



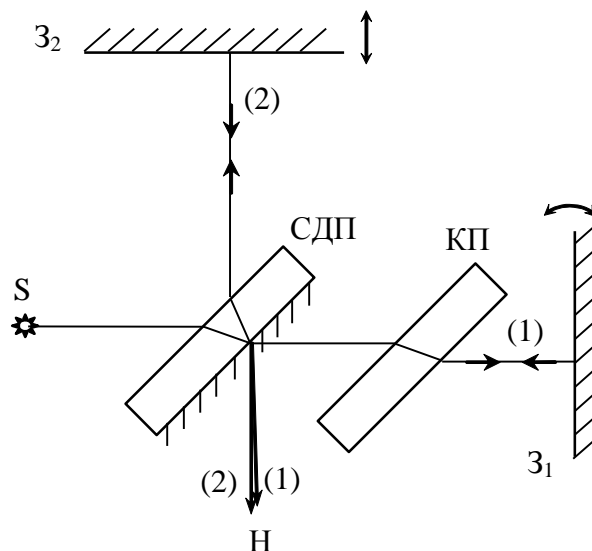
Лабораторный практикум по ФИЗИКЕ

ОПТИКА

Иванов В.Ю., Митин И.В., Иванова И.Б.

Задача № 135

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА



МОСКВА 2017

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Цель работы: знакомство с устройством интерферометра Майкельсона, исследование двух видов интерференционных картин – полос равной толщины и полос равного наклона, использование интерферометра Майкельсона для определения спектральных характеристик монохроматического и квазимонохроматического источников света.

Идея эксперимента: при регулировке положения зеркал интерферометра Майкельсона изменяется наблюдаемая интерференционная картина. Регулируя положение зеркал, получают требуемые виды интерференционной картины. Меняя разность длин плеч интерферометра, наблюдают за изменениями интерференционной картины. По характеру изменения можно определить спектр источника света.

I. Теория

Интерференция света

Интерференционными явлениями в оптике обычно называют круг явлений, в которых при наложении двух (или более) световых волн в некоторой области пространства результирующая интенсивность в произвольной точке этой области оказывается не равной сумме интенсивностей каждой из накладывающихся волн и определяется выражением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – интенсивности волн, φ – разность фаз между волнами в точке наблюдения. Формулу (1) можно получить следующим образом.

Пусть в некоторую точку пространства приходят две гармонические электромагнитные волны, напряженности электрических полей которых в этой точке изменяются по законам:

$$\vec{E}_1(t) = \vec{E}_{10} \cdot \cos(\omega_1 t); \quad \vec{E}_2(t) = \vec{E}_{20} \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi).$$

В соответствии с принципом суперпозиции результирующая напряженность равна сумме напряженностей исходных волн. Так как интенсивность пропорциональна усредненному по времени квадрату напряженности, то¹:

$$I \sim \left\langle \left(\vec{E}_1(t) + \vec{E}_2(t) \right)^2 \right\rangle = \left\langle \vec{E}_1^2 \right\rangle + \left\langle \vec{E}_2^2 \right\rangle + 2 \cdot \left\langle \left(\vec{E}_1(t) \cdot \vec{E}_2(t) \right) \right\rangle. \quad (2)$$

Последнее слагаемое формуле (2) называют *интерференционным членом*. Он обращается в нуль, если:

- 1) направления колебаний векторов $\vec{E}_1(t)$ и $\vec{E}_2(t)$ взаимно перпендикулярны;
- 2) частоты колебаний ω_1 и ω_2 не равны друг другу.

¹ Угловые скобки означают, что величина, стоящая между ними, усредняется по временному промежутку, превышающему периоды колебаний каждой из волн.

Если обе волны одинаково поляризованы и имеют одинаковые частоты $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, то, записывая напряженности накладывающихся волн в точке наблюдения в комплексной форме:

$$\vec{E}_1(t) = \vec{E}_{10} \cdot e^{i\omega t}; \quad \vec{E}_2(t) = \vec{E}_{20} \cdot e^{i(\omega t + \varphi)} = \vec{E}_{20} \cdot e^{i\varphi} \cdot e^{i\omega t},$$

где E_{10} и E_{20} - амплитуды волн, результирующую амплитуду найдем с помощью векторной диаграммы (рис. 1). Применяв теорему косинусов, получим:

$$E^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos\varphi;$$

или, переходя к интенсивностям:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi.$$

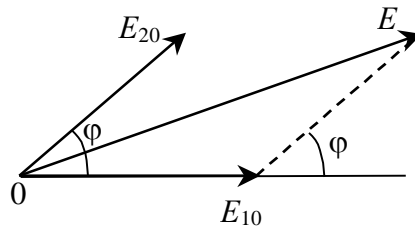


Рис. 1. Сложение комплексных амплитуд двух гармонических волн

Таким образом, результирующая интенсивность в точке наблюдения зависит исключительно от разности фаз между волнами в этой точке.

Обычные (тепловые) источники света состоят из атомов, которые излучают независимо друг от друга сравнительно кратковременными цугами волн. Если наложить волны от двух таких источников, то разность фаз между ними в точке наблюдения будет быстро и беспорядочно меняться в пределах от 0 до 2π , поэтому $\cos\varphi$ в формуле (1) будет равновероятно принимать все значения между -1 и +1, и, следовательно, его среднее значение будет равно нулю. В этом случае результирующая интенсивность равна сумме интенсивностей накладывающихся волн $I = I_1 + I_2$, а значит, интерференция отсутствует. Такие световые волны называются **некогерентными**. Получить интерференцию от двух некогерентных источников невозможно.

Чтобы наблюдать интерференцию света, обычно используют один источник. Испускаемую им волну необходимо тем или иным способом разделить на две волны, а затем эти волны свести вместе так, чтобы оптическая разность хода между ними не превышала длины цуга. В этом случае разность фаз φ между волнами остается за время наблюдения постоянной во времени и зависит лишь от разности хода накладывающихся волн до точки наблюдения. В области наложения волн интерференционный член не равен нулю, а результирующая интенсивность оказывается не равной сумме интенсивностей накладывающихся волн $I \neq I_1 + I_2$. Возникает интерференция света. Волны, способные давать интерференцию, называются **когерентными**. Интерференционное распределение интенсивности представляет собой систему чередующихся максимумов и минимумов интенсивности, то есть светлых и темных полос. Устройства, разделяющие исходный световой пучок на два пучка, вносящие переменную разность хода между ними и сводящие эти пучки

вместе в определенной области пространства, называются **интерферометрами**. Чередование темных и светлых полос в области интерференции называется **интерференционной картиной**.

