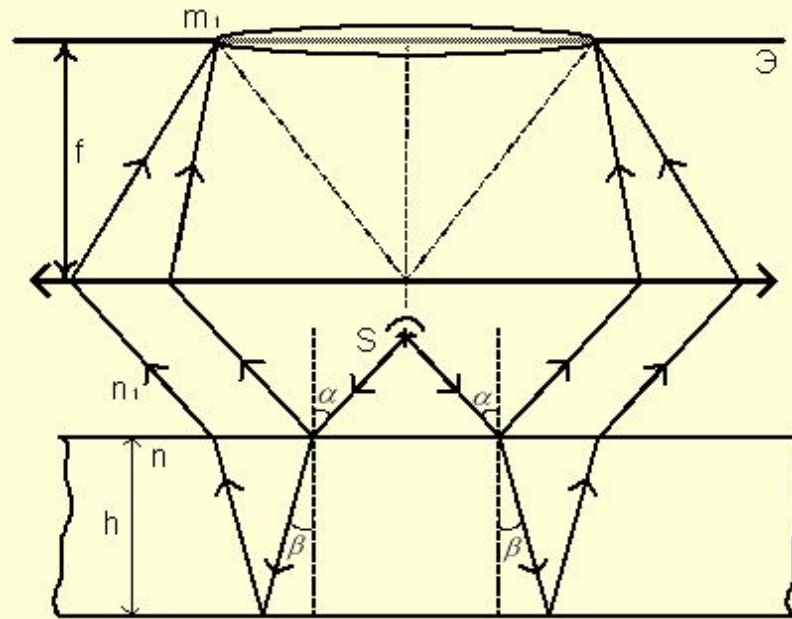
Проявление интерференции

При освещении **белым светом** – окраска области **ab** в тот цвет, для λ которого выполняется условие максимума: $\Delta_{12} = m\lambda$.

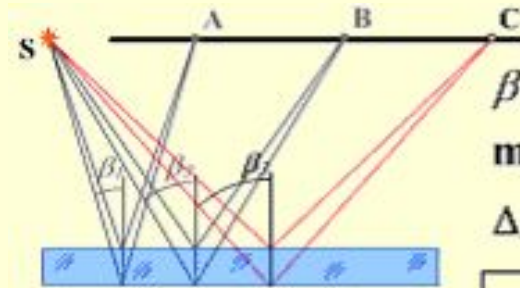
При освещении **монохроматическим светом** ($\lambda = \text{const}$) – область **ab** ярко освещена, если для λ выполняется условие максимума; область **ab** черная, если для λ выполняется условие минимума $\Delta_{12} = (m + \frac{1}{2}) \lambda$.

2. Линии равного наклона

Условия: $h = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$, световой пучок – расходящийся.



$$\Delta_{12} = 2h \cdot n \cdot \cos \beta \pm \frac{\lambda}{2}$$



$$\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$$

$$m_A > m_B > m_C$$

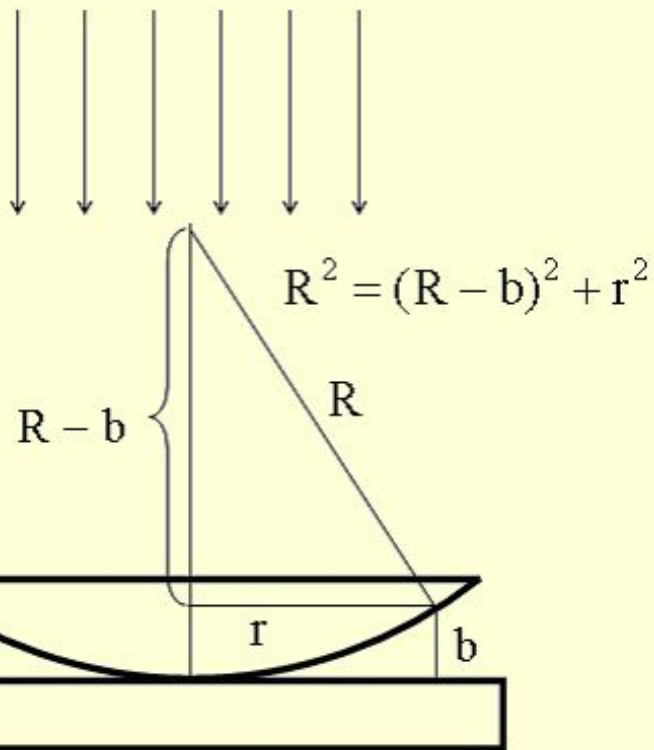
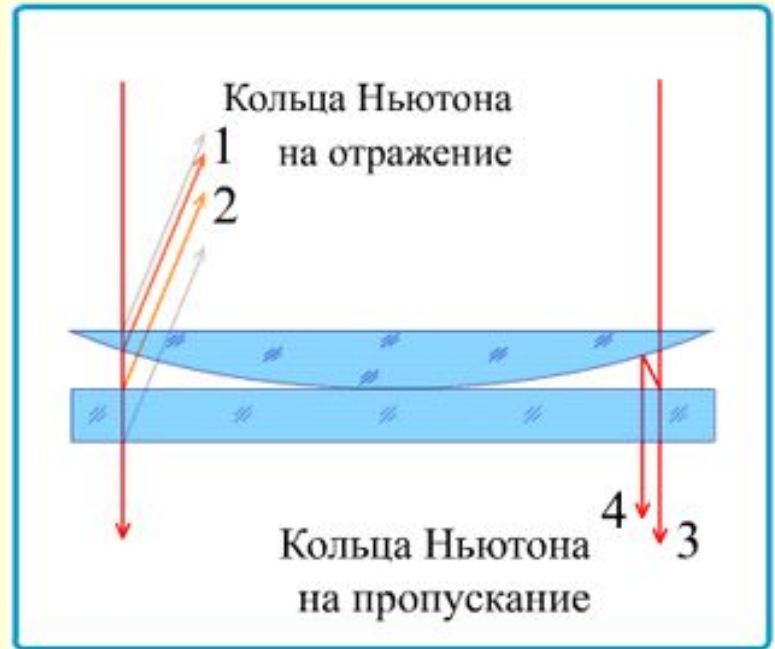
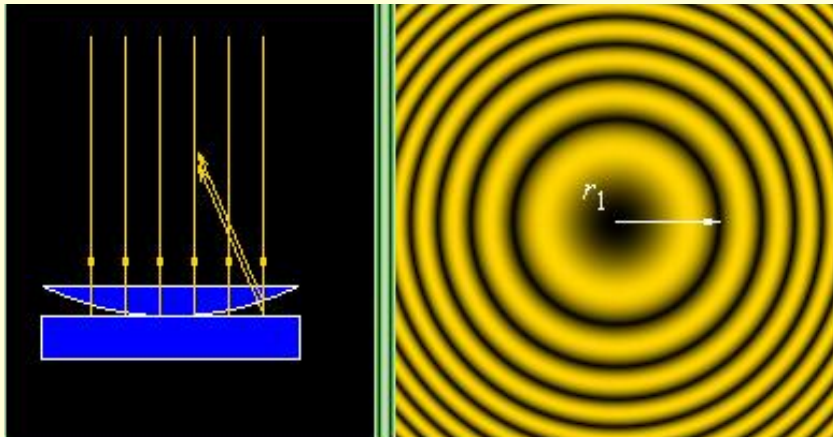
$$\Delta_A > \Delta_B > \Delta_C$$

$$\Delta = 2dn \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2}$$

Свойства полос равного наклона

Полосы локализованы в бесконечности, имеют вид колец.

Кольца Ньютона



$$b = \frac{r^2}{2R}, \text{ т.к. } b^2 \rightarrow 0$$

$$\Delta = 2bn + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

Условие максимума (светлые кольца) $\Delta = m \lambda$, где m – целое число.

