ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

Интерферометр – измерительный прибор, принцип действия которого основан на интерференции света. Существуют интерферометры для звуковых волн (радиоволн) и для электромагнитных волн (оптические интерферометры). Оптические интерферометры применяются для измерения оптических длин волн спектральных линий, показателей преломления прозрачных сред, абсолютных и относительных размеров объектов, угловых размеров звезд, для контроля качества оптических деталей и их поверхностей и т.д.

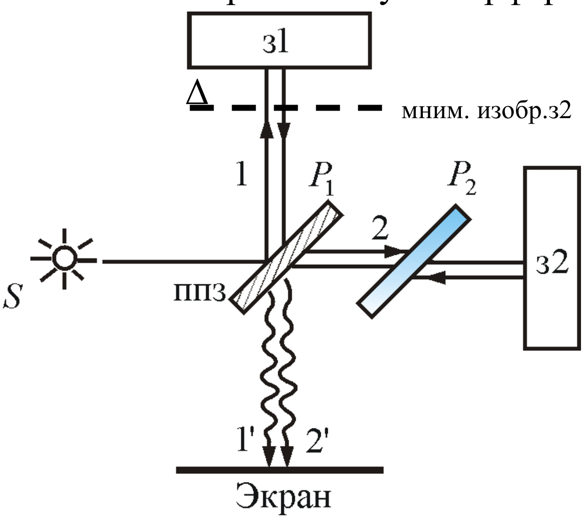
Принцип действия всех интерферометров одинаков и отличаются они только методами получения когерентных волн и тем, какая величина непосредственно измеряется. Пучок света с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее число когерентных пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе, и наблюдается результат их интерференции. Вид интерференционной картины зависит от способа разделения пучка света на когерентные пучки, от числа интерферирующих пучков, оптической разности хода, относительной интенсивности, размеров источника и спектрального состава света.

Методы получения когерентных пучков в интерференции многообразны, и поэтому существует большое число различных конструкций интерферометров. По числу интерферирующих пучков света оптические интерферометры можно разделить на двухлучевые и многолучевые.

Двухлучевые интерферометры.

Примером двухлучевого интерферометра может служить интерферометр Майкельсона.

Рассмотрим схему интерферометра Майкельсона: з1 и з2 – зеркала,

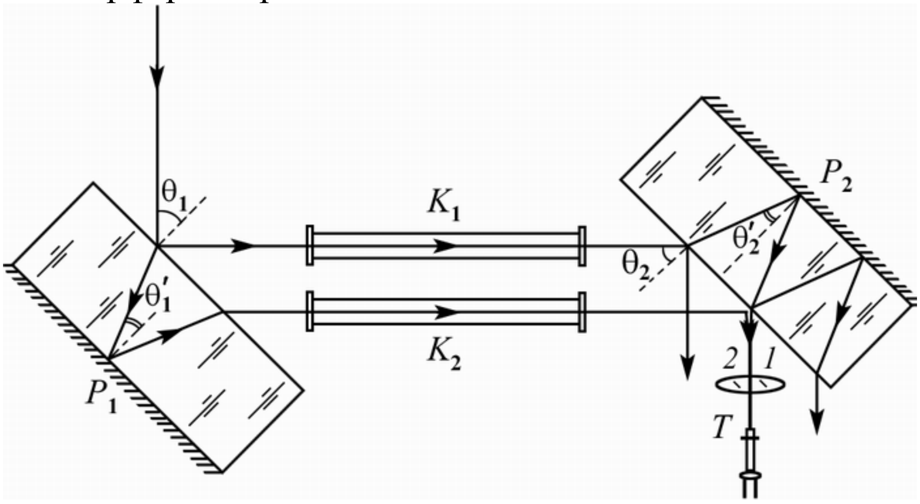


полупрозрачное зеркало P_1 посеребрено и делит луч на две части луч 1 и 2. Луч 1 отражаясь от з1 и проходя P_1 дает 1', а луч 2 отражаясь от з2 и далее от P_1 дает 2'. Пластинки P_1 и P_2 одинаковы по размерам. P_2 ставится для компенсации разности хода второго луча. Лучи 1' и 2' когерентны и интерферируют. Зеркало з2 может поворачиваться.