Из формулы (1) следует, что **максимум** интенсивности $I_{\max} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$ наблюдается, когда $\cos\varphi = 1$, то есть когда разность фаз между волнами в точке наблюдения равна четному числу π :

$$\varphi = 2\pi m, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (3)$$

Так как оптическая разность хода Δs между волнами связана с разностью фаз соотношением (см. литературу):

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta s = k \cdot \Delta s,$$

то условие интерференционного **максимума** для разности хода имеет вид:

$$\Delta s = m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (4)$$

Минимум интенсивности $I_{\min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2$ наблюдается, когда $\cos\varphi = -1$, то есть когда разность фаз между волнами в точке наблюдения равна нечетному числу π :

$$\varphi = \pi(2m + 1) = 2\pi\left(m + \frac{1}{2}\right), \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (5)$$

Условие интерференционного **минимума** для разности хода имеет вид:

$$\Delta s = \lambda\left(m + \frac{1}{2}\right), \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (6)$$

При интерференции двух когерентных волн одинаковой интенсивности $I_1 = I_2 = I_0$ результирующая интенсивность задается формулой:

$$I = 2I_0(1 + \cos\varphi). \quad (1a)$$

Таким образом, в максимумах интенсивность в четыре раза больше интенсивности каждой из волн $I = 4I_0$, или в два раза больше суммарной интенсивности этих волн.

Интерферометр Майкельсона

Интерферометр Майкельсона представляет собой устройство для наблюдения интерференционных картин при наложении двух волн, полученных из одной исходной световой волны методом деления амплитуды. Схема интерферометра Майкельсона представлена на рисунке 2. Интерферометр состоит из двух зеркал Z_1 и Z_2 , расположенных почти перпендикулярно друг другу, и светоделительной пластинки СДП. Пучок света от источника S (в общем случае протяженного) падает на полупрозрачную посеребренную с одной стороны делительную пластину СДП, где разделяется на два пучка, первый из которых после прохождения сквозь пластину направляется к зеркалу Z_1 , а второй после отражения от пластины - к зеркалу Z_2 . Отражившись от зеркал, волны идут назад к СДП и после отражения от нее

первого пучка и прохождения сквозь нее второго распространяются в направлении H , накладываясь друг на друга.

Расстояния между СДП и зеркалами называют *плечами* интерферометра. Так как первый пучок проходит СДП один раз, а второй – три раза, то для компенсации возникающей разности хода в первый пучок вводится компенсационная пластина КП такой же толщины, что и СДП.

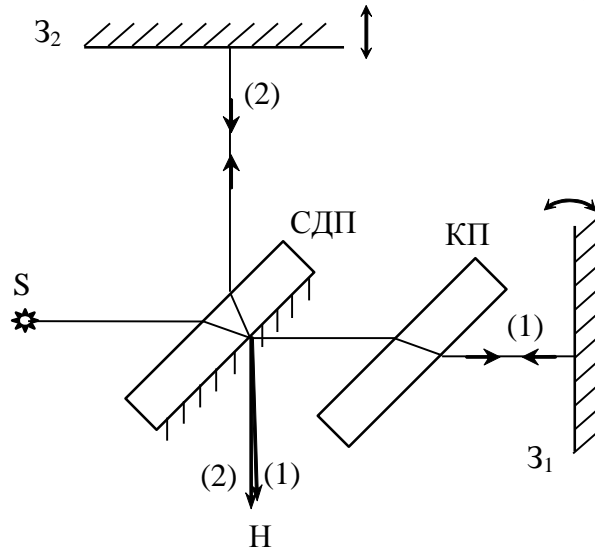


Рис. 2. Схема интерферометра Майкельсона.

Одно из зеркал интерферометра 3_1 может поворачиваться относительно вертикальной и горизонтальной осей, а второе 3_2 – смещаться вдоль оси системы. Это дает возможность изменять как разность хода между пучками (1) и (2), так и направление их распространения. В зависимости от регулировки положения зеркал можно наблюдать различные интерференционные картины, поместив глаз или объектив аппарата на пути распространения пучков H .

Формирование интерференционных полос равного наклона

Чтобы лучше понять принцип формирования интерференционных картин в интерферометре Майкельсона, рассмотрим сначала случай точечного монохроматического источника.

Пусть источник света S находится на оптической оси системы на расстоянии x от светоделителя, зеркало 1 – на расстоянии l_1 , а зеркало 2 – на расстоянии l_2 от него же (рис. 3). Построим мнимые изображения источника света в зеркалах 1 и 2 при условии, что плоскости зеркал строго перпендикулярны друг другу. Изображение S_1 , построенное в первом зеркале, находится на расстоянии $x + l_1$ от 3_1 и на расстоянии $x + 2l_1$ от СДП; изображение S_2 , построенное во втором зеркале – на расстоянии $x + l_2$ от 3_2 и $x + 2l_2$ от СДП, соответственно. Так как световые волны после СДП будут распространяться вдоль направления H , то интерферометр Майкельсона можно представить в виде двух мнимых источников света, расположенных на оси системы друг за другом на расстоянии $2(l_1 - l_2) = 2\Delta$ друг от друга (рис. 4). Величину Δ называют *разностью длин плеч* интерферометра.

Эти источники будут когерентными, т.к. получены из одного и того же источника, поэтому в области наложения волн возникнет интерференция. Наблюдение будем вести в плоскости, перпендикулярной линии, соединяющей источники. Будем считать, что интенсивности накладывающихся волн одинаковы, и распространение происходит в воздухе (показатель преломления $n = 1$).

В центральной точке O плоскости наблюдения разность хода между волнами, приходящими от мнимых источников, равна $\Delta s_0 = 2\Delta$, разность фаз $\varphi_0 = k \cdot 2\Delta = \frac{4\pi\Delta}{\lambda}$, закон изменения интенсивности задается классической формулой двухволновой интерференции:

$$I = 2I_0(1 + \cos\varphi_0) \quad (1a)$$

Таким образом, в зависимости от разности длин плеч Δ в центре картины может быть как светлое, так и темное пятно.

