

ЛЕКЦИЯ 1

Раздел 5. Волновая оптика.

По электромагнитной теории Максвелла свет – это электромагнитные волны, которые в вакууме распространяются со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (скорость света), а в любой другой прозрачной среде их скорость меньше.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}, \quad (1-1)$$

Физическая величина, показывающая во сколько раз скорость электромагнитной волны (скорость света) меньше в данной среде по сравнению с вакуумом

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu} = \frac{c}{v}, \quad (1-2)$$

называется **абсолютным показателем преломления среды**.

Значит, для света должны наблюдаться все волновые явления, как и для любых волн – интерференция, дифракция, поляризация и дисперсия.

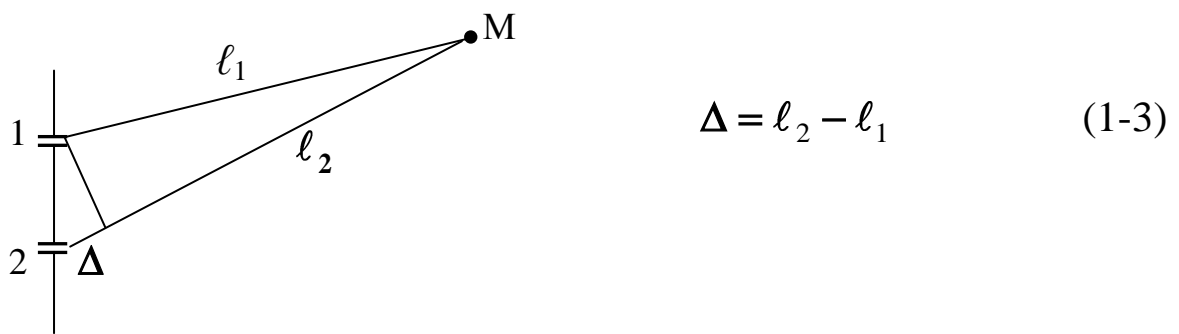
1. Интерференция световых волн

Волны от разных источников могут накладываться друг на друга. Это согласно принципу суперпозиции может привести к интерференции, если будут накладываться когерентные волны.

Волны, у которых разность фаз не зависит от времени, называются **когерентными** (для этого волны должны быть **монохроматическими** (с одинаковой частотой или длиной волны $\omega_1 = \omega_2$, $\lambda_1 = \lambda_2$) и разность начальных фаз также не должна меняться с течением времени $\Delta\varphi_0 = \text{const}$).

Результат наложения когерентных волн, при котором в местах наложения наблюдаются усиление и ослабление амплитуды (интенсивности), наблюдаются max и min , называется **интерференцией**.

Результат интерференции зависит от разности хода волн.



Если $\Delta = \pm m\lambda$, $m = 0, 1, 2, \dots$, тогда будет наблюдаться интерференционный max.

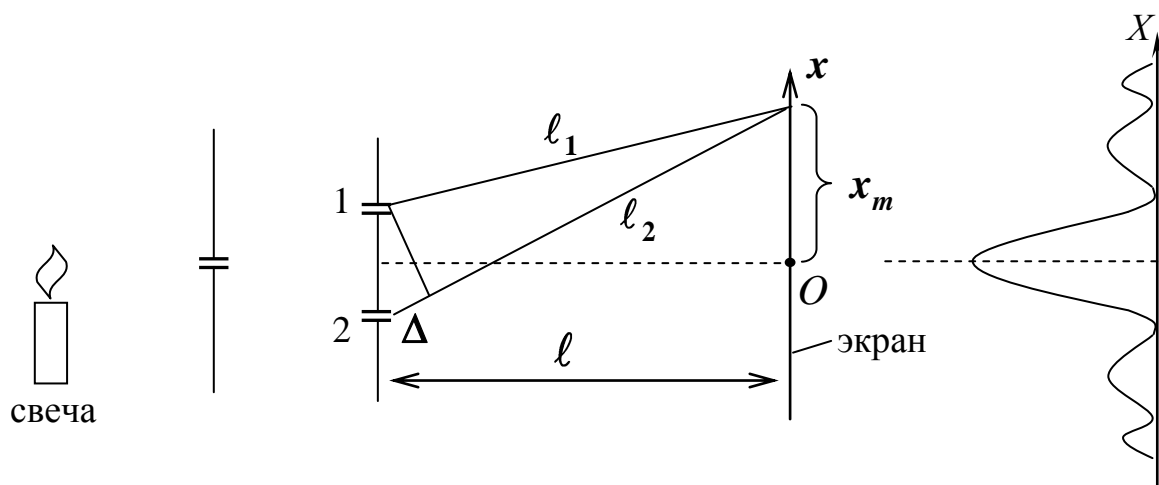
Если $\Delta = \pm \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda$, $m = 1, 2, 3, \dots$, тогда будет наблюдаться интерференционный min.

Свет от всех естественных и большинства искусственных источников излучается возбужденными атомами этих веществ. Их излучение никак не согласовано, оно происходит спонтанно (самопроизвольно).

