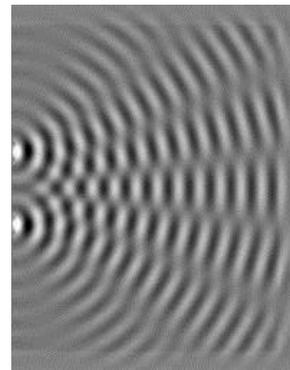


Тема: Волновые свойства света: интерференция

Интерференцией света называется явление устойчивого во времени усиления или ослабления света в различных точках пространства, которое происходит при наложении двух или нескольких когерентных волн.

Интерференция – одно из проявлений волновой природы света. Интенсивность света в области перекрытия световых пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос, причем в максимумах интенсивность света больше, а в минимумах меньше суммы интенсивностей отдельных пучков. Наблюдаемое при этом перераспределение света называется **интерференционной картиной**.

Интерференция свойственна не только световым волнам, являющимися по своей природе электромагнитными волнами, но и волнам любой природы.



Монохроматические волны

Монохроматическая волна - это строго гармоническая (синусоидальная) волна с постоянными во времени частотой, амплитудой и начальной фазой.

Амплитуда и фаза такой волны могут изменяться от одной точки пространства к другой, частота же остается постоянной во всем пространстве.

Монохроматическая волна – это идеализация реальной волны: она не ограничена ни во времени, ни в пространстве, поэтому не может быть реализована в действительности. Однако эта идеализация удобна для описания и играет большую роль в учении о волнах.

Расчет интерференции двух волн

Сущность интерференции рассмотрим на примере сложения двух одномерных гармонических световых волн (волн вида $E = E_{max} \cos(\omega t - kx + \varphi)$) одинаковой частоты и одинаковой плоскости поляризации.

Накладываясь друг на друга, они возбуждают в некоторой точке пространства гармонические колебания

$$E = E_1 + E_2 = E_{1,max} \cos(\omega t + \varphi_1) + E_{2,max} \cos(\omega t + \varphi_2) = E_{max} \cos(\omega t + \varphi),$$

амплитуду которых можно определить методом векторных диаграмм:

$$E_0^2 = E_{1,max}^2 + E_{2,max}^2 + 2E_{1,max}E_{2,max} \cos(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Интенсивность световой волны пропорциональна квадрату амплитуды вектора напряжённости электрического поля световой волны $I \sim E_{max}^2$. Поэтому, наблюдаемая при наложении волн результирующая интенсивность света равна

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (1)$$

Из анализа уравнения (1) следует, что результат сложения колебаний зависит от разности фаз $\varphi_2 - \varphi_1$, которая в общем случае меняется при переходе от одной точки пространства к другой. При этом возможны следующие три случая:

1. Разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ меняется в данной точке пространства с течением времени произвольно

Так как частота колебаний световых волн очень большая ($\nu \approx 10^{14} \text{ Гц}$), то глаз человека и другие приёмники светового излучения воспринимают усреднённую по времени интенсивность.

Так как среднее значение $\langle \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \rangle = 0$, то из (1) следует, что результирующая интенсивность света в этом случае будет равна

$$I = I_1 + I_2 + 0 = I_1 + I_2, \quad (2)$$

то есть, результирующая интенсивность света равна сумме интенсивностей складываемых световых волн. Этот результат наблюдается нами в повседневной жизни.

2. Разность фаз в данной точке пространства с течением времени остаётся постоянной $\varphi_2 - \varphi_1 = \text{const}$, но $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$

В этом случае из (1) следует, что результирующая интенсивность света равна

$$I = I_1 + I_2 + \text{Const} > I_1 + I_2, \quad (3)$$

то есть, результирующая интенсивность света оказывается больше суммы интенсивностей складываемых световых волн. В результате происходит усиление света при наложении.

Максимальная интенсивность $I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ будет при условии

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2m\pi, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

В этом случае $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$.

Если окажется, что $I_1 = I_2 = I_0$, то интенсивность света при наложении волн увеличится в 4 раза, то есть $I_{max} = 4I_0$.

3. Разность фаз в данной точке пространства с течением времени остаётся постоянной $\varphi_2 - \varphi_1 = \text{const}$, но $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$

В этом случае из (1) следует, что результирующая интенсивность света равна

$$I = I_1 + I_2 - \text{Const} < I_1 + I_2, \quad (4)$$

то есть, результирующая интенсивность света будет меньше суммы интенсивностей складываемых световых волн. В результате происходит ослабление света при наложении.

Минимальная интенсивность $I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ будет при условии $\varphi_2 - \varphi_1 = (2m + 1)\pi$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

когда $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$. Если окажется, что $I_1 = I_2 = I_0$, то интенсивность света при наложении волн станет равной нулю, то есть $I_{\min} = 0$.

В обычной жизни мы имеем дело со случаем 1, поэтому интерференционная картинка не наблюдается. Условия 2 и 3 выполняются только в том случае, если разность фаз складываемых колебаний $\varphi_2 - \varphi_1$ в данной точке пространства с течением времени не изменяется (такие волны называются **когерентными**). Когерентными могут быть волны только одинаковой частоты $\omega_1 = \omega_2$, или частоты которых изменяются с течением времени по одинаковому закону.

Таким образом, при наложении когерентных световых волн одинаковой плоскости поляризации происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности. Это явление называется **интерференцией света**.