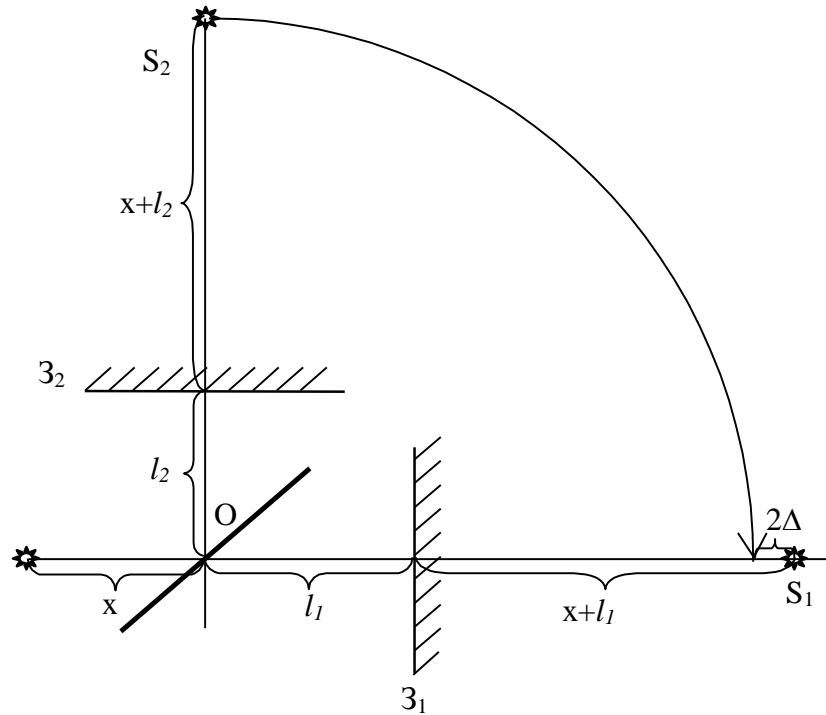


Рис. 3. Построение изображений источника в зеркалах интерферометра (зеркала перпендикулярны друг другу).

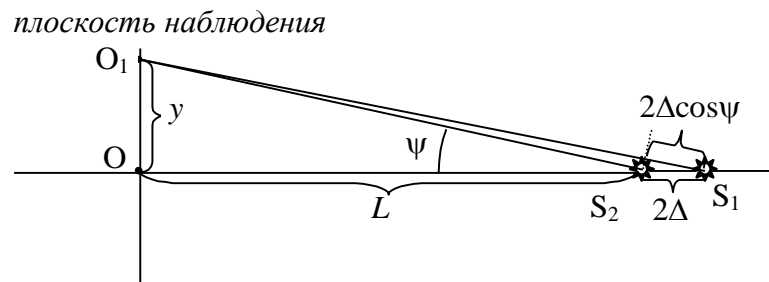


Рис. 4. Эквивалентная схема интерферометра

Если точка наблюдения O_1 находится на некотором расстоянии y от точки O (рис. 4), то разность хода лучей, приходящих от мнимых источников в эту точку станет равной

$$\Delta s_1 \approx 2\Delta \cdot \cos\psi < \Delta s_0, \quad (7)$$

где $\psi \approx \text{tg}\psi \approx \frac{y}{L}$, L – расстояние от источников до плоскости наблюдения ($L \gg y, L \gg \Delta$). С ростом y растет угол ψ , разность хода $\Delta s(y)$ уменьшается.

Поскольку схема симметрична относительно поворота вокруг оси интерферометра OS_1S_2 , то интерференционная картина в плоскости наблюдения будет представлять собой систему концентрических окружностей (интерференционных колец). Разность хода будет максимальна в центре картины и может принимать любые значения в зависимости от положения зеркал интерферометра. Порядок интерференции m , определяемый как отношение разности хода к длине волны:

$$m = \frac{\Delta s}{\lambda}, \quad (8)$$

также максимален в центре картины и уменьшается по мере удаления от него.

Если смещать подвижное зеркало Z_2 интерферометра вдоль оси системы, то будет изменяться положение мнимого источника S_2 , и, как следствие, интерференционные кольца будут либо разбегаться из центра картины, либо схлопываться в центре, в зависимости от направления движения зеркала. Например, с уменьшением разности длин плеч интерферометра порядок интерференции в центре уменьшается, кольца схлопываются, а расстояние между соседними кольцами растет. Зная перемещение зеркала, и подсчитав количество исчезнувших или возникших в центре колец, можно определить длину волны света.

Когда разность длин плеч интерферометра станет равной нулю, кольца исчезнут, и в плоскости наблюдения будет равномерная засветка.

Таким образом, для получения интерференционной картины в виде концентрических колец, необходимо чтобы:

- 1) зеркала интерферометра были строго перпендикулярны друг другу;
- 2) существовала отличная от нуля разность длин плеч интерферометра;
- 3) использовался точечный источник света².

Интерференционную картину, полученную в такой геометрии, называют **полосами равного наклона** (так как одна и та же разность хода, соответствующая каждой интерференционной полосе (кольцу), определяется углом между осью интерферометра и направлением на данную полосу, т.е. наклоном лучей, образующих данное кольцо).

² В дальнейшем будет показано, что данную интерференционную картину можно наблюдать и с протяженным источником света.

Формирование интерференционных полос равной толщины

Интерферометр Майкельсона позволяет также получить другой вид интерференционной картины, а именно, интерференционную картину в виде параллельных полос. Очевидно, что если интерферометр настроен таким образом, что разность длин его плеч равна нулю, то (см. рис. 4) оба мнимых источника, полученных при отражении света от зеркал интерферометра, совпадают друг с другом. Разность фаз между волнами в области наложения в этом случае одинакова для всех точек наблюдения. Концентрических колец нет.

Ситуация изменится, если слегка наклонить одно из зеркал интерферометра. При этом соответствующий мнимый источник сместится в направлении, перпендикулярном оптической оси системы (рис. 5).

При небольшом наклоне зеркала расстояние между мнимыми источниками d вновь будет много меньше, чем характерный размер интерферометра L . Таким образом, мы приходим к классической схеме Юнга получения интерференции от двух когерентных источников, расположенных на малом расстоянии d друг от друга. Интерференционная картина наблюдается в плоскости параллельной линии, соединяющей источники (рис. 6). Разность хода интерферирующих волн в схеме Юнга равна нулю в центре интерференционной картины и линейно растет в зависимости от расстояния y от центра

$$\Delta s \approx \frac{y \cdot d}{L}.$$

Поэтому интерференционная картина в этом случае представляет собой параллельные друг другу интерференционные полосы.