Следовательно, световые волны от разных источников некогерентные.

Выполнить первое условие когерентности (монохроматичность $\omega_1 = \omega_2$) не представляет большого труда. А вот второе условие $\Delta\varphi_0 = \text{const}$ долгое время не удавалось реализовать.

Английский физик Юнг впервые догадался разделить свет от одного источника на части.



Свет от источника попадал на непрозрачную ширму, в которой было две узкие щели. Они исполняли роль вторичных источников.

Поэтому световые волны от вторичных источников оказывались когерентными, и на экране наблюдалась типичная интерференционная картина.

Так как свет в разных средах распространяется с разными скоростями, тогда вместо геометрической длины пути и разности хода используется оптическая длина пути.

$$s = n\ell \quad (1-4)$$

и оптическая разность хода лучей

$$\Delta = s_2 - s_1 \quad (1-5)$$

Тогда, если $\Delta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1-6)$

– условие интерференционного max.

Если $\Delta = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (1-7)$

– условие интерференционного min.

Юнг наблюдал интерференционную картину на экране и получил формулы для определения max и min на экране:

$$x_{\max} = \pm \frac{\ell}{d} m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1-8)$$

$$x_{\min} = \pm \frac{\ell}{d} \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (1-9)$$

где d – расстояние между щелями.

Ширина интерференционной полосы

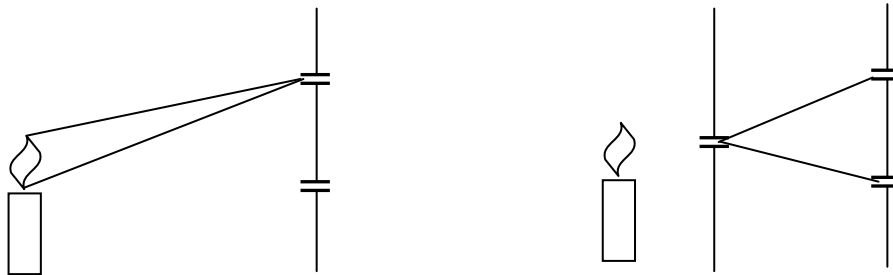
$$\Delta x = \frac{\ell}{d} \lambda. \quad (1-10)$$

Свет излучается цугами (время излучения – $\tau \sim 10^{-8}$ с, длина цуга $\ell_{\text{ц}} = c\tau \sim$ несколько метров).

Для наблюдения интерференции световой волны необходимо, чтобы

$$\Delta \ll \ell_{\text{ког}} = \ell_{\text{цуга}}$$

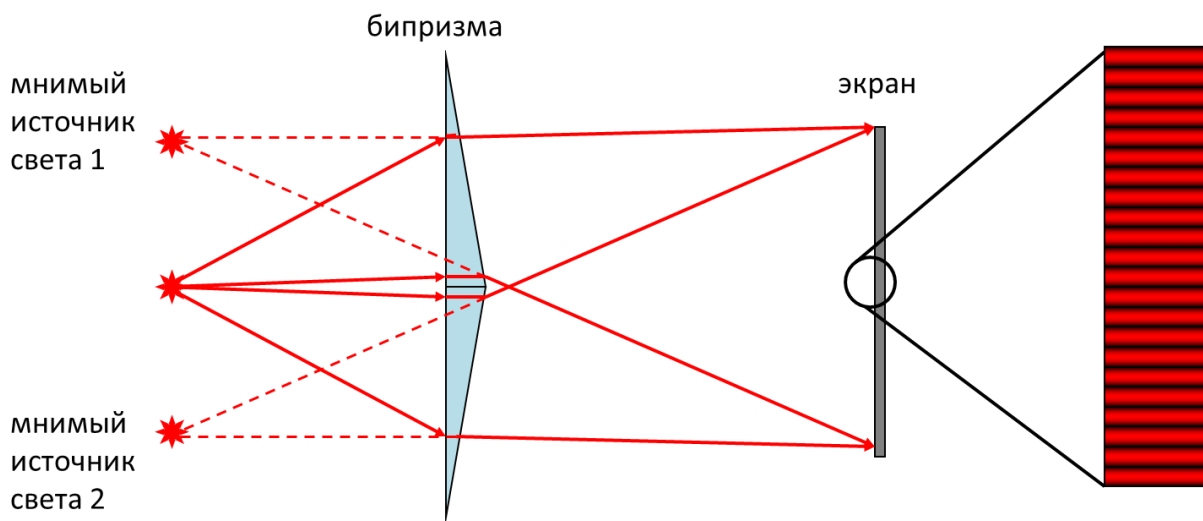
– условие временной когерентности.