Разность хода интерферирующих волн определяется следующим образом: $\Delta = n_1(2P_1з1) - n_2(2P_1з2)$, где P_1з1 – расстояние от пластинки до зеркала з1, P_1з2 – расстояние от пластики до зеркала з2, n_1 и n_2 – показатели преломления сред в интерферометре. Если мнимое изображение з2 параллельно зеркалу з1, то в интерферометре наблюдаются полосы равного наклона. Если мнимое изображение з2 не параллельно з1, то наблюдаются полосы равной толщины.

Интерферометры Майкельсона широко используются в физических измерениях и технических приборах. С его помощью впервые была измерена абсолютная величина длины волны света, доказана независимость скорости света от движения источника и др. Его используют как спектральный прибор для анализа спектров излучения. В сочетании с микроскопом интерферометр служит для абсолютных и относительных измерений эталонов меры длины (точность измерений до 0,005 мкм). По виду интерференционных полос он позволяет измерять величину отступления от плоскости и форму микронеровностей поверхности.

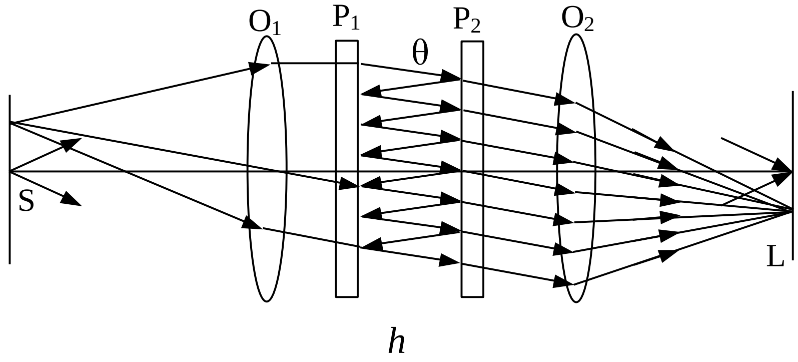
Существуют двухлучевые интерферометры, предназначенные для измерения показателей преломления газов и жидкостей (они носят название интерферометры-рефрактометры). Примером такого интерферометра служит интерферометр Жамена.



Пучок монохроматического света после отражения от передней и задней поверхностей первой стеклянной пластинки P_1 разделяется на два пучка. Пройдя через кюветы K_1 и K_2 и отразившись от поверхностей стеклянной пластинки P_2, слегка повернутой относительно P_1, пучки попадают в зрительную трубу Т, где интерферируют. Если одна из кювет заполнена веществом с показателем преломления n_1, а другая – с n_2, то по смещению интерференционной картины на число полос m по сравнению, когда обе кюветы заполнены одинаковым веществом, можно найти $\Delta n = n_1 - n_2 = \frac{m\lambda}{l}$, где l – длина кюветы, λ – длина волны света. Точность измерения Δn очень высока и достигает 7-го и даже 9-го десятичного знака.

Многолучевые интерферометры.

Примером многолучевого интерферометра является интерферометр Фабри-Перо. [Ш. Фабри (1867-1945) французский физик совместно с А. Перо (1863-1925) французским физиком в 1899г. построил интерферометр, названный их именем (интерферометр Фабри- Перо) для проведения тонких измерений оптических интерференционных эффектов].