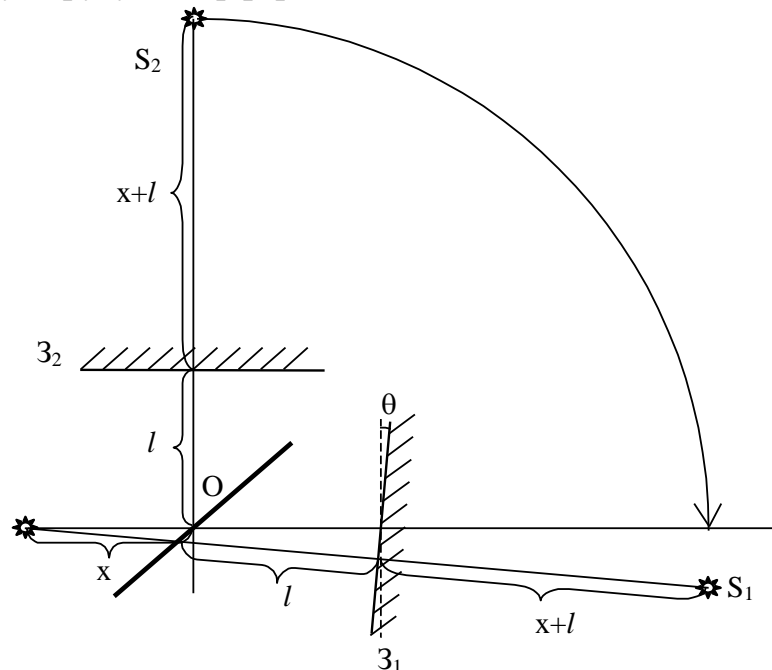


Рис. 5. Построение изображений источника в зеркалах интерферометра (зеркала не перпендикулярны друг другу, плечи одинаковы).

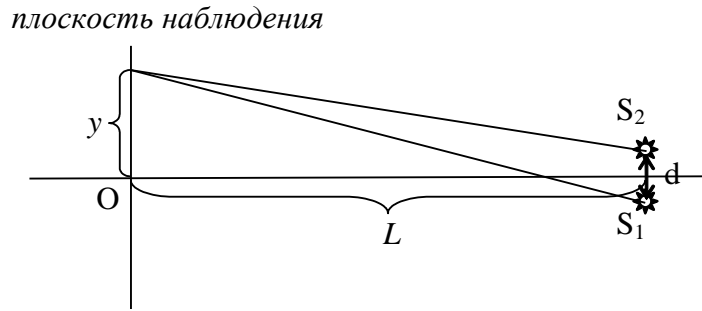


Рис. 6. Эквивалентная схема интерферометра

Рассмотрим случай, когда для формирования интерференционной картины используется плоская монохроматическая волна. Чтобы получить плоскую волну в рассматриваемой схеме, поместим источник, освещающий интерферометр Майкельсона, в фокусе тонкой собирающей линзы (рис. 7). После линзы сферическая волна от точечного источника станет плоской. В этом случае при перпендикулярном расположении зеркал интерферометра разность фаз между накладывающимися волнами будет одинаковой для всех точек в плоскости наблюдения. Поэтому всё поле зрения окажется равномерно засвеченным, а интенсивность засветки будет определяться разностью хода, возникающей вследствие разности длин плеч интерферометра.

При смещении одного из зеркал вдоль оси интерферометра интенсивность в плоскости наблюдения будет периодически возрастать до максимального значения и убывать до нуля, оставаясь одинаковой во всех точках плоскости, перпендикулярной оптической оси интерферометра. При нулевой разности длин плеч интерферометра интенсивность будет максимальной.

Наклоним одно из зеркал на малый угол θ . При отражении плоской волны, освещающей интерферометр, от зеркал прибора сформируются две плоские волны, идущие под углом 2θ друг к другу (рис. 7). Они образуют интерференционную картину в виде полос.

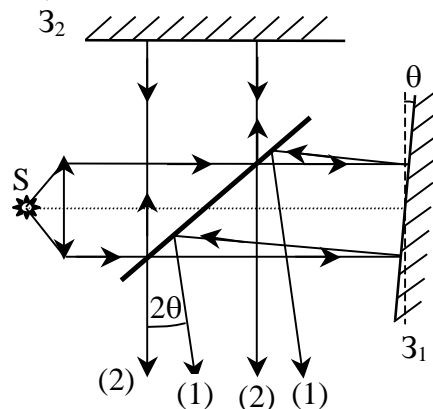


Рис. 7. Интерференция плоских волн в интерферометре Майкельсона.

Можно показать (см. литературу), что расстояние между параллельными полосами в данной интерференционной картине задается формулой:

$$\Delta y = \frac{\lambda}{2\theta}, \quad (9)$$

т.е. ширина полосы зависит от длины волны и угла наклона зеркала интерферометра. При увеличении угла наклона зеркала полосы сужаются. Расстояние от центра интерференционной картины до m -той светлой полосы равно $y_m = \frac{m\lambda}{2\theta} = m\Delta y$. Изменение разности хода при переходе между соседними светлыми (или темными) полосами равно $\Delta S_1 = \lambda = 2\theta \cdot \Delta y$.

Чтобы возникла интерференционная картина в виде параллельных полос, разность длин плеч интерферометра не обязательно должна быть нулевой, причем картина может наблюдаться как с точечным источником, так и в случае использования плоской волны³.

Самое важное то, что для получения интерференционной картины в виде параллельных полос, необходимо, чтобы одно из зеркал интерферометра было наклонено относительно другого на небольшой угол.

Интерференционную картину, полученную в такой геометрии, называют **полосами равной толщины**.

Измерение длины волны монохроматического источника излучения

При нулевой разности длин плеч интерферометра и неперпендикулярном расположении зеркал, в центре интерференционной картины образуется полоса нулевого порядка. Эта полоса играет важную роль при настройке интерферометра Майкельсона (см. ниже), так как интерференционная картина в нулевом порядке формируется даже при использовании немонохроматического источника света – обычной лампы накаливания.