$$\Delta_{\text{доп}} \ll \lambda/2.$$

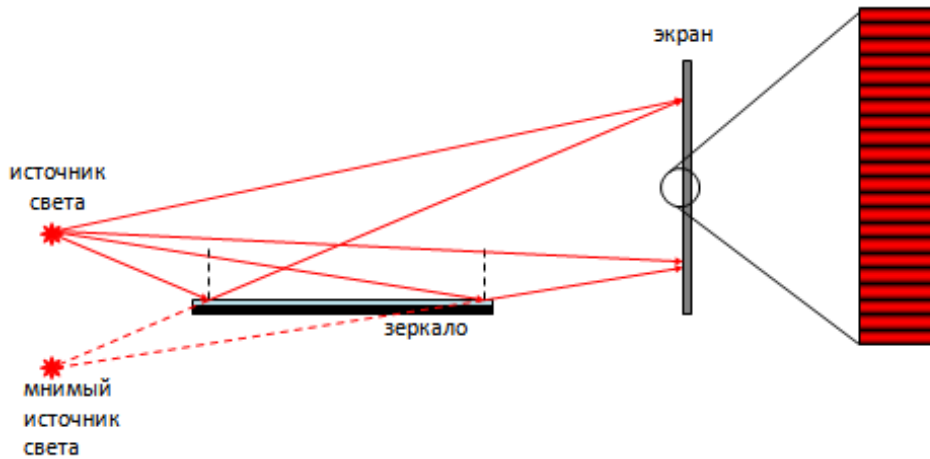
– условие пространственной когерентности.

Бипризма Френеля



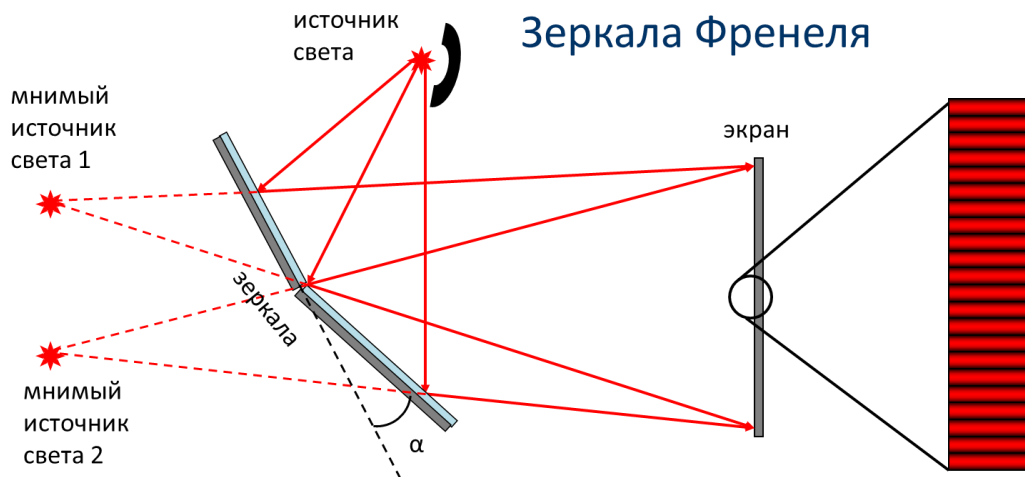
Способы получения когерентных источников

Зеркало Ллойда



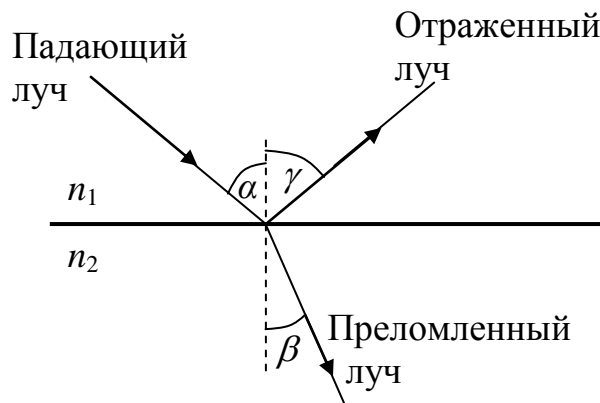
Способы получения когерентных источников

Зеркала Френеля



2. Интерференция света в тонких пленках

Если на границу раздела двух сред с разными показателями преломления падает луч монохроматического света, то он частично отражается и частично преломляется.



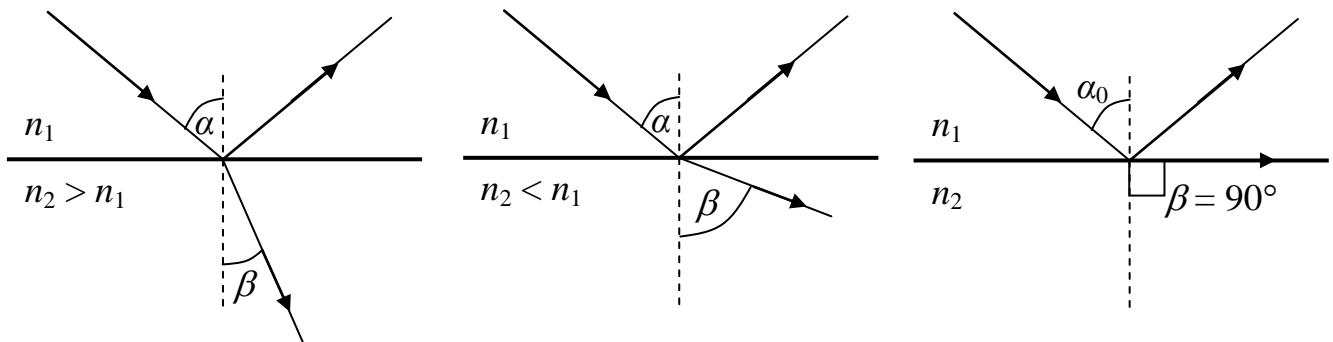
α – угол падения, β – угол преломления, γ – угол отражения.