Оптическая длина пути и разность хода световых волн

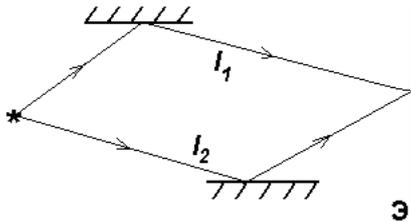


Рис. 1 Возникновение оптической разности хода лучей

Пусть две когерентные волны создаются одним источником S , но до экрана проходят разные **геометрические длины путей** l_1 и l_2 в средах с абсолютными показателями преломления n_1 и n_2 соответственно (см. рис. 1).

Произведение геометрической длины пути l световой волны на абсолютный показатель преломления n называется **оптической длиной пути** волны $L = nl$.

Величину $\Delta = L_1 - L_2 = n_2 l_2 - n_1 l_1$ называют **оптической разностью хода** интерферирующих волн, (Δ -дельта).

где $L = ln$ - оптическая длина пути интерферирующего луча, m ,

$\Delta = L_2 - L_1 = l_2 n_2 - l_1 n_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, m ,

n_1 и n_2 - абсолютные показатели преломления 1-ой и 2-й среды, в которых распространяются интерферирующие лучи.

l_1 и l_2 - геометрические длины путей 1-го и 2-го лучей, m .

Условие максимума и минимума при интерференции света

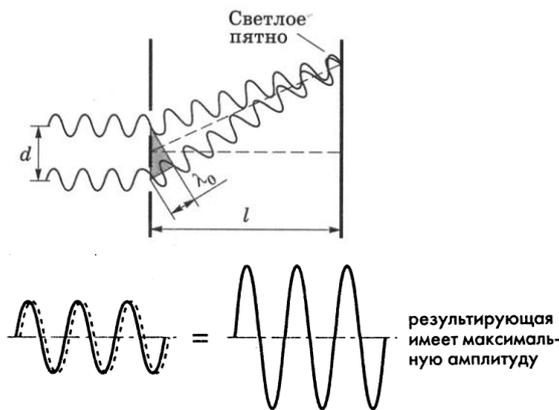


Рис. 2 Усиление света при интерференции

Если оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей в данной точке пространства окажется равной нечётному числу полуволен $\frac{\lambda}{2}$, то в этой точке пространства будет наблюдаться

ослабление света, то есть **минимум** (в этом случае волны приходят в данную точку пространства в противофазе (см.рис. 3))

$$\Delta_{\min} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где $\Delta = L_2 - L_1 = l_2 n_2 - l_1 n_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, m .

Если оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей в данной точке пространства окажется равной чётному числу полуволен $\frac{\lambda}{2}$, то в

этой точке пространства будет наблюдаться усиление света, то есть **максимум** (в этом случае волны приходят в данную точку пространства в одинаковой фазе (см. рис. 2))

$$\Delta_{\max} = 2k \frac{\lambda}{2},$$

где $\Delta = L_2 - L_1 = l_2 n_2 - l_1 n_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, m .

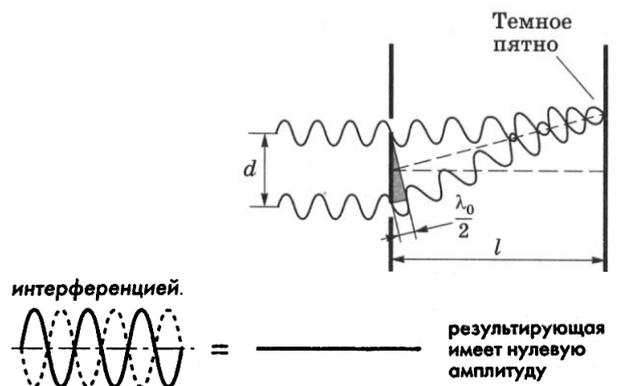


Рис. 3 Ослабление света при интерференции

Причина интерференции световых волн. Временная и пространственная когерентность световых волн

Как объяснить необычное для нас явление, когда при взаимодействии света вдруг образуются тёмные пятна? Обычно, чтобы в комнате стало ярче, мы включаем больше лампочек и никогда не наблюдаем, что где-то становится темнее. Объясняется это следующим образом.

Для возникновения интерференции необходимо, чтобы световые волны были когерентными между собой. Однако естественные источники света являются некогерентными, поэтому при обычных условиях мы интерференцию не наблюдаем.

В силу фундаментальных физических причин излучение всегда имеет статистический характер. Атомы светового источника излучают независимо друг от друга, в случайные моменты времени, и излучение каждого атома длится очень короткое время ($\tau \leq 10^{-8} \text{ с}$). Результирующее излучение источника в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа атомов. Через время порядка τ , вся совокупность излучающих атомов обновляется. Поэтому суммарное излучение будет иметь другую амплитуду и, что особенно важно, другую фазу. Фаза волны, излучаемой реальным источником света, остается приблизительно постоянной только на интервалах времени порядка τ . Отдельные «обрывки» излучения длительности τ называются *цугами*. Цуги имеют пространственную длину, равную $c \cdot \tau$, где c – скорость света. Длина цуга видимого диапазона света имеет величину $\approx 3 \text{ м}$. Колебания в разных цугах не согласованы между собой. Таким образом, реальная световая волна представляет собой последовательность волновых цугов с беспорядочно меняющейся фазой. Принято говорить, что колебания в разных цугах некогерентны. Интервал времени τ , в течение которого фаза колебаний остается приблизительно постоянной, называют *временем когерентности*.

Интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний. Условия когерентности можно обеспечить, если колебания будут относиться к одному и тому же цугу. Хотя фазы каждого из этих колебаний подвержены случайным изменениям во времени, но всё же эти изменения одинаковы, поэтому разность фаз когерентных колебаний остается постоянной. В этом случае может наблюдаться устойчивая интерференционная картина и, следовательно, выполняется принцип суперпозиции полей. При сложении некогерентных колебаний разность фаз оказывается случайной функцией времени. Интерференционные полосы испытывают беспорядочные перемещения из стороны в сторону, и за время Δt их регистрации, которая в оптических экспериментах значительно больше времени когерентности ($\Delta t \gg \tau$), происходит полное усреднение. Регистрирующее устройство (глаз, фотопластинка, фотоэлемент) зафиксирует в точке наблюдения усредненное значение интенсивности, равное сумме интенсивностей $I_1 + I_2$ обоих колебаний. В этом случае выполняется закон сложения интенсивностей и интерференционная картинка не наблюдается.

Таким образом, интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний. Волны, создающие в точке наблюдения когерентные колебания, также называются когерентными. Волны от двух независимых источников некогерентны и не могут дать интерференции.

Во всех практических интерференционных схемах большое значение имеют так же размеры источника света. Если размеры источника значительно меньше длины световой волны то, конечно, всегда получается резкая интерференционная картина (при выполнении условия временной когерентности), ибо оптическая разность пути до какой-либо точки интерференционного поля для всего источника будет одна и та же. Однако на практике размеры источников света обычно значительно превосходят длину световой волны. Каждая точка источника создает свою интерференционную картину. Результирующая картина получается наложением картин всех элементов протяженного источника, излучение которых считаем некогерентными между собой. Эти картины не совпадают друг с другом, так что результирующая картина окажется более или менее размытой и при значительной ширине источника перестанет наблюдаться.

Таким образом, наряду с временной когерентностью для описания когерентных свойств волн вводится понятие *пространственной когерентности*.

Одной из её характеристик является радиус когерентности $r_{\text{ког}}$, характеризующий расстояние, на котором может быть получена четкая интерференционная картина ($r_{\text{ког}}$ это не радиус окружности).

Произведение $I_{\text{ког}} r_{\text{ког}}^2 = V_{\text{ког}}$ называют *объемом когерентности*, в пределах которого случайная фаза волны изменяется на величину, не превосходящую π .

Однако для интерференции световых волн недостаточно одного условия их когерентности. Необходимо ещё, чтобы интерферирующие волны имели одинаковую плоскость поляризации, то есть одинаковые направления колебаний вектора напряжённости электрического поля \vec{E} .

В этом случае возможны две ситуации:

1. если в данную точку пространства волны приходят в одинаковой фазе, с одинаковой плоскостью поляризации, то направления колебаний векторов \vec{E}_1 и \vec{E}_2 оказываются сонаправленными. В этом случае согласно принципу суперпозиции результирующее поле равно $E_{\text{рез}} = E_1 + E_2$ и будет наблюдаться усиление света в этой точке пространства (то есть условие максимума),

2. если в данную точку пространства волны приходят в противофазе, с одинаковой плоскостью поляризации, то направления колебаний векторов \vec{E}_1 и \vec{E}_2 оказываются противоположно направленными. В этом случае согласно принципу суперпозиции результирующее поле равно $E_{\text{рез}} = E_1 - E_2$ и будет наблюдаться ослабление света в этой точке пространства (то есть условие минимума)

Способы получения когерентного света от естественных источников

Естественным источником когерентного света являются *лазеры*. Излучение лазера, по сравнению с естественным светом, обладает огромной временной и пространственной когерентностью. Временная когерентность имеет значение порядка 10^{-5} с (гелий-неоновый лазер) а пространственная когерентность наблюдается во всем поперечном сечении светового пучка.

Для получения когерентных световых волн с помощью обычных (не лазерных) источников применяют *метод разделения света* от одного источника на две или нескольких систем волн (световых пучков). В каждой из них представлено излучение одних и тех же атомов источника, так что эти волны когерентны между собой и интерферируют при наложении.

Разделение света на когерентные пучки можно осуществить с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел. Если затем заставить эти волны пройти разные оптические пути, а затем наложить их друг на друга, то может наблюдаться интерференция света. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Опыт Юнга

Исторически первым интерференционным опытом, получившим объяснение на основе волновой теории света, явился опыт Юнга (1802 г.). В опыте Юнга свет от источника, в качестве которого служила узкая щель S , падал на экран с двумя близко расположенными щелями S_1 и S_2 (рис. 4). Проходя через каждую из щелей, световой пучок расширялся в следствии дифракции, поэтому на белом экране Э световые пучки, прошедшие через щели S_1 и S_2 , перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.