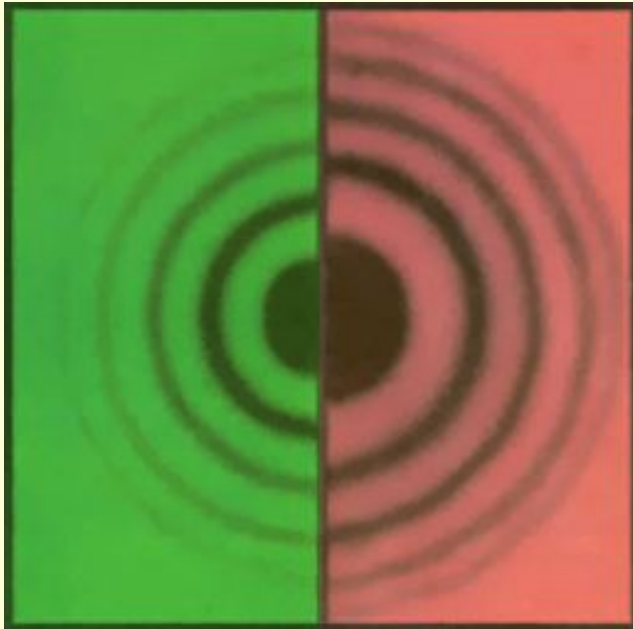
$$r_m = \sqrt{(m - 1/2)\lambda R}$$

- радиус m -го *светлого* кольца в *отраженном* свете
(и *темного* – в *прошедшем*)

Условие минимума (темные кольца) $\Delta = (m + 1/2) \lambda$.

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}$$

- радиус m -го *темного* кольца в *отраженном* свете
(и *светлого* – в *прошедшем*)

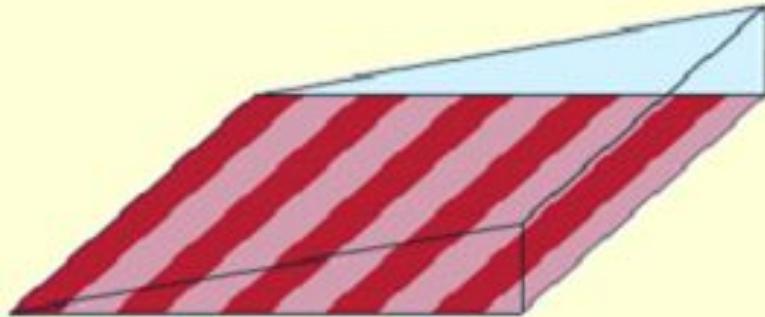
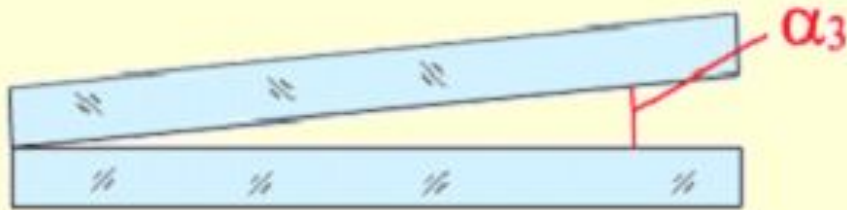


Кольца Ньютона в зеленом и красном свете

Пример применения – проверка качества шлифовки линз.

3. Линии равной толщины

Условия: толщина пленки плавно изменяется ($h \neq \text{const}$), представляя собой клин. Пучок параллельный.



Система полос равной толщины

$$\Delta_{12} = 2h \cdot n \cdot \cos \beta \pm \frac{\lambda}{2}$$

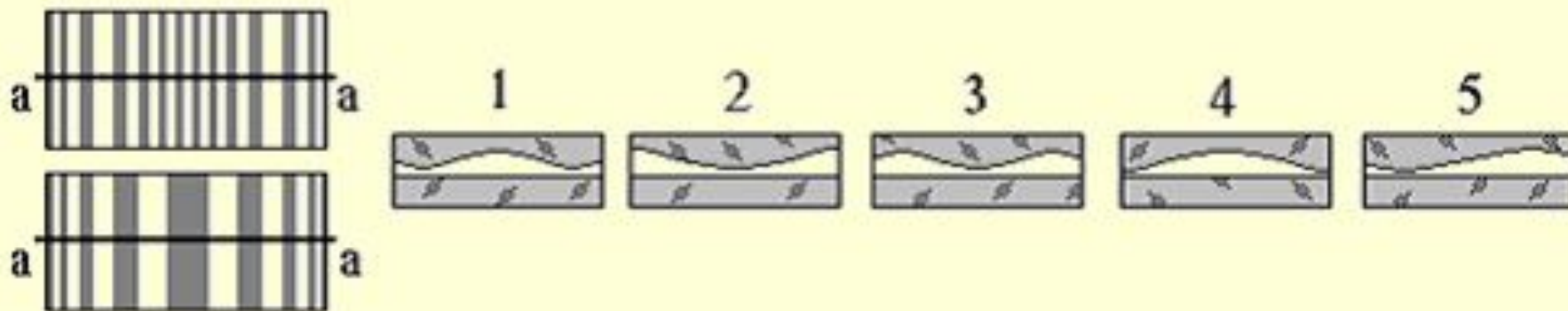
$$\Delta_{12} = m\lambda$$

- максимум (светлая полоса)

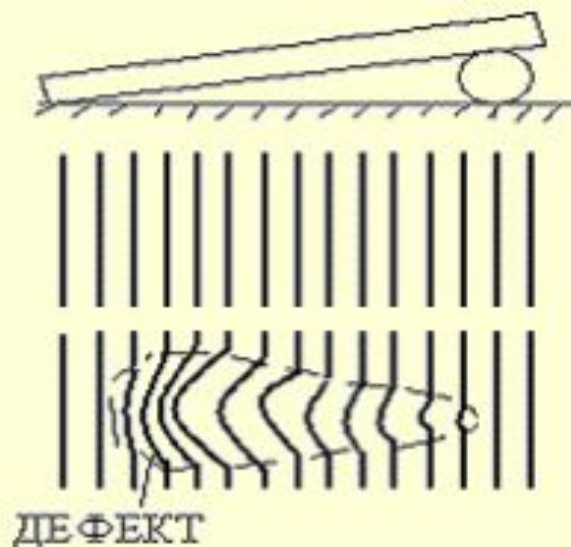
$$\Delta_{12} = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

- минимум (темная полоса)

Задание. Определите, какие два зазора из представленных пяти соответствуют данным системам интерференционных полос равной толщины:

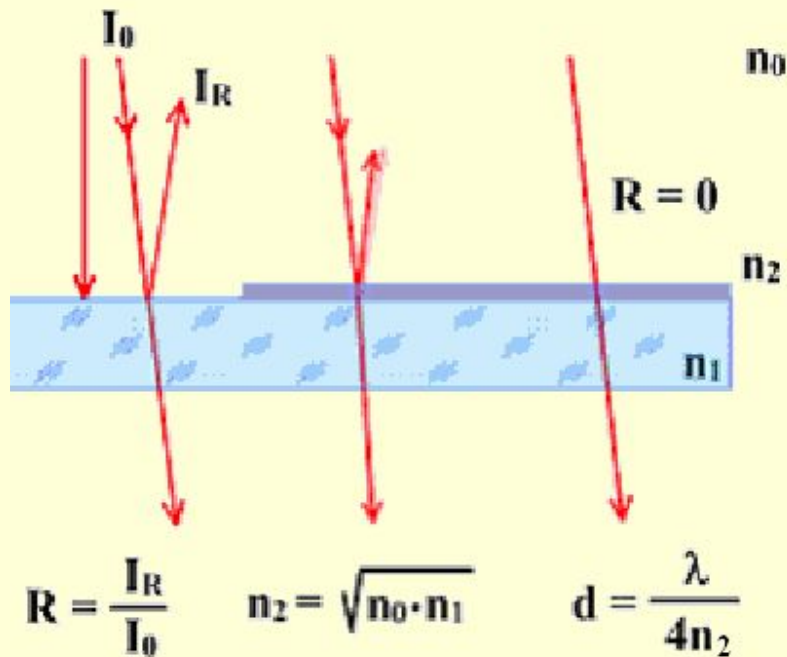


Пример применения - определение качества обработки поверхностей



Примеры применения

1. Просветление оптики



2. Получение диэлектрических зеркал

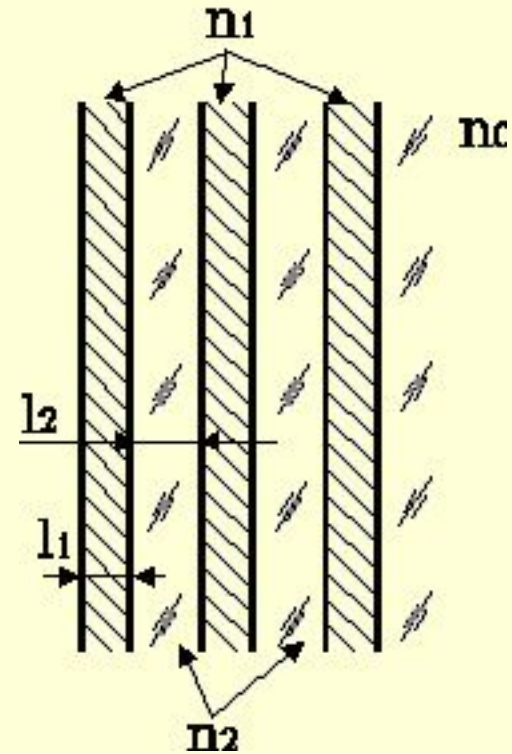


Схема многослойного диэлектрического покрытия ($n_1 > n_0$, $n_1 > n_2$, $n_1 l_1 = n_2 l_2 = \lambda_0/4$)