Если подвижное зеркало Z_2 интерферометра начать перемещать вдоль оптической оси, то интерференционные полосы начнут смещаться в перпендикулярном направлении. Действительно, пусть в некоторой области наблюдается светлая полоса, например, пятого порядка интерференции, т.е. разность хода между волнами в этом месте равна 5λ . При смещении зеркала эта разность хода изменится, например, увеличится. Смещение зеркала на $\frac{\lambda}{2}$ приведет к увеличению разности хода на $2 \cdot \frac{\lambda}{2} = \lambda$, следовательно, на место пятой полосы придет следующая, шестая, а пятая сместится в сторону на расстояние, равное ширине полосы.

На смещении интерференционных полос при движении одного из зеркал интерферометра основан метод измерения спектральных характеристик источника, используемый в данной задаче. Для монохроматического источника данный метод позволяет определить длину волны света λ . Пусть подвижное зеркало сместили вдоль оси интерферометра на расстояние Δx . Тогда разность хода между волнами изменилась на $2\Delta x$. Если при этом через поле зрения наблюдателя прошло N интерференционных полос, то

$$2\Delta x = N\lambda,$$

³ В дальнейшем будет показано, что интерференционную картину можно наблюдать и с протяженным источником света.

и длину волны можно найти по формуле

$$\lambda = \frac{2\Delta x}{N}. \quad (10)$$

В работе используется ртутная лампа, спектр излучения которой является линейчатым. Выделяя с помощью светофильтра излучение той или иной длины волны, получают монохроматический источник света.

Квазимонохроматический источник излучения

Квазимонохроматическим называется такой источник света (или такое излучение), для которого выполняется соотношение $\Delta\lambda \ll \lambda_{cp}$, где $\Delta\lambda$ - ширина спектра излучения, λ_{cp} - средняя длина волны. В данной работе излучение обычной лампы накаливания пропускают через светофильтр, в результате на выходе получается квазимонохроматическое излучение со сплошным спектром шириной $\Delta\lambda$, равной ширине пропускания фильтра. Что будет представлять собой интерференционная картина полос равной толщины от такого источника?

Как отмечалось выше, волны с разными длинами не интерферируют друг с другом, поэтому каждая из длин волн излучения формирует свою интерференционную картину в виде полос, и эти картины накладываются друг на друга. Ширина полос (9) пропорциональна длине волны, поэтому полосы одного и того же порядка интерференции для разных длин волн окажутся в разных местах. В m -ом порядке интерференционные максимумы для длин волн, отличающихся на $\Delta\lambda$, будут смещены на расстояние $m \cdot \frac{\Delta\lambda}{2\theta}$ друг от друга. Если это расстояние окажется сравнимым с шириной интерференционной полосы $\Delta y = \frac{\lambda_{cp}}{2\theta}$, то полосы сольются, и интерференционная картина исчезнет. Таким образом, интерференционные полосы, наблюдаемые при использовании квазимонохроматического источника, отчетливо видны лишь в малых порядках интерференции, а с ростом порядка они постепенно размываются. Условие исчезновения интерференционной картины записывается в виде:

$$\frac{m\Delta\lambda}{2\theta} = \Delta y = \frac{\lambda_{cp}}{2\theta}.$$

Из этого условия следует, что число видимых полос (в одну сторону от центра интерференционной картины) до их размытия определяется соотношением:

$$m = \frac{\lambda_{cp}}{\Delta\lambda}, \quad (11)$$

т.е. зависит от ширины спектра излучения. Чем шире спектр, тем меньшее число полос равной толщины можно наблюдать в интерференционной картине.

Формулу (11) можно получить из других соображений. Интерференционная картина размывается, если максимумы m -го порядка для крайних длин волн

$\left(\lambda_{cp} - \frac{\Delta\lambda}{2}\right)$ и $\left(\lambda_{cp} + \frac{\Delta\lambda}{2}\right)$ спектрального диапазона разойдутся на расстояние, равное ширине полосы, которая примерно одна и та же для всех длин волн. Это означает, что максимум m -го порядка для $\left(\lambda_{cp} - \frac{\Delta\lambda}{2}\right)$ совпадет с максимумом $(m-1)$ -го порядка для $\left(\lambda_{cp} + \frac{\Delta\lambda}{2}\right)$, т.е. для разности хода можно записать:

$$m \cdot \left(\lambda_{cp} - \frac{\Delta\lambda}{2}\right) = (m-1) \cdot \left(\lambda_{cp} + \frac{\Delta\lambda}{2}\right).$$

Раскрывая скобки, вновь получим формулу (11).

Выражение (11) позволяет оценить ширину спектра излучения $\Delta\lambda$ квазимонохроматического источника по порядку интерференции m , в котором пропадает интерференционная картина:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{cp}}{m}. \quad (12)$$

Заметим, что для нулевого и близких к нему порядков интерференции при условии $\Delta\lambda \ll \lambda_{cp}$ картина видна отчетливо, так как максимум нулевого порядка для всех длин волн находится в одном месте. Поэтому для лампы накаливания даже в отсутствие светофильтра (ширина видимого глазом спектра $\Delta\lambda_{вид}$ сравнима с длинами волн λ_{cp} видимого диапазона) наблюдается интерференционная картина в нулевом порядке в виде системы разноцветных полос.

Размытие интерференционной картины происходит при определенной разности хода между интерферирующими волнами, которую называют *длиной когерентности*. Если для квазимонохроматического источника картина размывается в m -ом порядке интерференции (11), то длина когерентности равна

$$L_{коз} = m\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{cp}^2}{\Delta\lambda}. \quad (13)$$

При выполнении работы необходимо оценить ширину $\Delta\lambda$ полосы пропускания светофильтра. Для этого следует подсчитать число видимых полос $m_{вид}$ с одной и другой стороны от нулевого порядка, которые проходят через поле зрения наблюдателя при смещении подвижного зеркала интерферометра.

Тогда максимальный порядок интерференции равен $m = \frac{m_{вид}}{2}$, и, следовательно, для ширины полосы излучения (12) справедлива формула:

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_{cp}}{m_{вид}}. \quad (12a)$$

Источник, излучающий две близкие длины волны

Кроме квазимонохроматического, в настоящей задаче изучается источник, спектр которого состоит из двух близко расположенных линий или, как говорят, одной двойной линии (дублета). Такую структуру имеет желтая линия

в излучении ртутной лампы, которую можно выделить с помощью жёлтого светофильтра. Интерферометр Майкельсона позволяет оценить разность длин волн $\delta\lambda$ в двойной линии ртути. Для этого вновь используется интерференционная картина полос равной толщины.