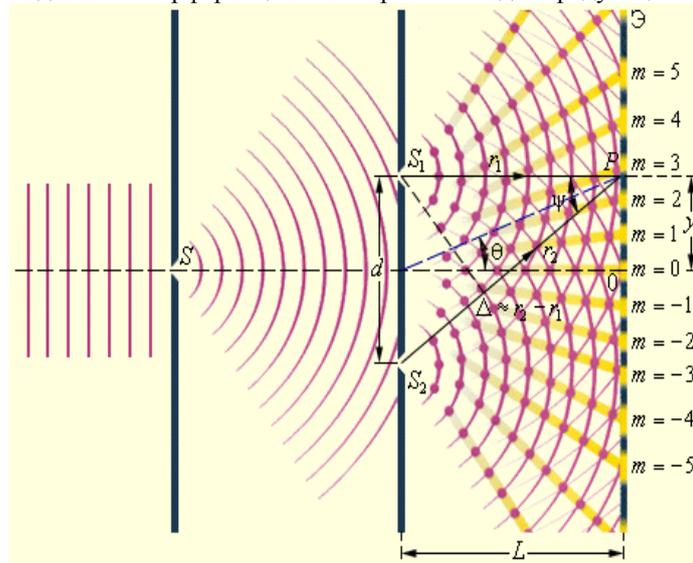


Рис. 4 Схема интерференционного опыта Юнга

Юнг был первым, кто понял, что нельзя наблюдать интерференцию при сложении волн от двух независимых источников. Поэтому в его опыте щели S_1 и S_2 , которые можно рассматривать в соответствии с принципом Гюйгенса как источники вторичных волн, освещались светом одного источника S . При симметричном расположении щелей вторичные волны, испускаемые источниками S_1 и S_2 , находятся в фазе, но эти волны проходят до точки наблюдения P разные расстояния r_1 и r_2 . Следовательно, фазы колебаний, создаваемых волнами от источников S_1 и S_2 в точке P , вообще говоря, различны. Таким образом, задача об интерференции волн сводится к задаче о сложении колебаний одной и той же частоты, но с разными фазами. Утверждение о том, что волны от источников S_1 и S_2 распространяются независимо друг от друга, а в точке наблюдения они просто складываются, является опытным фактом и носит название *принципа суперпозиции*.

Бипризма Френеля

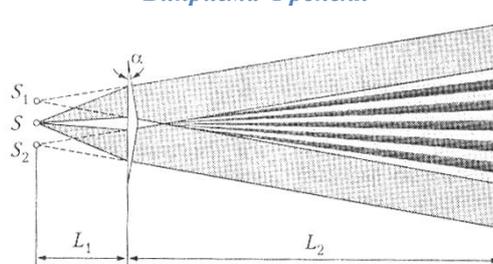


Рис. 5 Бипризма Френеля

Бипризма Френеля состоит из двух одинаковых с общей гранью призм с малыми преломляющими углами (рис. 5). Свет от прямолинейного источника S преломляется в обеих призмах, в результате чего образуются две когерентные цилиндрические волны, исходящих из мнимых источников S_1 и S_2 . На поверхности экрана в некоторой его части происходит наложение этих волн и наблюдается интерференция.

Бизеркала Френеля.

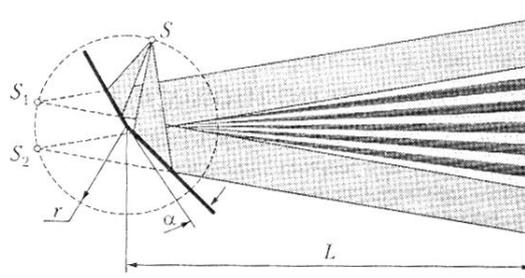


Рис. 6 Бизеркала Френеля

Бизеркала Френеля представляют собой два плоских зеркала (рис. 6), расположенных относительно друг друга под небольшим углом ($\varphi \ll 1$). На расстоянии r от линии пересечения зеркал параллельно ей находится прямолинейный источник света S . Световые пучки, отразившись от зеркал, являются мнимыми изображениями S в зеркалах. Мнимые источники S_1 и S_2 взаимно когерентны, и их световые пучки интерферируют в области взаимного перекрытия. От прямого попадания света на экран предохраняет заслонка.

Билинза Бийе

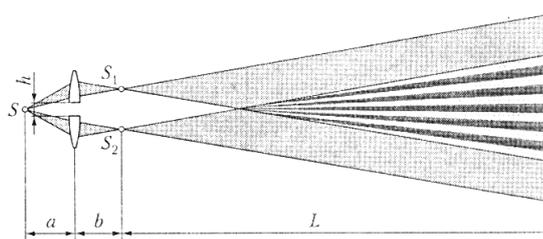


Рис. 7 Билинза Бийе

Билинза Бийе состоит из двух одинаковых половинок, вырезанных из одной линзы (рис.7). Свет от прямолинейного источника S преломляется в обеих половинках линзы, в результате чего образуются две когерентные волны, исходящих из мнимых источников S_1 и S_2 . На поверхности экрана в некоторой его части происходит наложение этих волн и наблюдается интерференция.