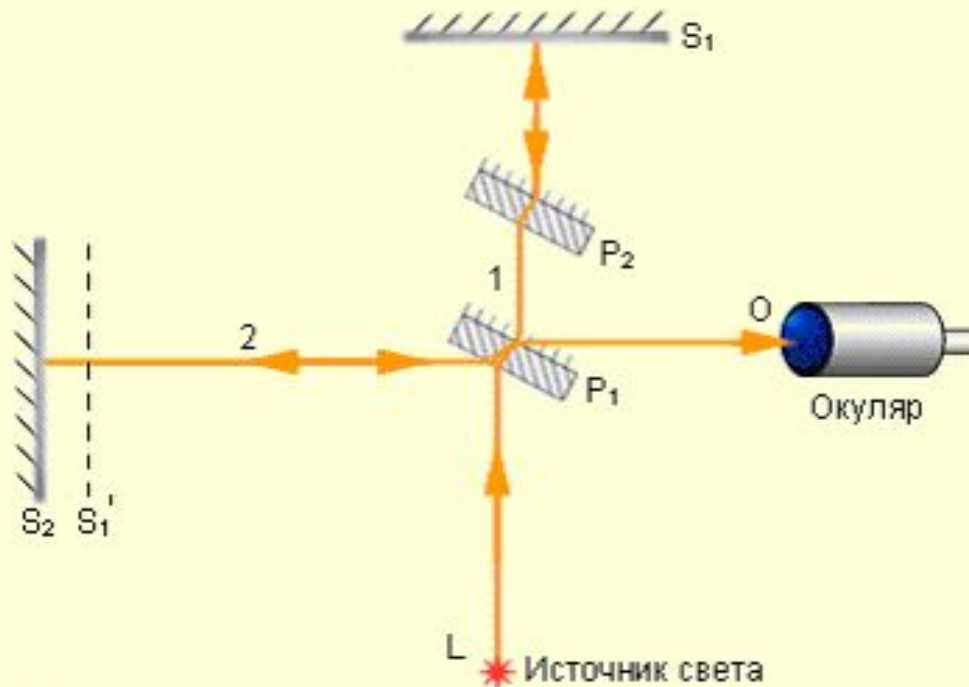
С семью слоями $R = 0,9$ в спектральной области шириной порядка 50 нм . Для получения коэффициента отражения $R = 0,99$ (такие зеркала используются в лазерных резонаторах) надо нанести $11-13$ слоев.

Интерферометры

Интерферометр Майкельсона



Алберт Майкельсон



S_1 и S_2 – зеркала

P_1 и P_2 – разделительная и компенсационная пластинки

P_1 – светоотделитель (полупрозрачная пластинка)

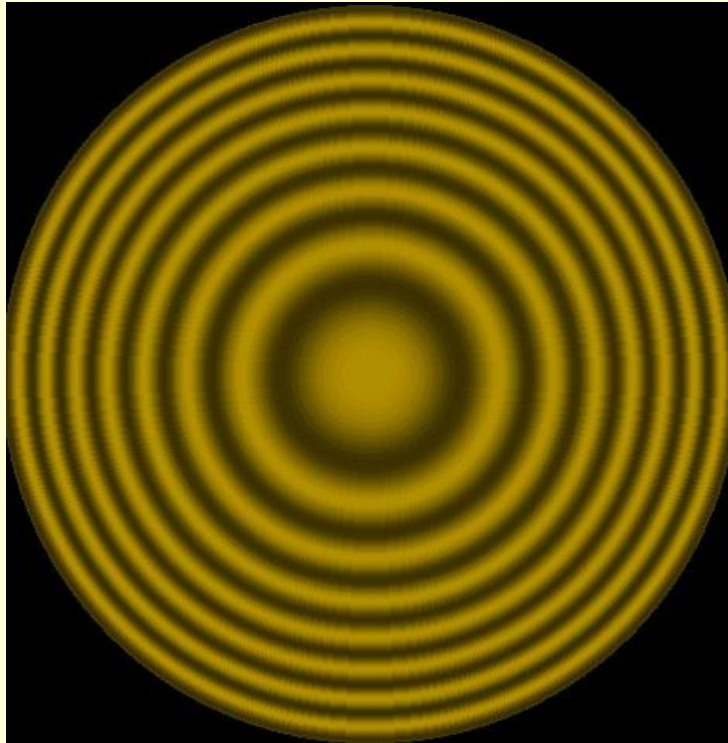
S_1' – референтная плоскость (плоскость сравнения)

– совпадает с изображением зеркала S_1 в полупрозрачном слое.

Если зеркало S_2 совпадает с референтной плоскостью, то $\Delta = 2(L_1 - L_2) = 0$

Можно получить 2 класса картин:

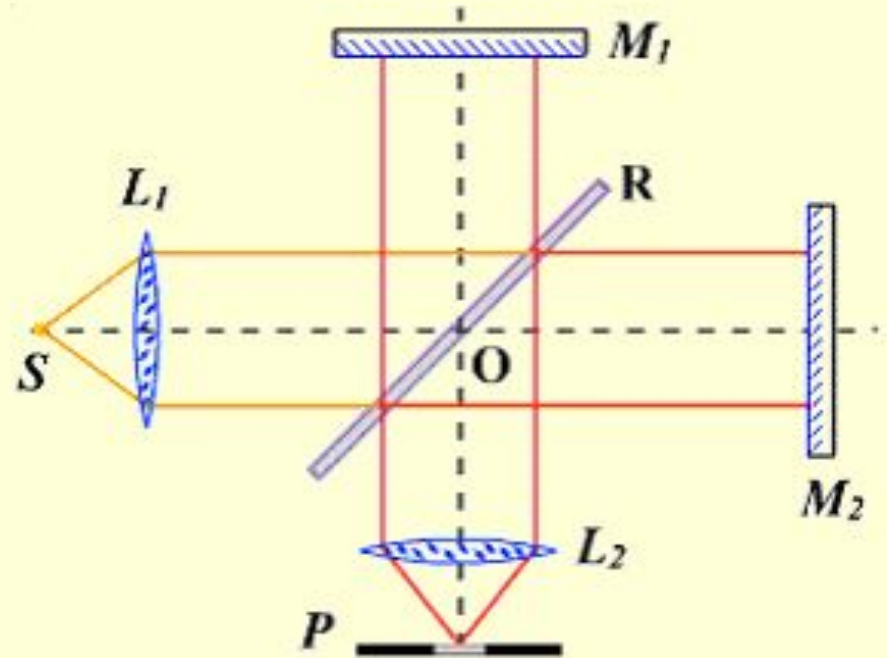
1. Линии равного наклона



Зеркало S_2 смещено от референтной плоскости, между S_1 и S_2 как бы плоскопараллельная пластинка.