к

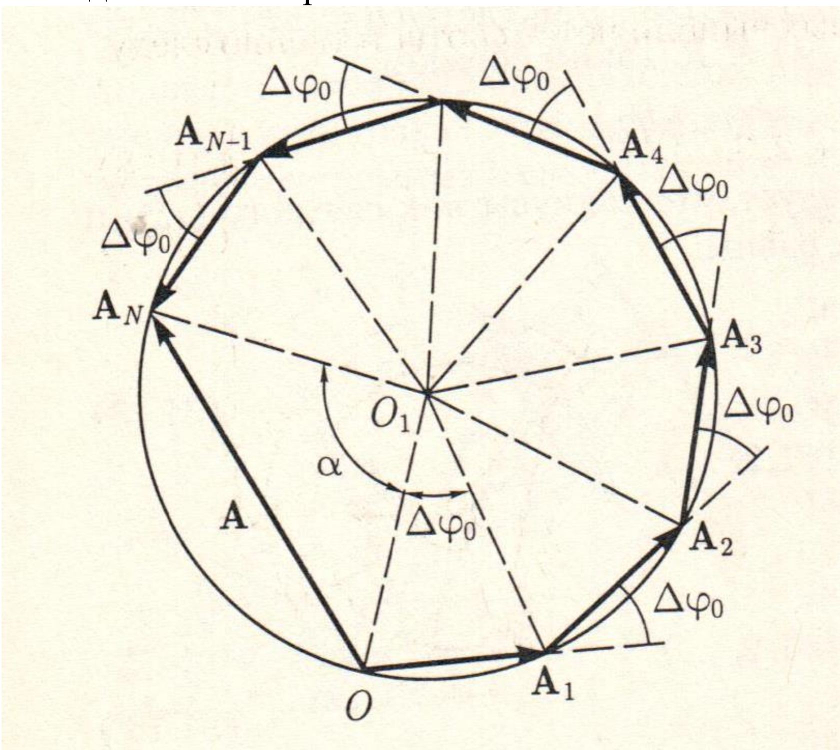
Многолучевой интерферометр Фабри - Перо состоит из двух стеклянных или кварцевых пластинок P_1 и P_2, на обращенные друг другу и параллельные между собой поверхности которых нанесены зеркальные покрытия с высоким (85-98%) коэффициентом отражения. Параллельный пучок света, падающий на объектив O_1, в результате многократных отражений от зеркал, образует большое число параллельных, когерентных пучков с постоянной разностью хода между соседними пучками $\Delta = 2\mathrm{nh}\cos\theta$ между соседними пучками, но разной интенсивности. В результате многолучевой интерференции в фокальной плоскости L объектива O_2 образуется интерференционная картина, имеющая форму концентрических колец с резкими интенсивными максимумами, положение которых зависит от $\Delta = \mathrm{m}\lambda$ (m – целое число), т.е. зависит от длины волны. Поэтому интерферометр Фабри-Перо разлагает сложное излучение в спектр. Применяется интерферометр Фабри-Перо как интерференционный спектральный прибор высокой разрешающей силы. Интерферометры Фабри -Перо с фотоэлектрической регистрацией используются для исследования спектров в видимой, инфракрасной и сантиметровой областях длин волн.

К многолучевым интерферометрам также относятся различного рода дифракционные решетки, которые используются как интерференционные спектральные приборы.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ МНОГИХ ВОЛН

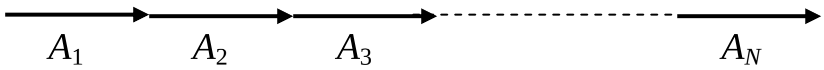
Для осуществления интерференции многих волн с близкими или равными амплитудами применяют специальные интерференционные приборы – многолучевые интерферометры, например, интерферометр Фабри-Перо и др.

Рассмотрим интерференцию многих световых волн с близкими или равными амплитудами. Амплитуду A результирующих колебаний и их интенсивность $\mathrm{I} = \mathrm{A}^2$ в произвольной точке М интерференционной картины можно найти, воспользовавшись методом векторных диаграмм для сложения одинаково направленных колебаний.