Законы геометрической оптики:

1. Закон отражения света: луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, проведенный в точку падения, лежат в одной плоскости и угол отражения равен углу падения $\alpha = \gamma$.
2. Закон преломления света: луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный в точку падения, лежат в одной плоскости и $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$.

Если $n_2 > n_1$, то $\beta < \alpha$ – всегда есть преломленный луч.

Если $n_2 < n_1$, то $\beta > \alpha$

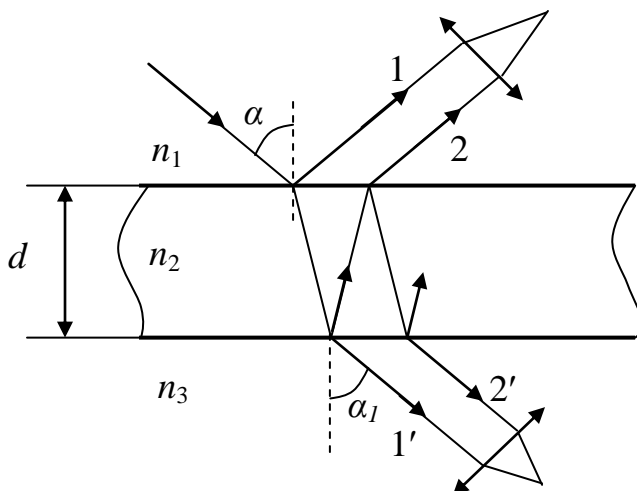


$$\text{при } \beta \rightarrow 90^\circ \quad \alpha = \alpha_0 \quad \sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

– полное внутреннее отражение света

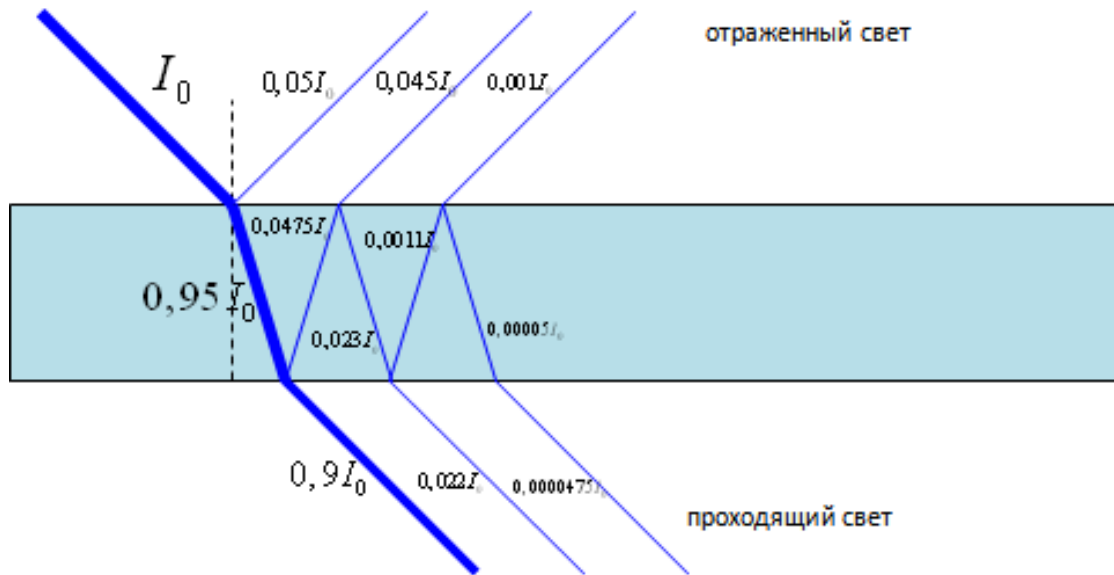
(медицина, световолоконная оптика)