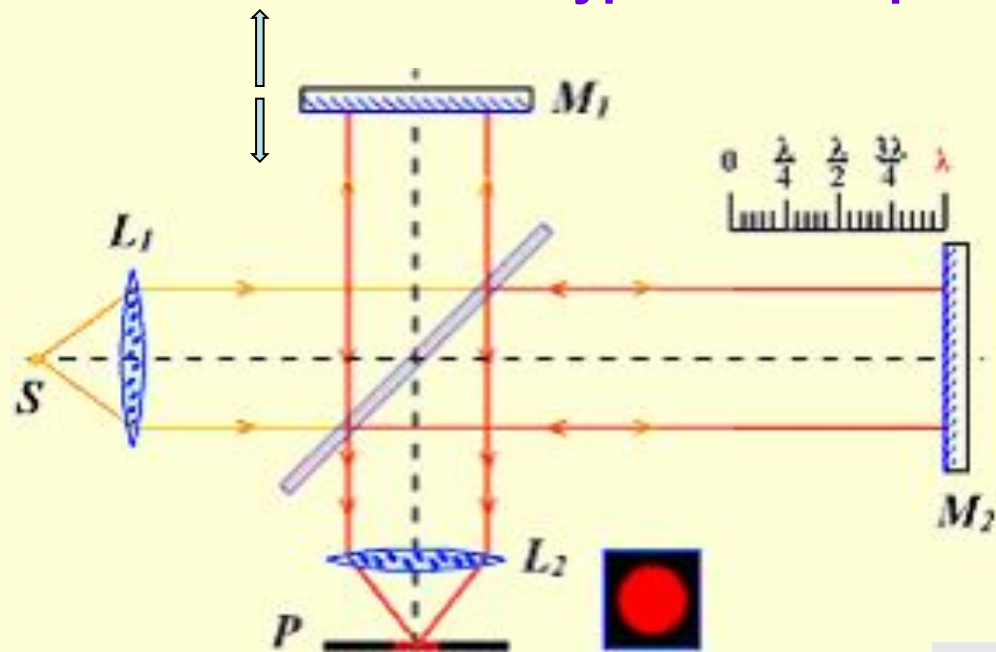
От источника света - расходящийся пучок.

2. Линии равной толщины



Зеркало S_2 наклонено к референтной плоскости. От источника света - параллельный пучок (через линзу)

Фурье - спектрометр



Для исследований ИК-части спектра слабых источников

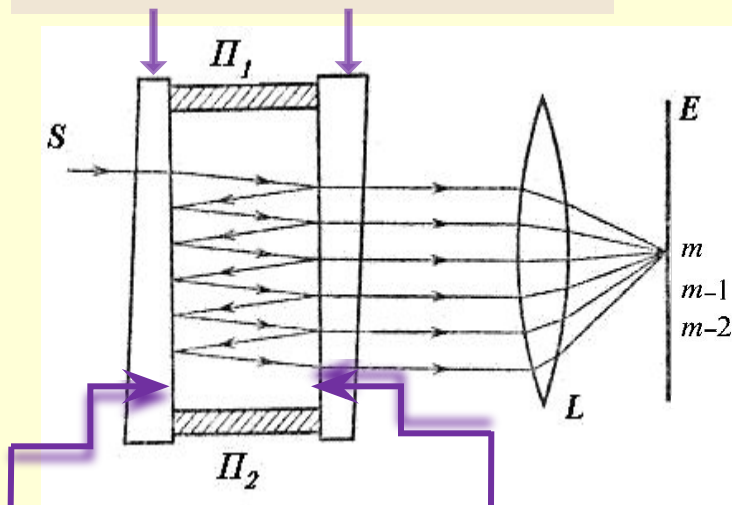


Многолучевая интерференция

Устройства для наблюдения

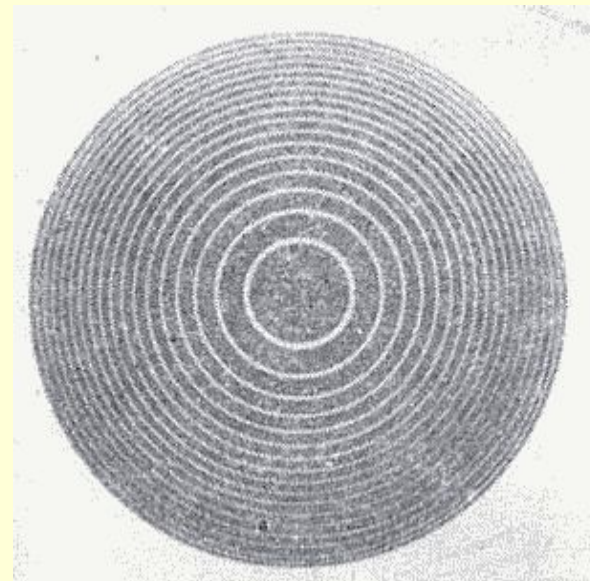
😊 Интерферометр Фабри - Перо

стеклянные или кварцевые
пластинки



частично прозрачная
металлическая плёнка
 $R = 0,95 - 0,98$

П1 и П2 - распорные
кольца



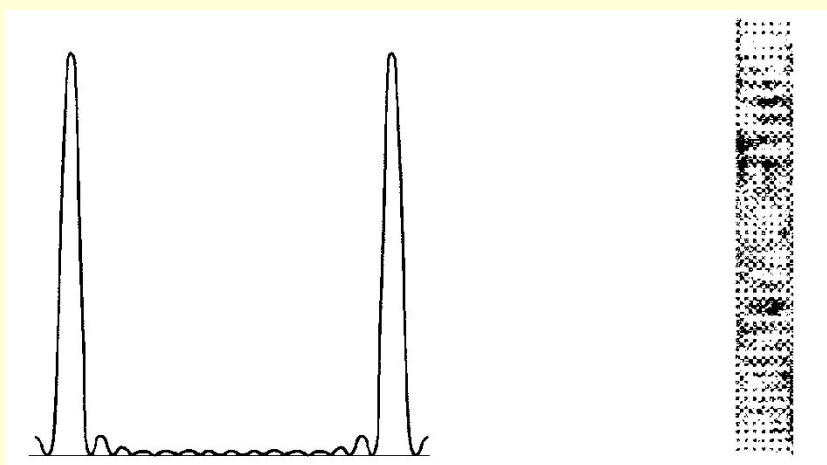
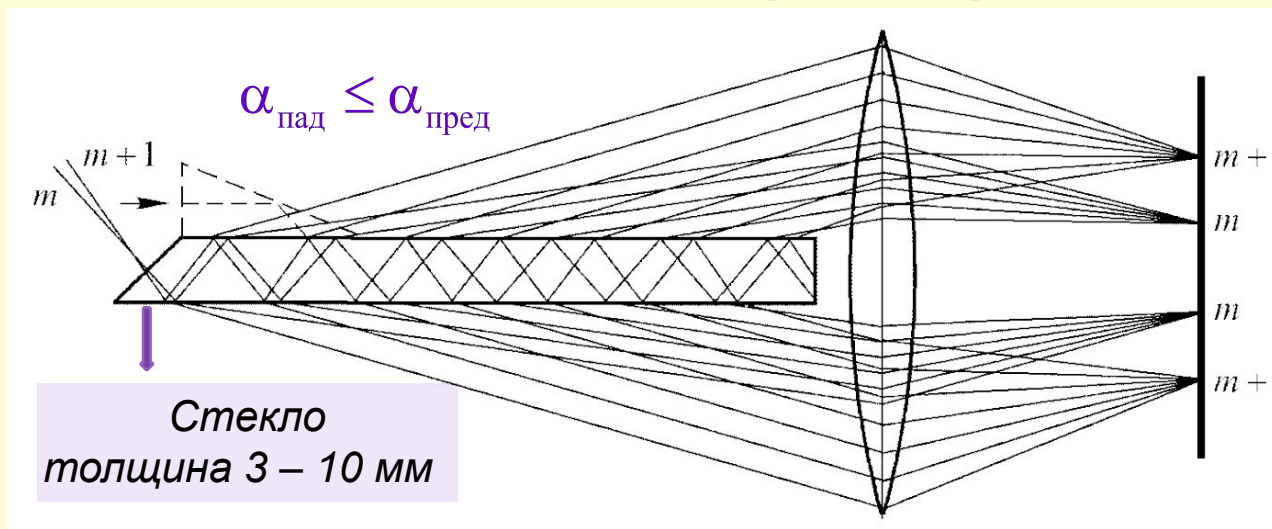
Интерференционная картина в виде
колец равного наклона, наблюдаемая в
интерферометре Фабри - Перо в
проходящем свете

$d = 1 - 100$ мм.