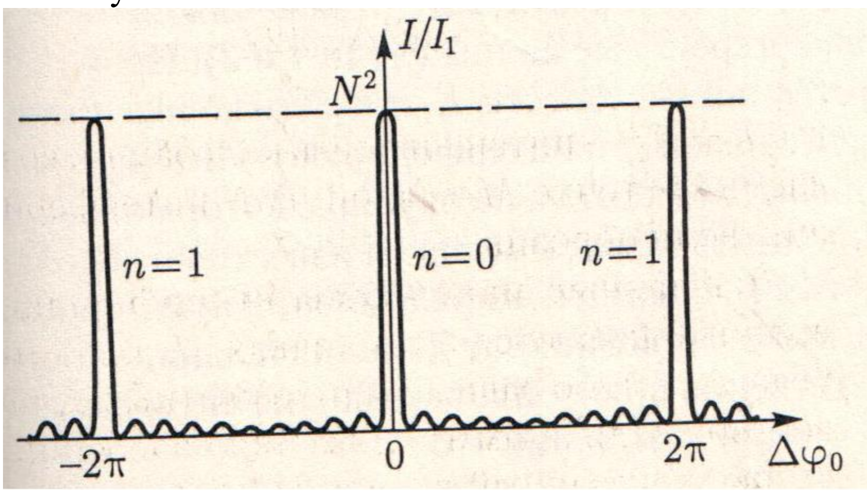
На рисунке показана векторная диаграмма сложения колебаний при интерференции N волн, возбуждающих в точке M одинаково направленные когерентные колебания с равными амплитудами $\mathrm{A_i} = A_1$ и не зависящим от i сдвигом фаз между (i+1)-м и i-м колебаниями: $\Delta\varphi_0 = \varphi_{\mathrm{i}+1} - \varphi_i$. Амплитуда результирующих колебаний $A = 2|OO_1|\sin\dfrac{\alpha}{2}$, где $\alpha = 2\pi - N\Delta\varphi_0$, а $|OO_1| + \dfrac{A_1}{2\left|\sin\dfrac{\Delta\varphi_0}{2}\right|}$. Поэтому $A = A_1\left|\dfrac{\sin\dfrac{N\Delta\varphi_0}{2}}{\sin\dfrac{\Delta\varphi_0}{2}}\right|$, а интенсивность результирующей волны в точке М будет равна: $\mathrm{I} = I_1\dfrac{\sin^2(\dfrac{N\Delta\varphi_0}{2})}{\sin^2(\dfrac{\Delta\varphi_0}{2})}$, где $I_1 = A_1^2$ - интенсивность колебаний, возбуждаемых в точке М каждой из N интерферирующих волн.

Главные максимумы интерференции N волн наблюдаются в тех точках М, для которых углы $\Delta\varphi_0$ либо равны 0, либо кратны 2π, так что векторная диаграмма сложения колебаний примет вид:



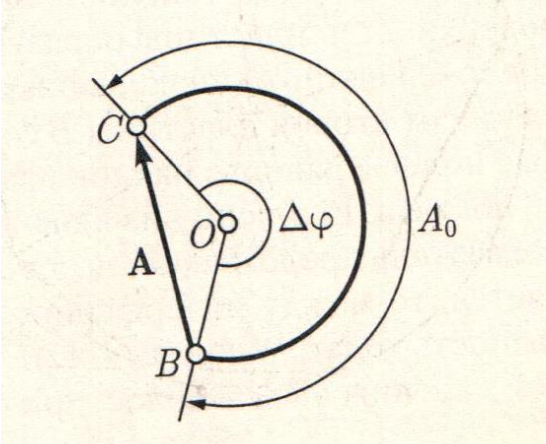
Тогда условие для главных максимумов имеет вид: $\Delta\varphi_0 = \pm 2n\pi$, где *n=0,1,2,……* - порядок главного максимума. Амплитуда и интенсивность колебаний в главных максимумах равны: $A_{max} = NA_1$; $I_{max} = N^2 I_1$.

Интерференционные минимумы (A=0) удовлетворяют условию $\Delta\varphi_0 = \pm\dfrac{2\pi p}{N}$, где p – принимает любые целые положительные значения, кроме кратных N. Между каждой парой соседних интерференционных минимумов находится один максимум – либо главный, либо побочный. При большом числе N интерферирующих волн интенсивности побочных максимумов пренебрежимо малы по сравнению с интенсивностью главных максимумов.