Как и в предыдущем случае, каждая спектральная составляющая в излучении образует свою интерференционную картину, и эти картины накладываются друг на друга в плоскости наблюдения. Будем считать, что интенсивности обеих линий одинаковы. Закон изменения интенсивности в плоскости наблюдения для каждой линии задается формулой (1а). В нулевом порядке интерференции интенсивность картины для обеих линий максимальна, полосы наблюдаются отчетливо. По мере удаления от центра картины полосы всё больше смещаются друг относительно друга.

При определенной разности хода Δs_1 возникнет ситуация, когда светлая полоса интерференционной картины для $\left(\lambda_{cp} - \frac{\delta\lambda}{2}\right)$ совпадет с тёмной полосой для $\left(\lambda_{cp} + \frac{\delta\lambda}{2}\right)$. Интерференционная картина при этом размоется, полосы исчезнут. Порядок интерференции m_1 , в котором это произойдет, находится из соотношения:

$$\Delta s_1 = m_1 \cdot \left(\lambda_{cp} - \frac{\delta\lambda}{2}\right) = \left(m_1 - \frac{1}{2}\right) \cdot \left(\lambda_{cp} + \frac{\delta\lambda}{2}\right). \quad (14)$$

откуда при условии $\delta\lambda \ll \lambda_{cp}$ следует:

$$m_1 = \frac{\lambda_{cp}}{2\delta\lambda}.$$

В отличие от квазимонохроматического излучения, при дальнейшем увеличении разности хода в интерференционной картине вновь появятся полосы. Действительно, умножив соотношение (14) на два, получим:

$$\Delta s_2 = 2\Delta s_1 = 2m_1 \cdot \left(\lambda_{cp} - \frac{\delta\lambda}{2}\right) = (2m_1 - 1) \cdot \left(\lambda_{cp} + \frac{\delta\lambda}{2}\right). \quad (14a)$$

Порядки интерференции для обеих длин волн теперь отличаются на единицу, следовательно, при разности хода $\Delta s_2 = 2\Delta s_1$ максимумы вновь совпадут, и интерференционная картина будет видна отчетливо.

Нетрудно заметить, что при разности хода $\Delta s_3 = 3\Delta s_1$ картина вновь размоется, при разности хода $\Delta s_4 = 4\Delta s_1$ вновь станет четкой, и т.д.

Из приведенных формул следует, что изменение Δs разности хода, соответствующее двум последовательным наиболее размытым интерференционным картинам (или двум последовательным наиболее четким картинам), при условии $\delta\lambda \ll \lambda_{cp}$ равно:

$$\Delta s = 2\Delta s_1 \approx 2m_1 \cdot \lambda_{cp} = 2 \frac{\lambda_{cp}}{2\delta\lambda} \cdot \lambda_{cp} = \frac{\lambda_{cp}^2}{\delta\lambda}. \quad (15)$$

Соотношение (15) позволяет получить оценку разности длин волн дублета:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{cp}^2}{\Delta s}.$$

При выполнении работы увеличение разности хода происходит за счёт смещения подвижного зеркала вдоль оси интерферометра. Если при наблюдении интерференционной картины два последовательных размытия произошли при смещении зеркала на расстояние Δx , то разность хода изменилась на $\Delta s = 2\Delta x$. Окончательно для определения $\delta\lambda$ имеем:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{cp}^2}{2\Delta x}. \quad (16)$$

Протяженный источник излучения.

В рассмотренном выше случае точечного источника света интерференция наблюдается в любом месте наложения двух пучков, идущих от зеркал. Можно, например, установить экран на пути пучков (1) и (2), распространяющихся в направлении Н (рис. 2) и наблюдать либо интерференционные полосы, либо кольца. В этом случае говорят, что интерференционная картина *не локализована*.

Однако реальный источник является протяженным, его можно представить как совокупность большого числа точечных **некогерентных** источников (каждая точка такого источника излучает независимо от остальных). Поэтому необходимо организовать такую схему наблюдения, чтобы интерференционные картины, создаваемые каждой из точек протяженного источника, были абсолютно одинаковыми и наблюдались в одном и том же месте.

Для того, чтобы понять, как это реализуется в интерферометре Майкельсона, построим изображение зеркала Z_1 в светоделительной пластине (рис. 8). Пусть зеркала Z_1 и Z_2 установлены перпендикулярно друг другу, и плечи интерферометра не одинаковы. Из рис. 8 видно, что между изображением зеркала (Z_1) и зеркалом Z_2 фактически реализуется плоскопараллельный воздушный слой, толщина которого задается разностью длин плеч интерферометра. Известно (см. литературу), что при освещении такого слоя расходящимся пучком света от **протяженного** монохроматического источника в отраженном свете можно наблюдать интерференционную картину в виде системы колец. Но наблюдение следует осуществлять с помощью зрительной трубы (на рисунке не показана), наведенной на бесконечность. В этом случае говорят, что интерференционная картина *локализована в бесконечности*. В используемом при выполнении задачи интерферометре наблюдение ведется в специальный окуляр, изначально настроенный на бесконечность.

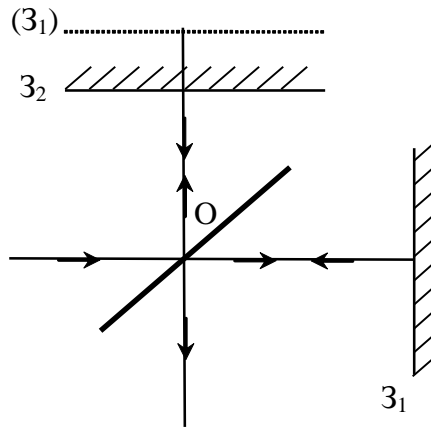


Рис. 8. Построение изображения зеркала Z_1 в СДП
(зеркала перпендикулярны друг другу, плечи не одинаковы).

Такая интерференционная картина носит название **полос равного наклона**. Каждое интерференционное кольцо соответствует одному и тому же углу падения (наклона) излучения протяженного источника на зеркала. Поэтому для получения системы интерференционных колец необходимо использовать расходящийся пучок света, а для ее наблюдения следует использовать зрительную трубу, наведенную на бесконечность.