При $d = 5$ мм – $m = 20000$



Пластика Люммера - Герке



$$d_{\text{пред}} = \rho_{\text{коз}}$$

$$2dn \cos \beta = m\lambda$$

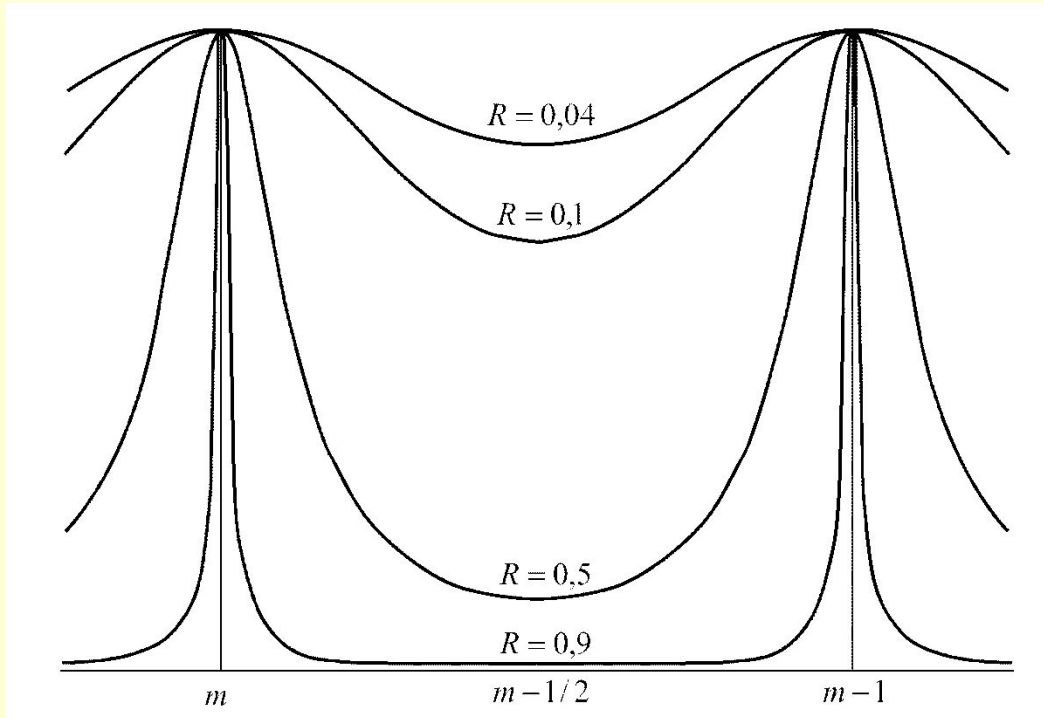
m - несколько десятков тысяч

График распределения
интенсивности и фотография
интерференционной картины

Применение - спектроскопия высокого разрешения в среднем ультрафиолетовом диапазоне (длины волн 0,1-0,2 мкм).



Распределение интенсивности



$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{(1 + R)^2}{(1 - R)^2}$$

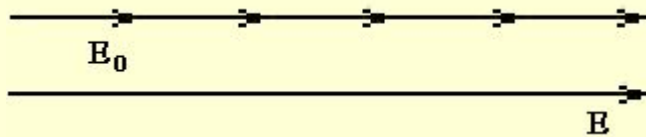
R – коэффициент отражения

*Кривые распределения интенсивности
в проходящем свете*

Распределение интенсивности

Анализ картины интерференции

1. Главные максимумы



$$\delta = 2m\pi$$

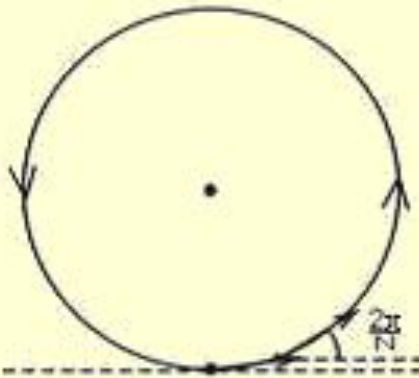
$$E = N E_0$$

$$I = N^2 I_0$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

$$\Delta_{\max} = m\lambda$$

2. Минимумы



$$I = 0$$

$$\delta N = k2\pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N-1$$

$$\delta = k \frac{2\pi}{N} + 2m\pi$$

$$\Delta_{\min} = m\lambda + k \frac{\lambda}{N}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

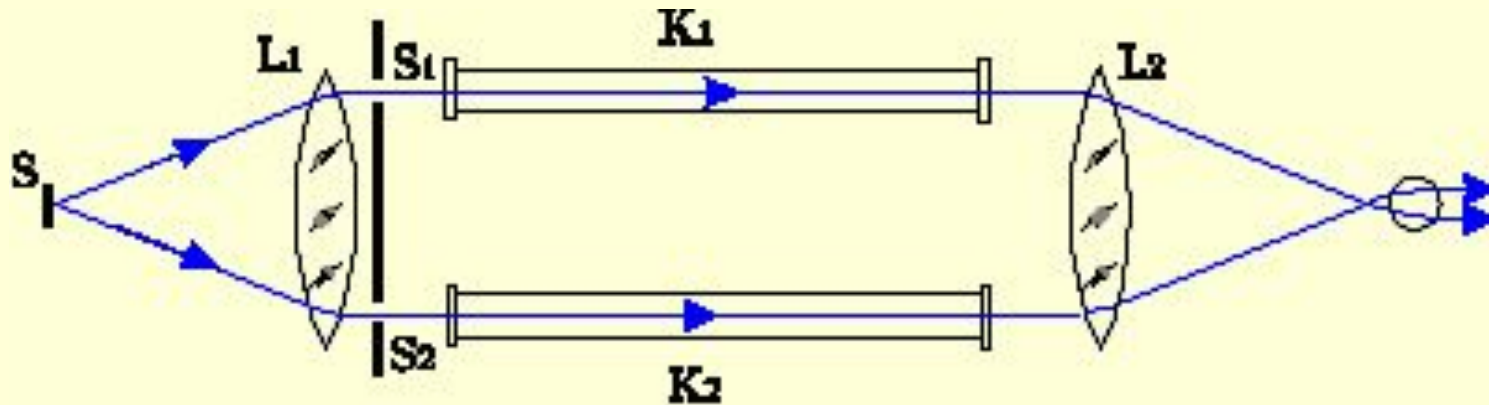
1, 2, 3... окружности

Интерферометр Линника

Предназначен для оценки качества поверхности.
Для этого одно из зеркал нужно заменить поверхностью.

Интерферометр Релея

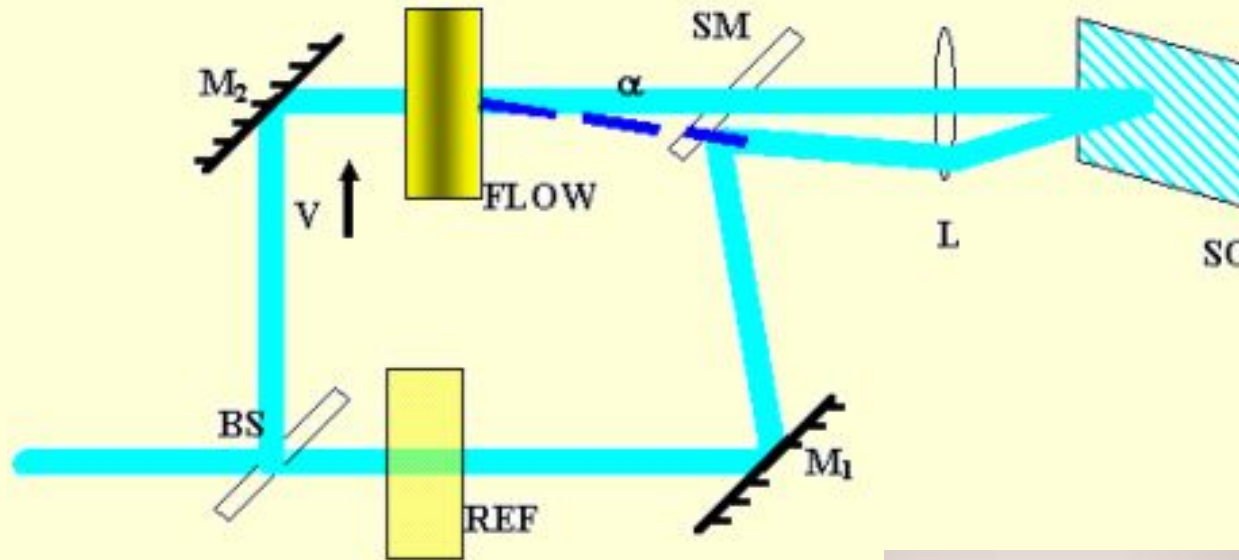
Предназначен для измерения показателей преломления газов и жидкостей



Внизу свет идет вне кювет. Нижняя система интерференционных полос - шкала для отсчета. Добавочная разность хода $\Delta = (n_2 - n_1)l$, где n_1 и n_2 - коэффициенты преломления веществ, заполняющих кюветы. Верхняя система полос сдвинута относительно нижней. По смещению с помощью компенсатора определяют $n_2 - n_1$. Позволяет обнаружить изменение $n_2 - n_1$ около 10^{-7} .