Если на плоскопараллельную тонкую пленку падает параллель-

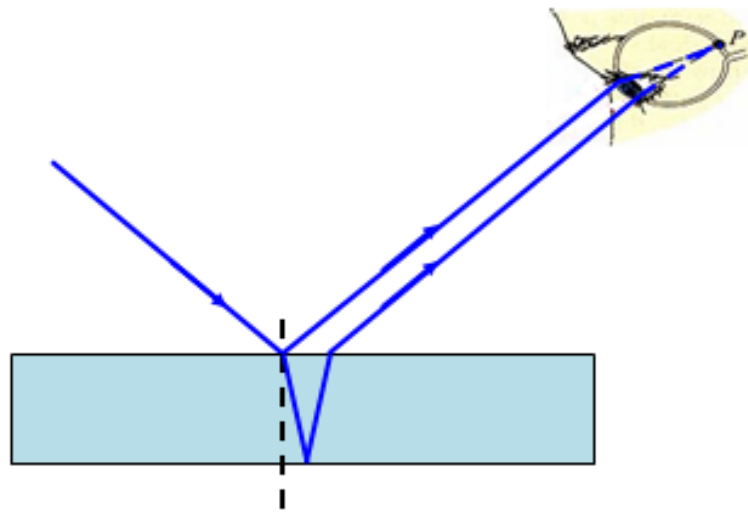


ный пучок монохроматического света, то за счет отражения и преломления на верхней и нижней границах пленки образуются когерентные отраженные (1 и 2) и прошедшие (1' и 2') лучи, которые при дальнейшем накладывании друг на друга будут интерферировать.

Интенсивность световых пучков



Локализация интерференционной картины



Оптическая разность хода для отраженных лучей 1 и 2 вычисляется по формуле:

$$\Delta_{\text{отр}} = s_2 - s_1 = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} + \Delta_{\text{доп}} \quad (1-11)$$

а для проходящих лучей 1' и 2':

$$\Delta_{\text{прох}} = s'_2 - s'_1 = 2d \sqrt{n_2^2 - n_3^2 \sin^2 \alpha_1} + \Delta'_{\text{доп}} \quad (1-12)$$

Для определения $\Delta_{\text{доп}}$ и $\Delta'_{\text{доп}}$ необходимо руководствоваться правилом:

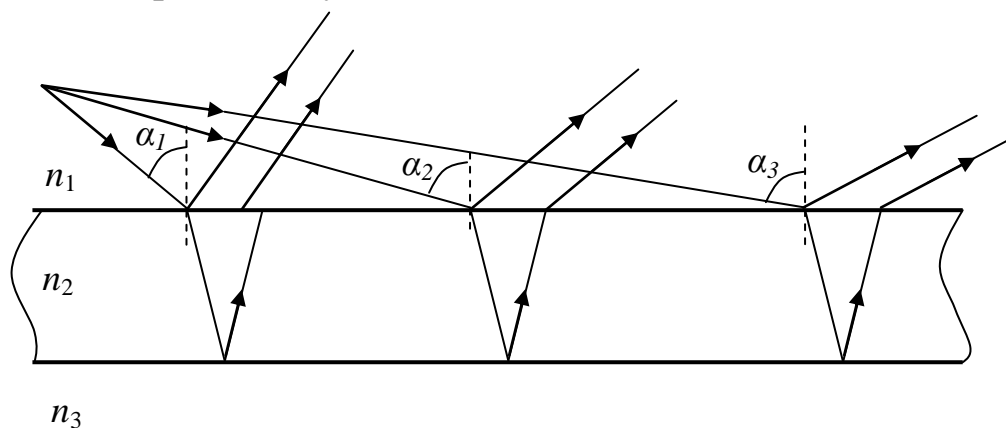
при отражении света от оптически более плотной среды (с большим показателем преломления) происходят изменения фазы волны на 180° и к оптической длине пути этого луча нужно добавить $\lambda/2$; при отражении света от менее плотной среды и при преломлении потери фазы не происходит.

А дальше, если $\Delta = \pm m\lambda$, $m = 0, 1, 2, \dots$, то вторичные волны при наложении будут усиливать друг друга – значит, вся пленка будет освещена (или в отраженных лучах, или в проходящих) цветом той длины волны, которой облучают пленку.

А если $\Delta = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda$, $m = 1, 2, 3, \dots$, то пленка (в отраженных или проходящих лучах) будет темной.

Если пленка освещается белым светом, то цвет освещенности пленки будет зависеть от того, для какой длины волны наблюдается условие max для отраженных лучей, а для какой – для проходящих.

Если на плоскопараллельную тонкую пленку падает монохроматический свет от точечного источника, тогда в разные точки пленки лучи падают под разными углами.



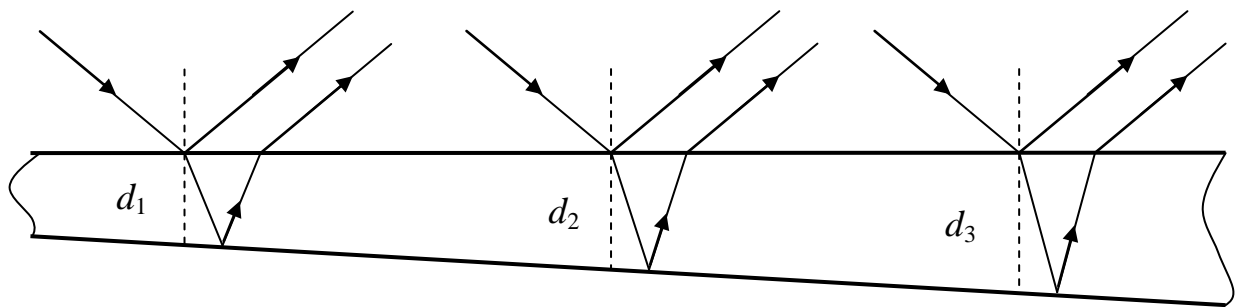
Тогда условие max или min будут наблюдаться только для тех точек пленки, куда лучи падают под одинаковым углом.