Пусть теперь плечи интерферометра примерно одинаковы, а зеркало Z_1 повернуто на небольшой угол. Вновь построим изображение зеркала Z_1 в светоделительной пластине (рис. 9). В результате между отражающими поверхностями изображения зеркала (Z_1) и зеркала Z_2 возникает двугранный угол. Другими словами, образуется воздушный клин, толщина которого определяется наклоном зеркала Z_1 и разностью длин плеч интерферометра в данных условиях⁴.

Известно (см. литературу), что при освещении клина излучением протяженного источника можно наблюдать интерференционную картину в виде **полос равной толщины** - в нашем случае полос, параллельных ребру клина. Эта картина **локализуется на поверхности клина**, т. е. на "поверхности зеркал" или вблизи них, в зависимости от толщины клина⁵. Каждая

⁴ Ребро воздушного клина, образуемого плоскостями зеркала Z_2 и изображения в пластине СДП зеркала (Z_1), может и не совпадать с центром зеркала Z_2 и даже вообще находиться за пределами поверхности зеркала Z_2 . Но для того чтобы наблюдать интерференцию в белом свете, когда необходима малая разность хода между интерферирующими лучами, ребро воздушного клина должно непременно находиться в пределах поверхности зеркала Z_2 .

⁵ При указании локализации полос равной толщины в интерферометре Майкельсона иногда пишут, без всяких оговорок, что они расположены на поверхности зеркал. Такую формулировку нельзя понимать буквально уже потому, что на каждое зеркало падает по одному пучку света, и этим пучкам до их воссоединения после вторичного прохождения через светоделительную пластинку нет возможности встретиться и проинтерферировать. Смысл упоминаемой формулировки заключается лишь в том, что уже после вторичного прохождения через светоделительную пластинку пучки 1 и 2 идут так, как будто бы они испытали отражение от поверхностей воздушного клина, изображенного линиями Z_2 и (Z_1) в верхней части рис. 9. Поэтому фокусировка на интерференционную картину с помощью фотоаппарата или глаза действительно эквивалентна фокусировке на поверхности зеркал, которые сами, конечно, просто равномерно освещены отдельными световыми пучками.

интерференционная полоса соответствует одной и той же толщине клина, поэтому для наблюдения системы нескольких полос необходимо применение именно клиновидной пластинки.

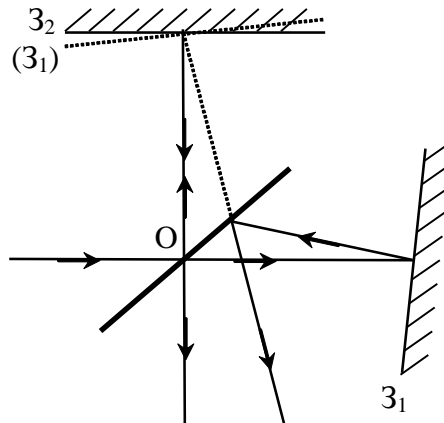


Рис. 9. Построение изображения зеркала Z_1 в СДП
(зеркала не перпендикулярны друг другу, плечи одинаковы).

Для наблюдения полос равной толщины необходимо освещение поверхностей клина пучком света, близким к параллельному, однако при малой толщине клина это требование несущественно. В настоящей задаче наблюдение интерференционных полос равной толщины осуществляется через оптическую систему, наведенную на «поверхность зеркал» и дающую слегка увеличенное изображение интерференционной картины.

II. Эксперимент

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 10 (вид сверху).

В качестве источника света при работе с интерферометром используются либо ртутная лампа РЛ, либо лампа накаливания ЛН. Обе лампы смонтированы на едином ползунке, перемещая который можно устанавливать на оптической оси установки ту или иную лампу. Ртутная лампа включается через специальное пусковое устройство. Питание на лампу накаливания подается через понижающий трансформатор. Перед лампами на отдельной стойке расположена собирающая линза L_1 (первый конденсор), позволяющая сформировать направленный пучок света.

Далее световой пучок поступает в конденсорную систему⁶, снабженную вращающейся обоймой со светофильтрами СФ, что позволяет изменять спектральный состав излучения. Смена фильтров осуществляется поворотом от руки края обоймы через небольшое окошечко в кожухе конденсорной системы. Каждый светофильтр имеет номер (белая цифра на обойме), таблица

⁶ Перед входом света в конденсорную систему прибора имеется подъемная стойка, на которой установлена поворотная призма. С помощью этой призмы можно, в случае необходимости, повернуть световой пучок на 90° и направить его в небольшой монохроматор, установленный на станине прибора. В настоящей задаче монохроматор не используется.

соответствия номера и характеристик фильтра расположена на столе около прибора.