Интерферометр Маха-Цендера

предназначен для интерференционных измерений модуляции плотности в газовых потоках (в аэродинамических трубах и т.п.).



$n = 1 + t\lambda/L$,
где L - длина кюветы,
 t - порядок интерференции



Применение интерференции

Для измерений:

- Длины волны λ
- Коэффициента преломления n
- Длин эталонов
- Малых перемещений
- Деформаций
- Качества обработки поверхностей

Когерентность

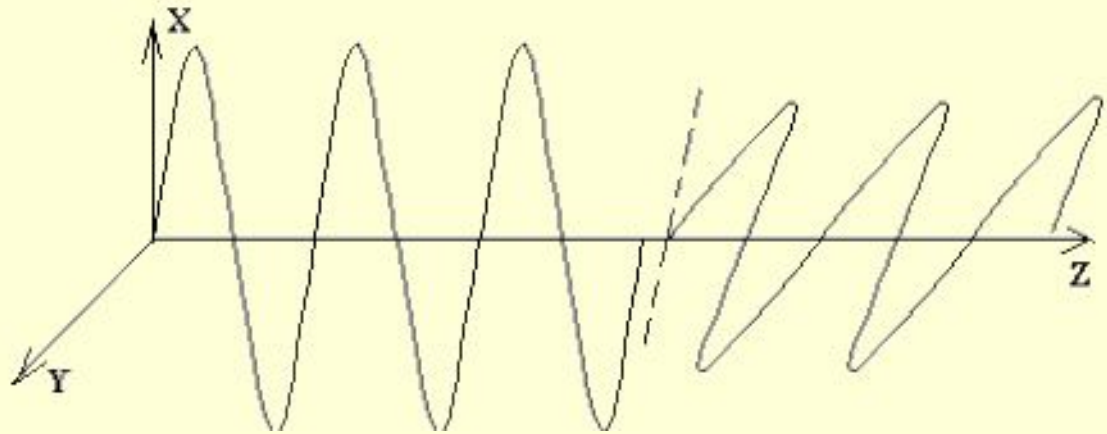


Условие когерентности: $\Delta\varphi = \text{const}$ в течение времени наблюдения.

Если $\Delta\varphi \neq \text{const} \rightarrow \langle \cos \Delta\varphi \rangle = 0 \rightarrow I = I_1 + I_2$ - закон фотометрического сложения.

Излучение от отдельного источника – набор цугов с хаотически распределенными фазами и направлениями вектора $\mathbf{E} \rightarrow$ волны, излучаемые двумя независимыми источниками не когерентны.

*Реальные
световые волны*



Общая идея получения когерентных волн

Свет от одного и того же источника нужно разделить на два (или несколько) пучка и затем наложить их друг на друга подходящим способом.

Условие временной когерентности:

$$\Delta_{12} < l_{\text{ког}} = l_{\text{цуга}}$$
$$\Delta t < \tau_{\text{ког}}$$

Δ_{12} – разность хода, вносимая схемой
 Δt – время запаздывания одного цуга относительно другого

При $\Delta_{12} > l_{\text{ког}}$ происходит размытие полос картины интерференции

Оценка $l_{\text{ког}}$ и τ

$$\tau \Delta \nu \approx 1 \rightarrow \tau_{\text{ког}} \approx 1 / \Delta \nu$$

$$\nu = c/\lambda \rightarrow \Delta \nu = \left| \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda \right|$$

$\Delta \lambda$ – ширина полосы пропускания фильтра или ширина спектральной линии

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{c \cdot \Delta \lambda}$$

$$l_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

Вывод: временная когерентность определяется степенью монохроматичности света

Временная когерентность



Временная когерентность – способность световых колебаний к интерференции в одной точке пространства после разделения исходного пучка на два и последующего их соединения с некоторой разностью хода.

Временная когерентность - это источник ухудшения картины интерференции, связанный с разбросом по частотам в данном излучении.

Цуг волн – часть последовательности колебаний, на протяжении которых сохраняется их регулярность.

$T_{\text{ког}}$ – **время испускания цуга или время когерентности** – наименьший интервал времени, в течение которого фаза и амплитуда монохроматической волны не меняются

$l_{\text{цуга}} = c \cdot T_{\text{ког}}$ – **длина цуга** – расстояние, на которое распространяется волна за время когерентности

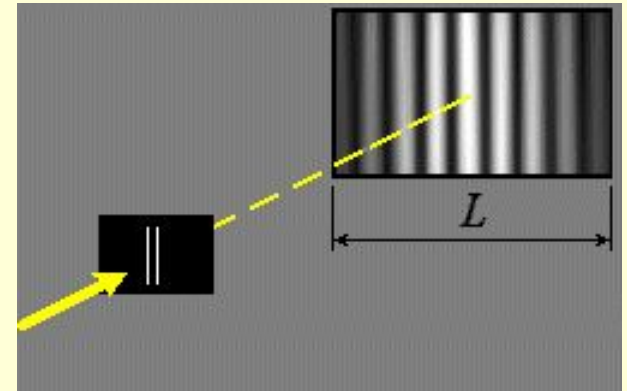
$l_{\text{ког}}$ – **длина когерентности** – максимальная разность хода, при которой возможна интерференция: $l_{\text{ког}} = l_{\text{цуга}}$

Оценка максимального числа интерференционных полос

$$\Delta \leq l_{\text{ког}} \Rightarrow \Delta_{\text{max}} = m_{\text{max}} \lambda \leq l_{\text{ког}} \Rightarrow m_{\text{max}} \approx \frac{\lambda_0}{|\Delta\lambda|} = \frac{v}{\Delta v}$$



Чем меньше разброс $\Delta\lambda$ или Δv тем больше степень монохроматичности, больше $\tau_{\text{ког}}$ и $\ell_{\text{ког}}$, т.е. лучше картина интерференции (больше m)



Примеры

Условия когерентности

1. Белый свет:

$$|\Delta\lambda| \approx 400 \text{ нм}, \Delta\omega \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ рад/с}, \ell_{\text{ког}} \approx 8 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \tau_{\text{ког}} \approx 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ с}, m_{\text{max}} \approx 1;$$

2. Светофильтр: полоса пропускаемых длин волн

$$|\Delta\lambda| \approx 10 \text{ нм}, \Delta\omega \approx 6 \cdot 10^{13} \text{ рад/с}, \ell_{\text{ког}} \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \tau_{\text{ког}} \approx 1 \cdot 10^{-13} \text{ с}, m_{\text{max}} \approx 55;$$