В тех точках, где выполняется условие max , будет светлая полоса, а где выполняется условие min , будет темная полоса.

Интерференционные полосы, получающиеся на пленке (в отраженном или проходящем свете) при освещении ее расходящимся светом, называются полосами равного наклона.

При освещении плоскопараллельной тонкой пленки расходящимся пучком белого света, на пленке будут наблюдаться разноцветные полосы равного наклона.

Если параллельный пучок монохроматического света падает на тонкую пленку переменной толщины (клин), тогда в разных точках пленки, куда падает свет, толщина будет разной.

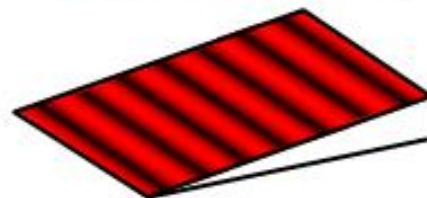
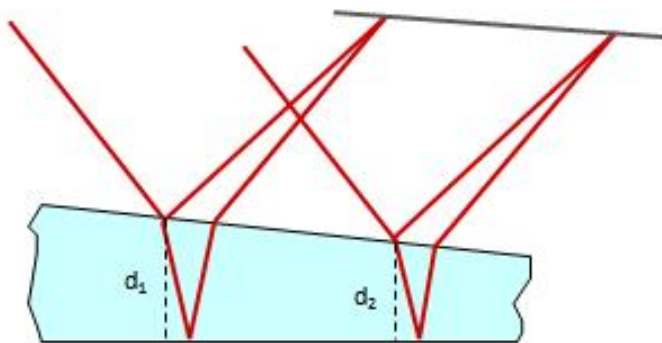


Тогда условие \max или \min будет наблюдаться только для тех точек пленки, где толщина будет одинаковой.

В тех точках, где выполняется условие \max , будет светлая полоса, а где выполняется условие \min , будет темная полоса.

Интерференционные полосы, получающиеся на пленке переменной толщины (в отраженном или проходящем свете) при освещении ее параллельным светом, называются полосами равной толщины.

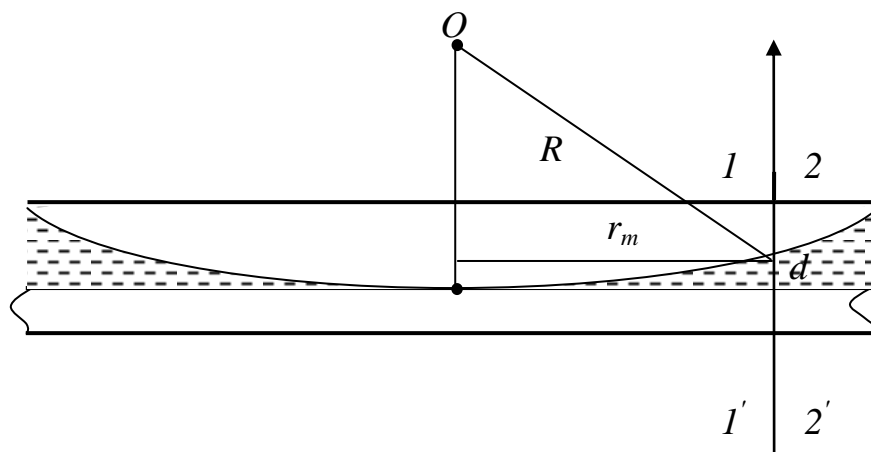
Полосы равной толщины



При освещении пленки переменной толщины белым светом на пленке будут наблюдаться разноцветные полосы равной толщины.

Частным случаем полос равной толщины являются кольца Ньютона, которые получаются при облучении светом плосковыпуклой

стеклянной линзы с большим радиусом кривизны, лежащей на плоскопараллельной стеклянной пластине.



Между стеклянной линзой и стеклянной пластинкой образуется тонкая пленка переменной толщины (либо воздушная с $n = 1$, либо заполненные какой-либо жидкостью или газом с показателем преломления n).

При нормальном падении света на линзу ($\alpha = 0$) оптическая разность хода отраженных (1 и 2) и проходящих (1' и 2') лучей будет вычисляться из формулы:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{норм}} &= 2dn \pm \Delta_{\text{дон}}, \\ \Delta_{\text{прох}} &= 2dn \pm \Delta'_{\text{дон}}.\end{aligned}\tag{1-13}$$

Интерференционные полосы будут наблюдаться в точках, где толщина пленки будет одинаковой, т.е. в виде концентрических колец.