Зеркало Ллойда

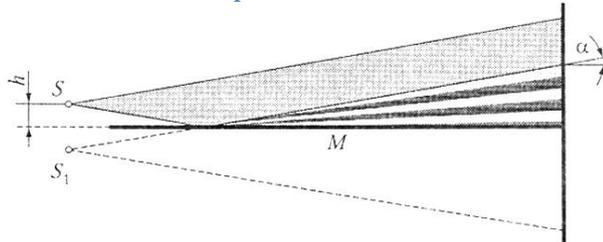


Рис. 8 Зеркало Ллойда

На очень малом расстоянии от плоского зеркала расположен точечный источник света, который создаёт в зеркале второй мнимый источник света (см. рис. 8). Оба источника оказываются когерентными. В результате отражения света от зеркала на поверхности экрана в некоторой его части происходит наложение световых волн и наблюдается интерференция.

Кольца Ньютона

Первый эксперимент по наблюдению интерференции света в лабораторных условиях принадлежит И. Ньютону. Он наблюдал интерференционную картину, возникающую при отражении света в тонкой воздушной прослойке между плоской стеклянной пластиной и плосковыпуклой линзой большого радиуса кривизны.

Лучи 1 и 2 отразившись от нижней границы линзы и верхней границы пластинки интерферируют в точке пересечения лучей (см. рис. 12.13).

Интерференционная картинка имеет вид концентрических окружностей, если свет падает на линзу перпендикулярно и эллипсов, если свет падает под углом к линзе (см. рис. 9).

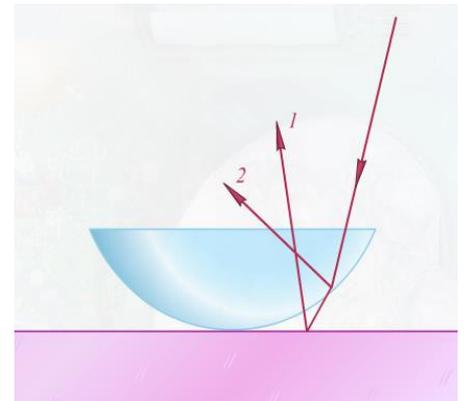


Рис. 9 Оптическая схема колец Ньютона

Радиусы светлых колец Ньютона в отражённом свете

$$r_m^{\text{светл}} = \sqrt{(2m-1)\frac{\lambda}{2}R}, \text{ где } m = 1, 2, 3 \dots$$

Радиусы тёмных колец Ньютона в отражённом свете

$$r_m^{\text{тёмн}} = \sqrt{m\lambda R}, \text{ где } m = 0, 1, 2 \dots,$$

R - радиус кривизны линзы, м,

λ - длина световой волны, м.

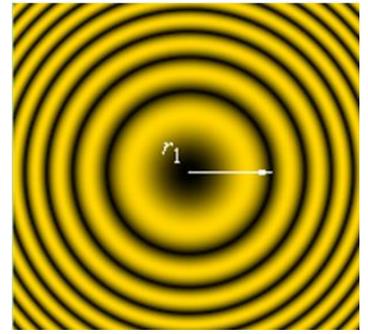


Рис. 10 Кольца Ньютона

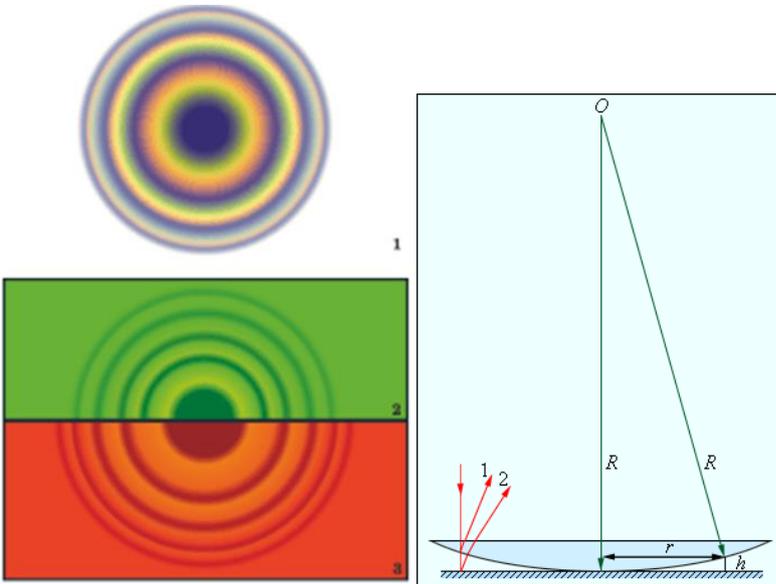


Рис. 11. Кольца Ньютона в отражённом свете: 1. в белом свете; 2. в зелёном свете; 3 в красном свете

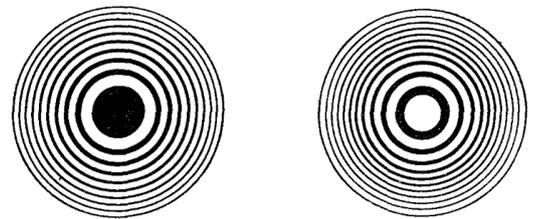
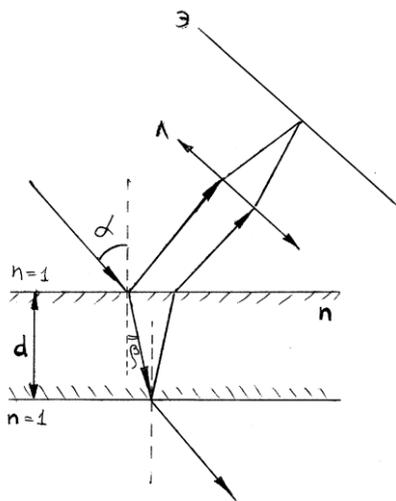
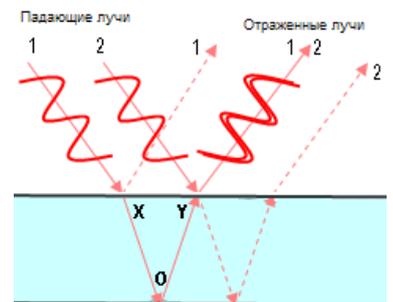