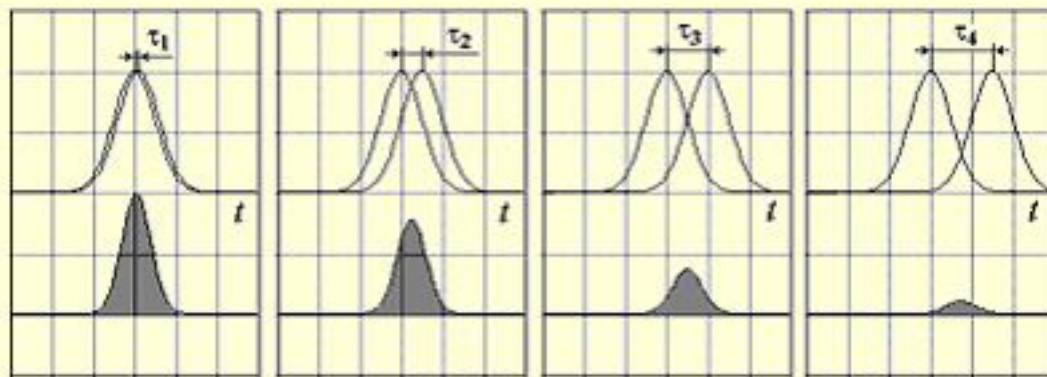
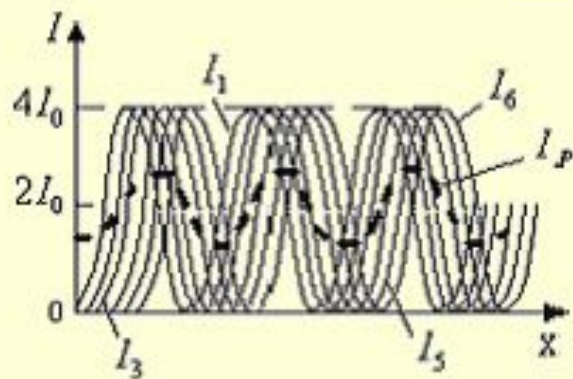
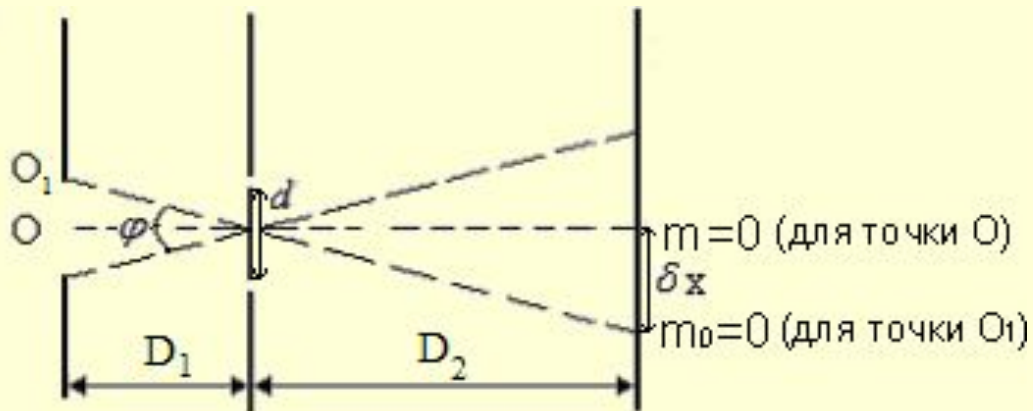
3. Испускаемый атомом цуг волны (идеальный случай):

$$|\Delta\lambda| \approx 10^{-4} \text{ нм}, \Delta\omega \approx 6 \cdot 10^8 \text{ рад/с}, \ell_{\text{ког}} \approx 3 \text{ м}, \tau_{\text{ког}} \approx 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}, m_{\text{max}} \approx 5,5 \cdot 10^6.$$

Условие пространственной когерентности

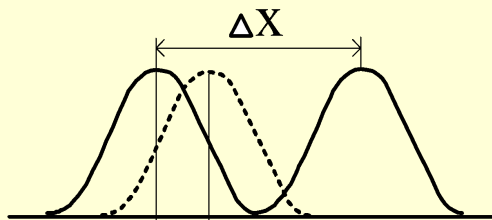


Пространственная когерентность - это источник ухудшения картины интерференции, связанный с расходимостью светового пучка и с конечными размерами источника излучения



Размытие интерференционной картины





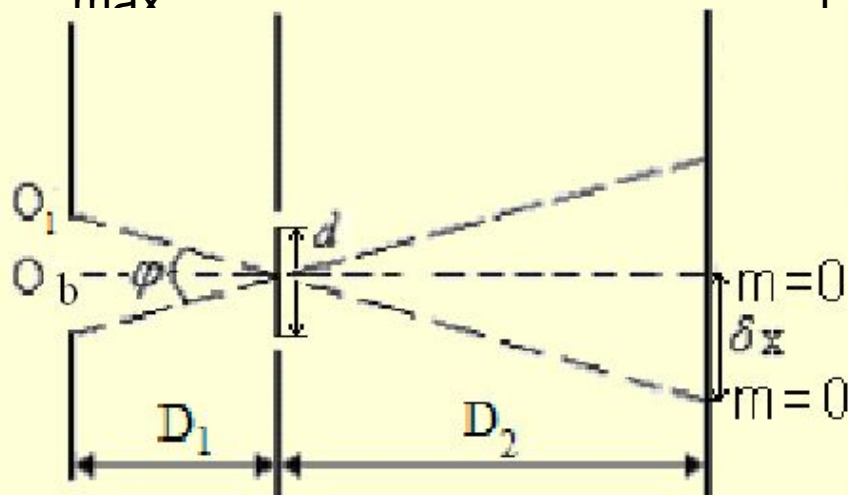
Условие наблюдения картины интерференции:

$$\delta x < \frac{\Delta x}{2}$$

δx - смещение 0-го макс

Из подобия треугольников

$$\frac{\delta x}{b/2} = \frac{D_2}{D_1} \Rightarrow \delta x = \frac{b}{2} \cdot \frac{D_2}{D_1}$$



$$\Delta x = \frac{\lambda D_2}{d} \rightarrow \frac{b}{2} \cdot \frac{D_2}{D_1} < \frac{\lambda D_2}{2d}$$

$\varphi = \frac{b}{D_1}$ - угловой размер источника

Оценочное условие пространственной когерентности:

$$d < \frac{\lambda}{\varphi}$$

Предельное расстояние между щелями:

$$d_{пред} = \frac{\lambda}{\varphi}$$

$d_{пред} = \rho_{ког}$ – радиус когерентности волнового поля, максимальное расстояние между точками волновой поверхности, на котором вторичные волны, испускаемые этими точками, еще будут когерентными.



Пример

При наблюдении картины интерференции от Солнца
(его угловые размеры $\varphi = 0,1 \text{ рад}$) для $\lambda_0 = 550 \text{ нм}$

$$\rho_{\text{ког}} = \cancel{dM} \frac{\lambda_0}{\varphi} = \frac{5,5 \cdot 10^{-7}}{0,01} = 0,055$$

Условие временной
когерентности:
(повторение)

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{c \cdot \Delta\lambda}$$

$$l_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

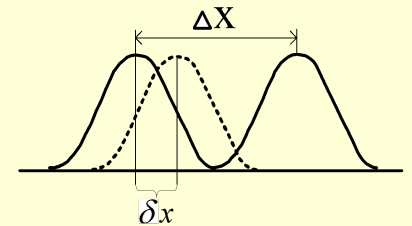
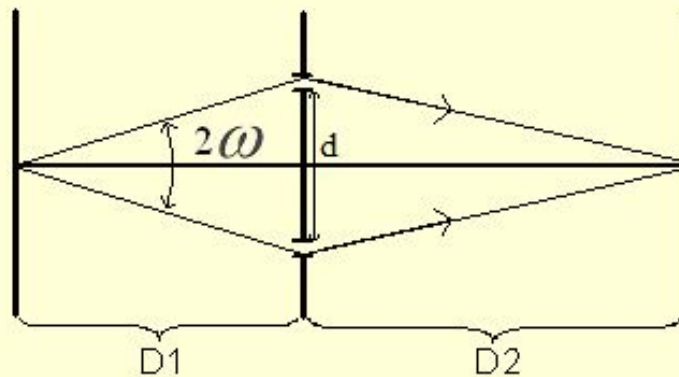
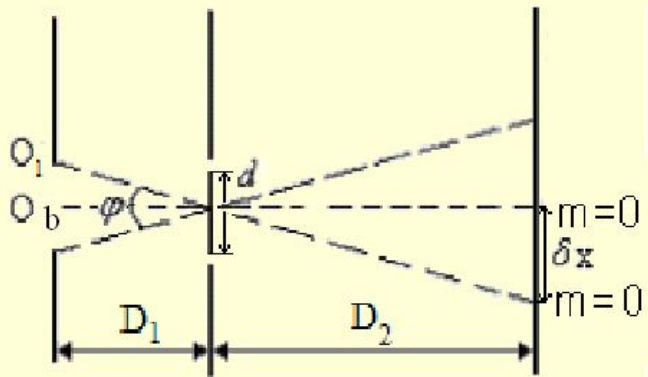
Объем когерентности

$$V_{\text{ког}} = \pi \cdot \rho_{\text{ког}}^2 \cdot l_{\text{ког}}$$

- объединенное условие пространственной и временной когерентности



Влияние ширины источника на интерференционную картину



Условие достаточной резкости картины интерференции:

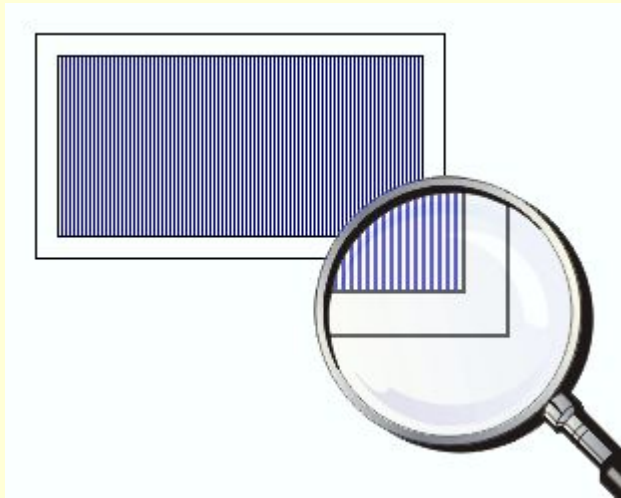
$$\delta x < \frac{\Delta x}{4}$$

$$\frac{b_{\max}}{2} \cdot \frac{D_2}{D_1} = \frac{\lambda D_2}{4d} \Rightarrow \frac{b_{\max}}{2} \cdot \frac{d}{D_1} = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow b_{\max} \operatorname{tg} \omega = \frac{\lambda}{4}$$

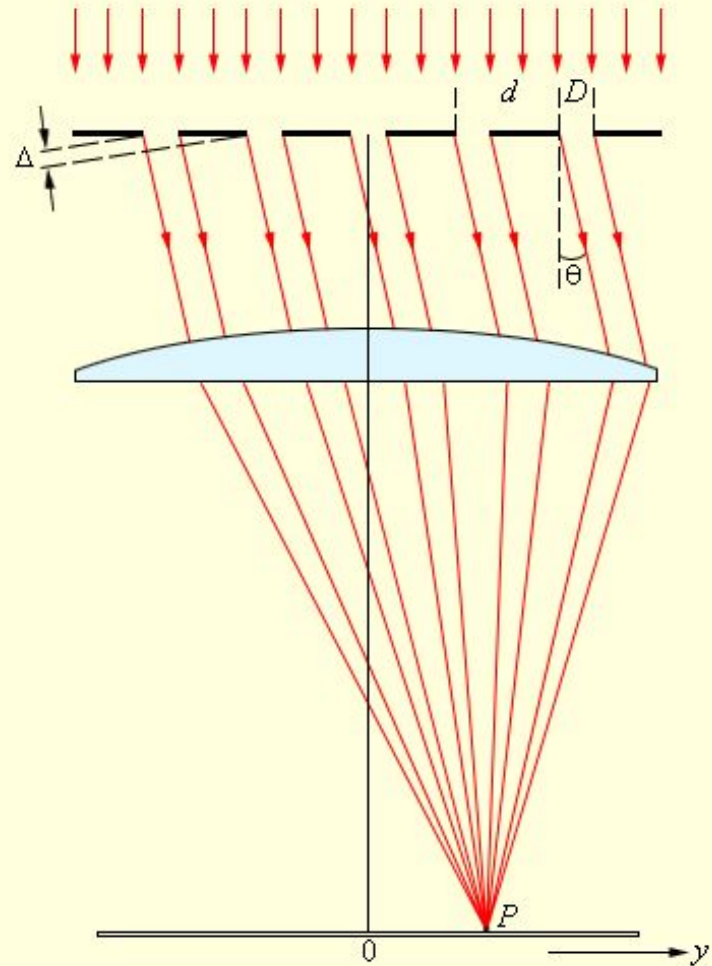
2ω - апертура интерференции – угол между лучами, сходящимися в одной точке интерференционного поля в момент их выхода из источника.



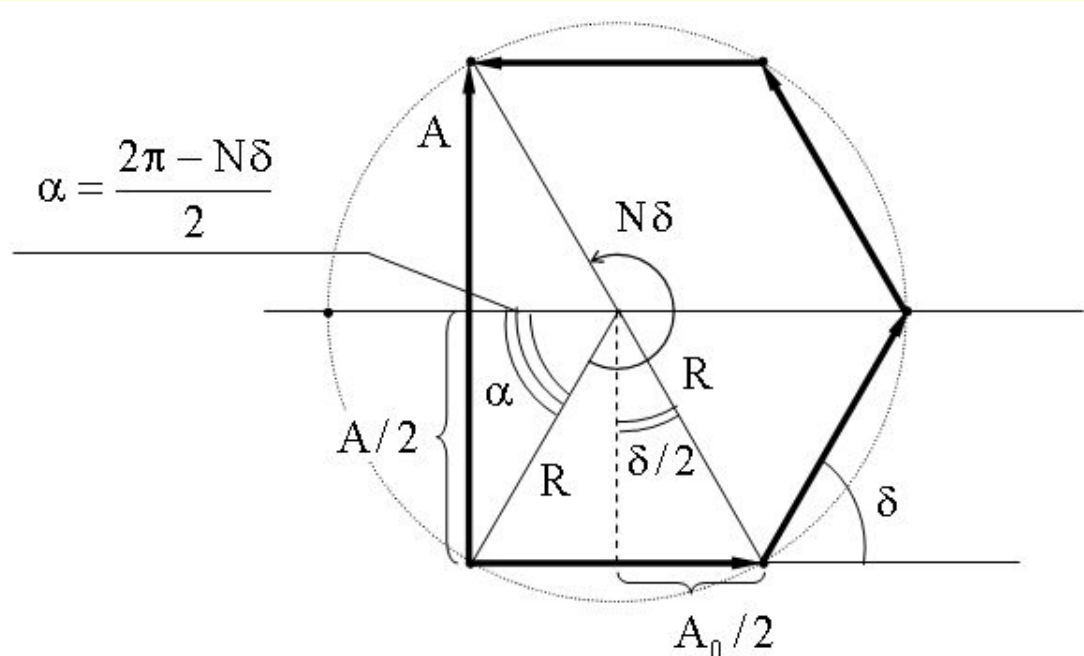
Дифракционная решетка



50 – 2000 штрихов на миллиметр



Распределение интенсивности



$$\frac{A_0}{2} = R \cdot \sin \frac{\delta}{2},$$

$$\frac{A}{2} = R \cdot \sin \frac{2\pi - N\delta}{2} = R \cdot \sin \frac{N\delta}{2}.$$

$$A = A_0 \frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)}$$

$$I \sim A^2$$

$$I = I_0 \frac{\sin^2(N\delta/2)}{\sin^2(\delta/2)}$$

N – число источников одинаковой интенсивности ($N > 2$).

δ – сдвиг фаз между соседними источниками

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

A_0 – амплитуда от одного источника (E_0)

A - результирующая амплитуда (E)

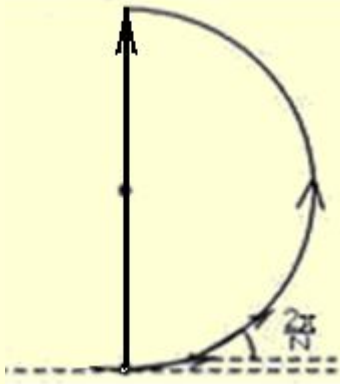
<http://www.bollywood.im/videos/>[многочувствительная-интерференция.html](http://www.bollywood.im/videos/многочувствительная-интерференция.html)<http://www.bollywood.im/videos/многочувствительная-интерференция.html>



Распределение интенсивности

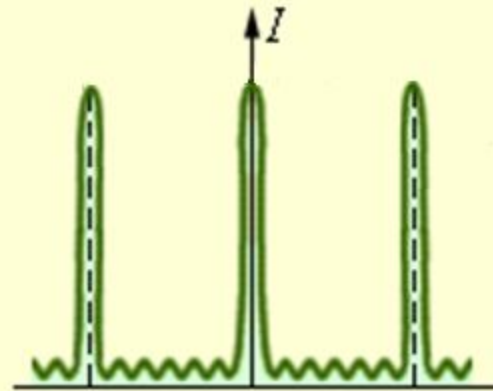
Анализ картины интерференции

3. Побочные максимумы



0,5; 1,5; 2,5... окружности

$$\delta = (2k + 1) \frac{2\pi}{N} + 2m\pi$$



Вывод: многолучевая интерференция характеризуется большой концентрацией энергии в главных максимумах

Продолжение
следует