Для оптически менее плотной среды пленки, чем стекло, радиусы светлых (max) и темных (min) полос (колец) в отраженном свете будут определяться по формулам:

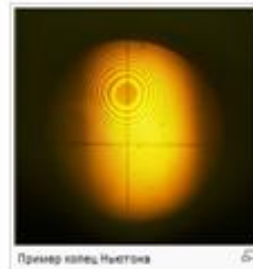
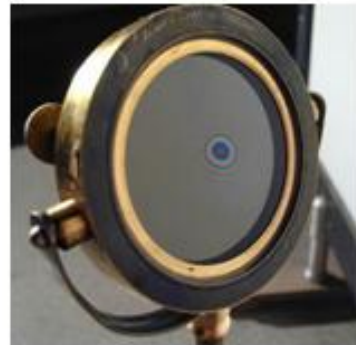
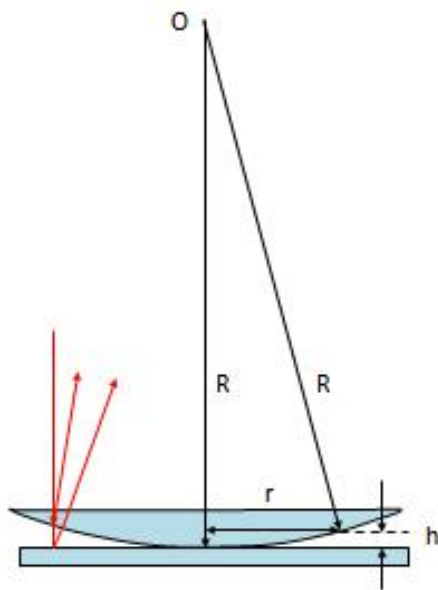
$$\left. \begin{aligned}r_{\text{max}} &= \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{R}{n} \lambda}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \\ r_{\text{min}} &= \sqrt{m \frac{R}{n} \lambda}, \quad m = 0, 1, 2, \dots\end{aligned}\right\}\tag{1-14}$$

где R – радиус кривизны линзы.

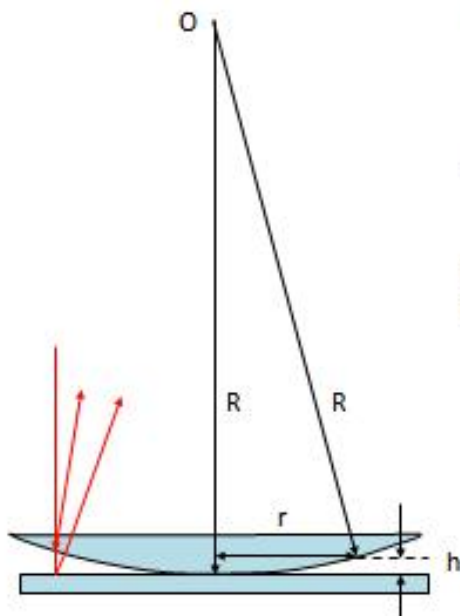
В проходящих лучах формулы меняются местами.

При освещении установки белым светом будут наблюдаться разноцветные полосы Ньютона.

Кольца Ньютона



Кольца Ньютона



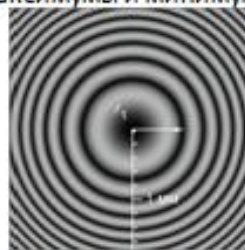
Для светлых колец в отраженном свете

$$r_{\text{св}}^{\text{отр}} = \sqrt{\frac{(2m+1)R\lambda}{2}}$$

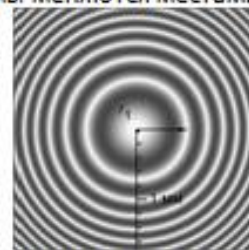
Для темных колец в отраженном свете

$$r_{\text{тем}}^{\text{отр}} = \sqrt{mR\lambda}$$

В проходящем свете интерференционные максимумы и минимумы меняются местами



отраженный свет

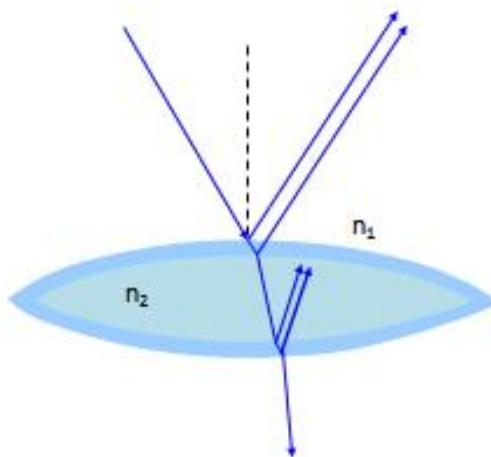


проходящий свет

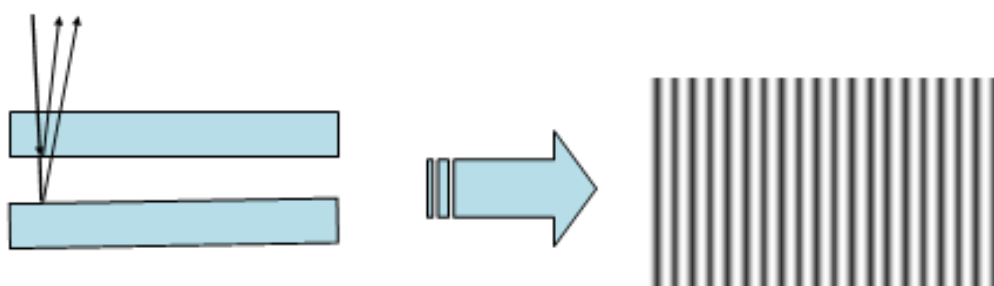
3. Практическое применение интерференции. Интерферометры