Рис. 12. Кольца Ньютона в отражённом свете в проходящем свете

Интерференция света в тонких плёнках

Тонкими называются плёнки, в которых возможно наблюдение интерференции света. (их толщина обычно не превышает нескольких десятков длин волн)

При падении света на тонкую прозрачную плёнку происходит отражение от обеих поверхностей плёнки. В результате возникают две световые волны, которые при определённых условиях могут интерферировать.



Интерференция света при отражении от тонкой плоскопараллельной плёнки или пластинки

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2} = 2dn \cos \beta \pm \frac{\lambda}{2}$$

Δ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, м

α - угол падения света,

β - угол преломления света,

n - показатель преломления плёнки,

d - толщина плёнки, м,

λ - длина световой волны, м



Применение интерференции света

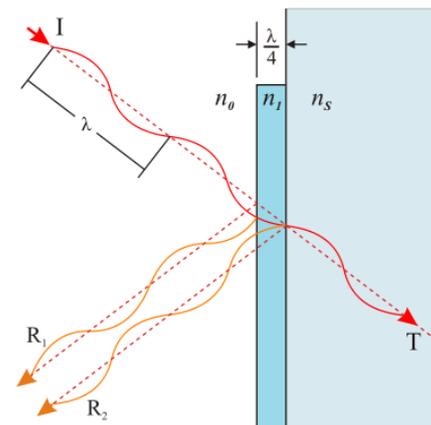
Просветление оптики. Явление интерференции применяется для улучшения качества оптических приборов и получения высокоотражающих покрытий. Прохождение света через каждую преломляющую поверхность линзы сопровождается отражением $\approx 4\%$ падающего света (при показателе преломления стекла $\approx 1,5$). Так как современные объективы состоят из большого количества линз, то число отражений в них велико, а поэтому велики и потери светового потока. Для устранения этого и других недостатков осуществляют так называемое *просветление оптики*. Для этого на свободные поверхности линз наносят тонкие пленки с показателем преломления меньшим, чем у материала линзы. При отражении света от границ раздела воздух–пленка и пленка–стекло возникает интерференция отраженных лучей. Толщину пленки d и показатели преломления стекла n_c и пленки n подбираются так, чтобы отраженные волны гасили друг друга. Для этого их амплитуды должны быть равны, а оптическая разность хода равна $(m + 1/2)\lambda_0$.

Расчет показывает, что амплитуды отраженных лучей равны, если $n = \sqrt{n_c}$. Так как $n_c > n > 1$, то потеря полуволны происходит на обеих поверхностях, следовательно, условие минимума (если свет падает нормально)

$$2nd = (m + 1/2)\lambda_0.$$

Обычно принимают $m = 0$, тогда $nd = \lambda_0/4$.

Так как добиться одновременного гашения для всех длин волн невозможно (показатель преломления зависит от длины волны), то это делается для цвета $\lambda_0 \approx 0,55 \text{ мкм}$ (к нему наиболее чувствителен человеческий глаз). Поэтому объективы с просветленной оптикой имеют синевато-красный оттенок.



Интерференционные светофильтры. Многолучевую интерференцию можно осуществить в многослойной системе чередующихся пленок с разными показателями преломления (но одинаковой оптической толщиной, равной $\lambda_0/4$). При прохождении света возникает большое число отраженных интерферирующих лучей, которые при оптической толщине пленок $\lambda_0/4$ будут взаимно усиливаться, т.е. коэффициент отражения возрастает. Подобные отражатели применяются в лазерной технике, а также используются для создания интерференционных светофильтров.

Интерферометры

Явление интерференции применяется в очень точных измерительных приборах – *интерферометрах*. На рис. 13 изображена схема *интерферометра Майкельсона* — двухлучевого *интерферометра*, изобретённого *Альбертом Майкельсоном*. Данный прибор позволил впервые измерить *длину световой волны*. Конструктивно состоит из светоделительного зеркала, разделяющего входящий луч на два, которые в свою очередь, отражаются *зеркалом* обратно. На полупрозрачном зеркале разделённые лучи вновь направляются в одну сторону, чтобы, смешавшись на экране, образовать *интерференционную картину*. Анализируя её и изменяя длину одного плеча на известную величину, можно по изменению вида интерференционных полос измерить длину световой волны. Интерференционная картина наблюдается с помощью зрительной трубы.