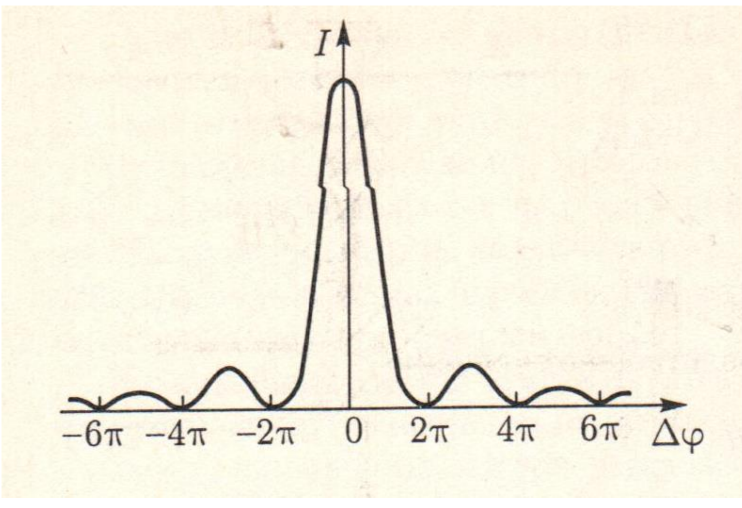
Двум минимумам, ограничивающим главный максимум n-го порядка, соответствуют значения $\Delta\varphi_0 = \pm(2\pi n \pm \dfrac{2\pi}{N})$, поэтому «ширина» главного максимума равна $\dfrac{4\pi}{N}$, обратно пропорциональна числу N интерферирующих волн, а его интенсивность пропорциональна N^2. Такой характер интерференционной картины при изменении N полностью согласуется с законом сохранения энергии: общая энергия колебаний во всех точках экрана, на котором наблюдается интерференционная картина, пропорциональна N.

Если число N интерферирующих волн неограниченно увеличивать,



а их амплитуды A_1 и сдвиг фаз $\Delta\varphi_0$ соответственно уменьшать так, чтобы NA_1 и $N\Delta\varphi_0$ оставались конечными величинами, равными A_0 и $\Delta\varphi$, то в пределе векторная диаграмма примет вид.

Вектор A амплитуды результирующих колебаний замыкает дугу BC окружности. Длина этой дуги равна A_0, а соответствующий ей центральный угол $\angle BOC = \Delta\varphi$. Поэтому радиус окружности $|OB| = \dfrac{A_0}{\Delta\varphi}$, а амплитуда A и интенсивность результирующего колебания равны $A = A_0\left|\dfrac{\sin\frac{\Delta\varphi}{2}}{\Delta\varphi/2}\right|$, $\quad I = I_0\left|\dfrac{\sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}}{\left(\Delta\varphi/2\right)^2}\right|$, где $I_0 = A_0^2$. Из полученных зависимостей видно, что максимумы и минимумы находятся в точках, для которых выполняются следующие условия: $\Delta\varphi = \pm 2m\pi$ (m-1,2,3,….) (условие минимума); $\mathrm{tg}\left(\Delta\varphi/2\right) = \Delta\varphi/2$ $\Rightarrow$ Решение данного трансцендентного уравнения можно представить в виде $(\Delta\varphi)_{\max} = \pm 2k_{\max}\pi$, где m=0,1,2,3,….) – порядок максимума. Для центрального максимума нулевого порядка коэффициент k_0=0 и $(\Delta\varphi)_0 = 0$. Амплитуда и интенсивность колебаний в максимуме равны A_0 и I_0. Для всех остальных максимумов $(m \ge 1)$ приближенно можно считать, что $k_m = (2m+1)/2$; $(\Delta\varphi)_m = \pm(2m+1)\pi$. При выполнении этого условия вектор A=A_m и на диаграмме будет направлен вертикально, а сама диаграмма будет содержать (2m+1) полуокружностей, диаметр у которой равен модулю вектора A_m: $A_m = 2A_0/(2m+1)\pi$.



Отношение интенсивностей максимумов m-

го и нулевого порядков: $\frac{I_m}{I_0} = \frac{4}{(2m+1)^2 \pi^2}$. Это отношение быстро убывает с ростом m. Характер зависимости I от $\Delta\varphi$ показан на рисунке.