– просветленная оптика;

Просветление оптики



Обработка поверхностей



Практическое применение интерференции:

– мыльные пузыри, елочные игрушки, пленки на значках и т.п.;

Интерференция вокруг нас



Масляное пятно на асфальте

Мыльные пузыри



Елочные игрушки



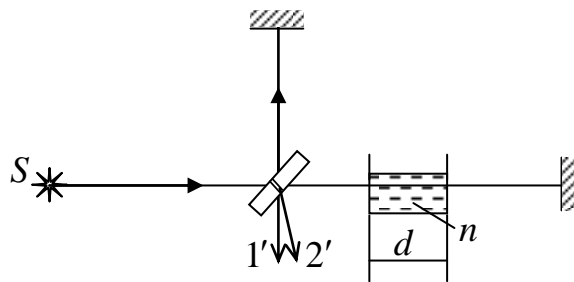
Живая природа



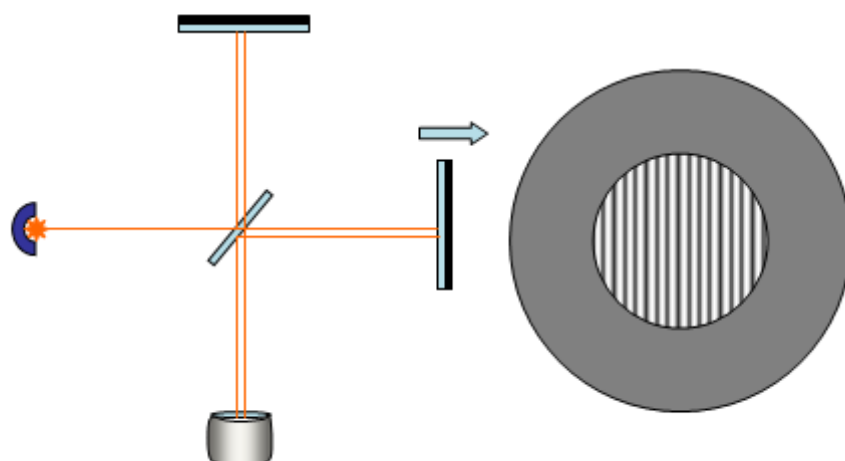
Практическое применение интерференции:

– интерферометры и др.).

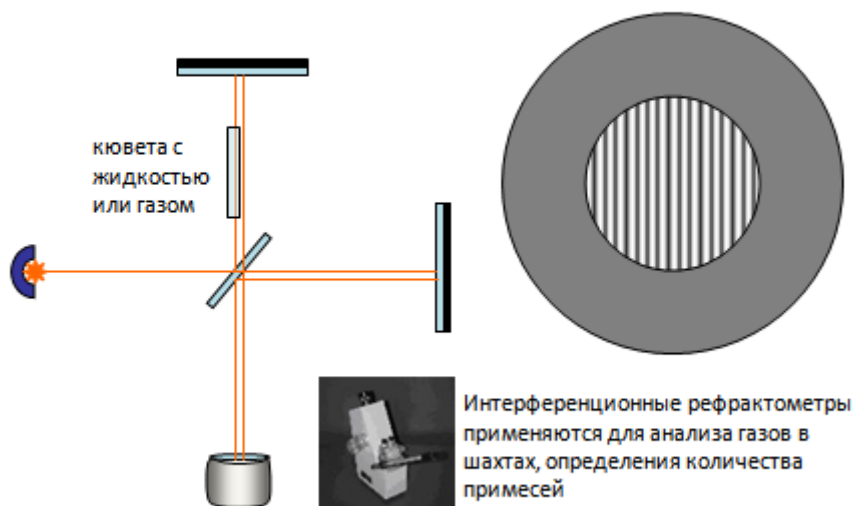
Майкельсона:



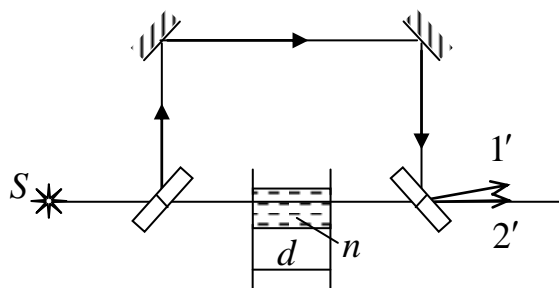
Измерение смещений



Рефрактометрия



Фабри-Перро:



- определение n , d ;
- параллельность тонких пленок и т. д.