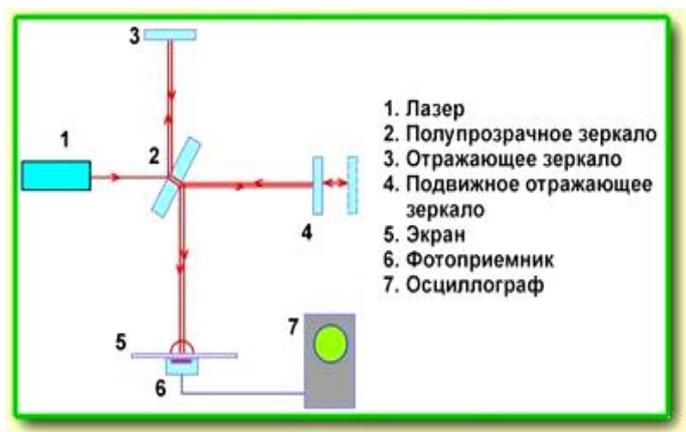


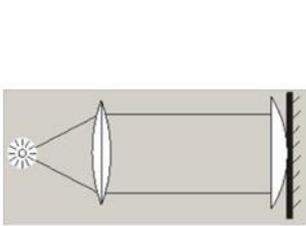
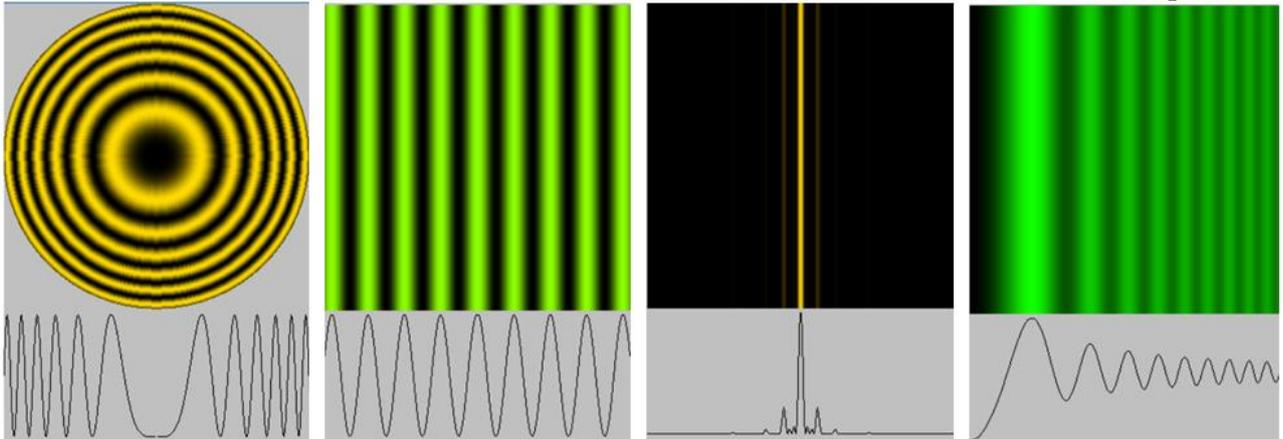
Рис. 13 Интерферометр Майкельсона

Кольца Ньютона

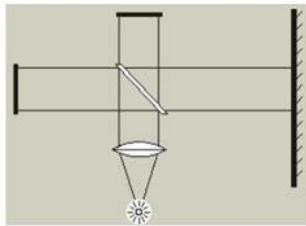
Интерферометр Майкельсона

Опыт Юнга

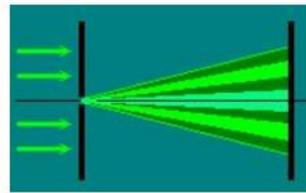
Дифракция на крае плоского экрана



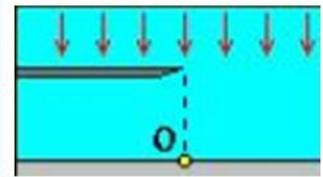
Кольца Ньютона



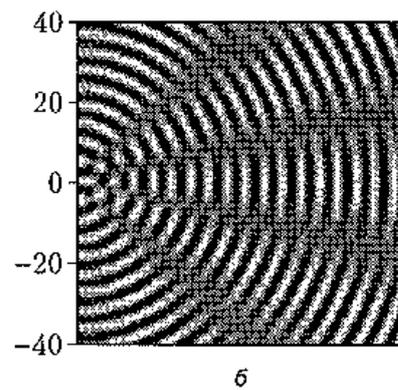
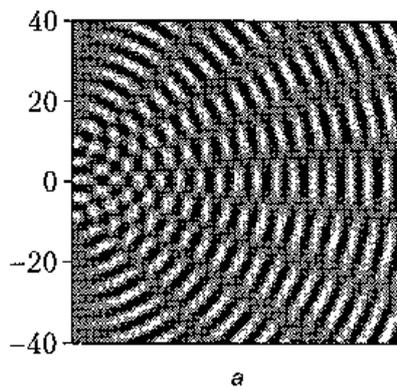
Интерферометр Майкельсона



Опыт Юнга

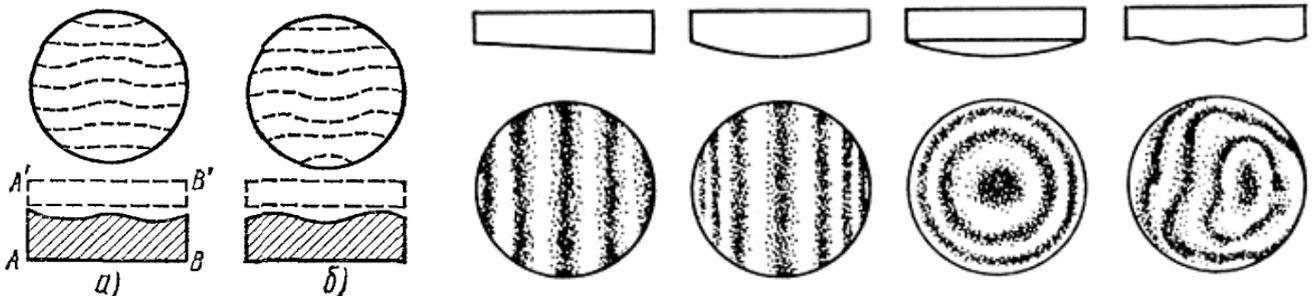


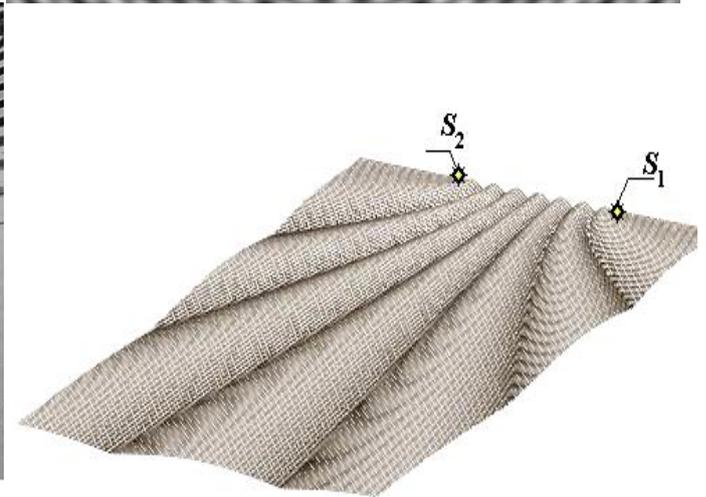
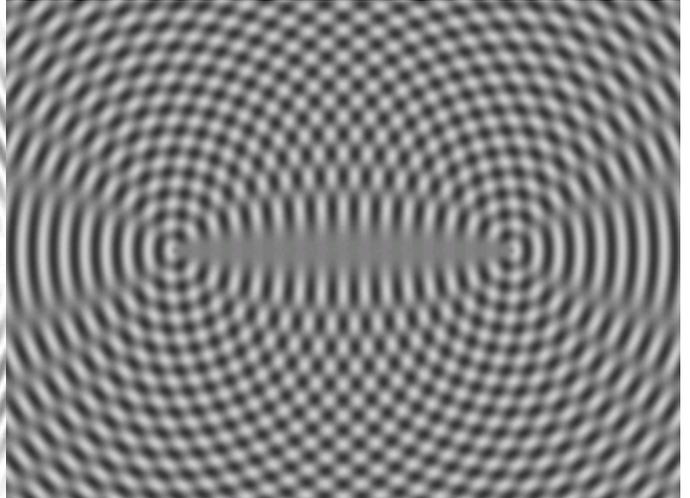
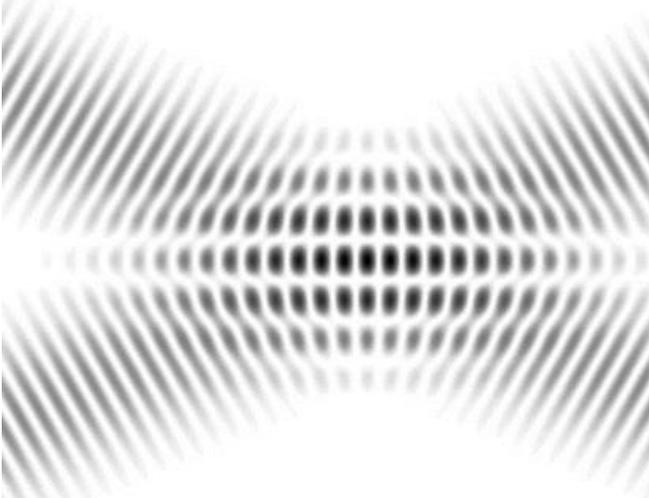
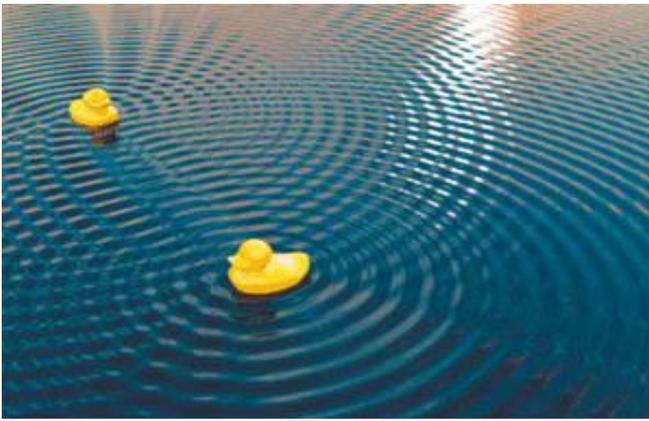
Дифракция на крае плоского экрана



Влияние расстояния между источниками на ширину интерференционных полос: в случае (а) расстояние вдвое больше, чем в случае (б)

Использование интерференции света при проверке качества обработки поверхностей





Интерференция