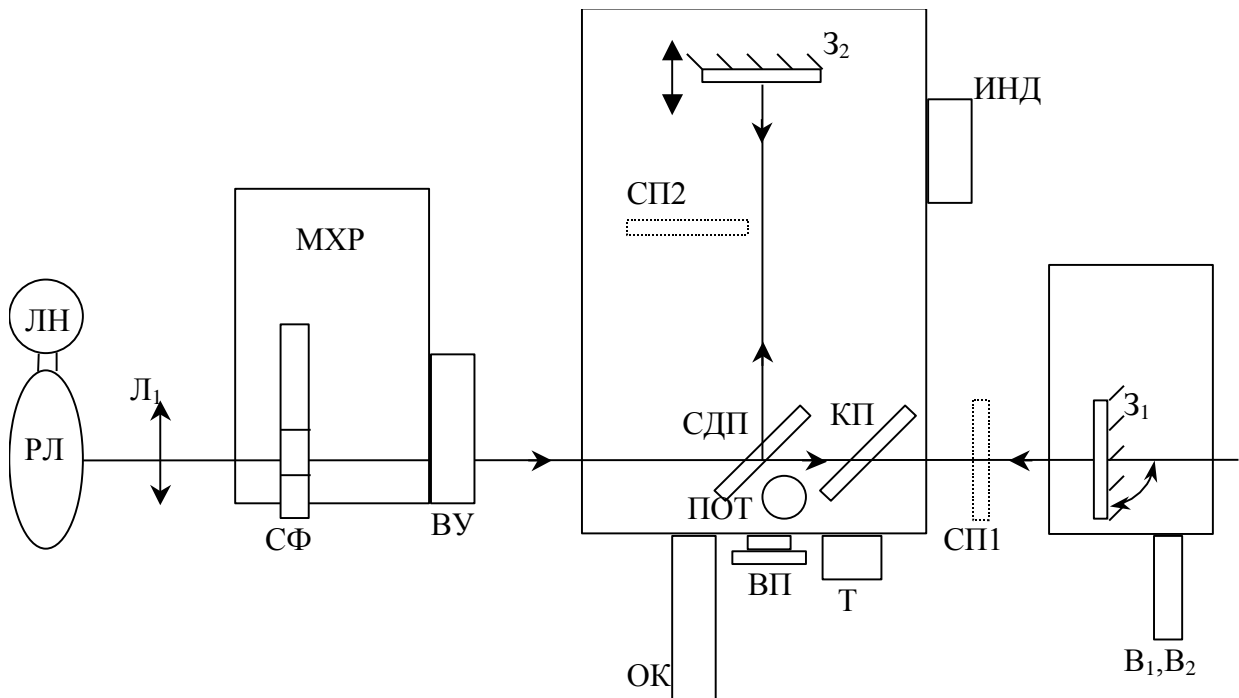


Рис. 10. Схема интерферометра Майкельсона.

РЛ – ртутная лампа; ЛН – лампа накаливания; L_1 – собирающая линза; СФ – оправа для светофильтров; ВУ – выходное устройство (щель-матовое стекло); МХР – монохроматор (в задаче не используется); СДП – светоделительная пластинка; Z_1 – неподвижное (поворотное) зеркало; Z_2 – подвижное зеркало; ВП – винт перемещения зеркала Z_2 ; V_1, V_2 – винты наклона зеркала Z_1 ; ОК – окуляр для наблюдения полос равной толщины; Т – телескоп для наблюдения полос равного наклона; ПОТ – переключатель окуляр-телескоп; КП – компенсационная пластина; СП1, СП2 – стеклянные пластины для измерения показателя преломления.

Участок обоймы, не имеющий белой цифры с номером фильтра, соответствует отсутствию какого-либо фильтра и пропусканию через конденсорную систему всего светового потока от используемой в данный момент лампы. На выходе конденсорной системы имеется устройство ВУ, позволяющее установить перед входом в интерферометр либо раздвижную щель - для получения полос равной толщины, либо матовое стекло - для получения полос (колец) равного наклона. Матовое стекло обеспечивает наличие в первичном световом пучке различных углов падения света на зеркала интерферометра. Замена щели на матовое стекло осуществляется поворотом всей головки со щелью, как целого, на 90° .

Излучение, прошедшее через щель или рассеянное матовым стеклом, падает на светоделительную пластинку СДП интерферометра, в результате формируются два пучка света примерно одинаковой интенсивности.

Один из пучков (прошедший насквозь), пройдя через стеклянную компенсационную пластину КП, попадает на зеркало Z_1 . Углы наклона этого зеркала регулируются двумя микрометрами V_1 и V_2 , выступающими наружу через стенку кожуха рядом с Z_1 . Отсчеты на этих микрометрах,

соответствующие удобному наблюдению полос равной толщины, указаны на приборе.

Второй пучок (отклоненный СДП на 90 градусов) попадает на подвижное зеркало Z_2 , которое можно плавно перемещать с точностью, сравнимой с длиной волны излучения. Передвижение салазок, на которых установлено подвижное зеркало, может осуществляться двумя винтами. Один винт с крупным шагом (его видно через крышку прибора) осуществляет грубое перемещение зеркала, необходимое при существенных изменениях соотношения длин плеч интерферометра. В данной задаче для измерительных целей эта винтовая подача практически не используется, и ручка вращения этого винта наружу прибора не выведена.

Другая, тонкая подача салазок, осуществляется в небольшом измерительном диапазоне винтом ВП с малым шагом. Шестерня и червячная передача для плавного вращения этого винта вынесены наружу в центральной части станины прибора.

Измерения перемещения зеркала осуществляются с помощью особого индикатора ИНД часового типа, расположенного непосредственно на салазках зеркала. Этот индикатор дает точность отсчета 0,002 мм. Он виден через окно, расположенное в правой задней части прибора. Отсчет по индикатору, соответствующий возможности наблюдать интерференцию в белом свете, указан на рабочем столе вблизи индикатора. Там же указан и порядок считывания значений перемещения по индикатору.

В каждое из плеч интерферометра могут вводиться стеклянные пластины СП1 и СП2, позволяющие измерять зависимость показателя преломления стекла от длины волны. Пластина СП1 вводится поворотом вокруг горизонтальной оси за ручку, расположенную за пределами защитного прозрачного кожуха. Вторая пластина СП2 установлена в другом плече интерферометра на поперечном ползунке. Назначение обоих стеклянных пластин разъясняется в описании упражнения 6.

На лицевой панели интерферометра расположена его наблюдательная система. Путем перемещения простой системы зеркал можно вести наблюдение интерференционных картин либо через телескоп Т (полосы равного наклона), либо через слабый окуляр ОК (полосы равной толщины). На крышке прибора расположены надписи, указывающие, как пользоваться той или иной оптической системой. Переключение световых пучков из одной системы в другую осуществляется вращением одного зеркала, поворотная ручка ПОТ которого выведена над крышкой прибора.

Порядок выполнения

Упражнение 1.

Подготовка установки к измерениям, нахождение нулевого порядка интерференции в белом свете лампы накаливания

Так как в данном упражнении в качестве источника света используется лампа накаливания ЛН, то интерференционная картина может наблюдаться только

при условии, что длины плеч интерферометра **практически одинаковы** (видны нулевой и ближайшие к нему порядки интерференции). Ширина интерференционных полос регулируется наклоном неподвижного зеркала Z_1 . Наблюдение ведется в окуляр ОК.

Для подготовки прибора к первым наблюдениям необходимо выполнить следующее.

1) Включить лампу накаливания ЛН и установить ее на оптической оси системы напротив собирающей линзы L_1 . Обойму со светофильтрами СФ повернуть в положение, соответствующее отсутствию светофильтра. Поворотом выходного устройства ВУ на выходе конденсорной системы установить матовое стекло.

Изменяя положение лампы ЛН (влево-вправо) и линзы L_1 (влево-вправо и вверх-вниз) добиться уверенного прохождения светового пучка через конденсорную систему до входа интерферометра. В этом случае на матовом стекле будет наблюдаться четкое световое пятно диаметром 1-2 сантиметра.

После выполнения данного условия можно переключить выходное устройство ВУ с матовой пластинки на раздвижную щель⁷.

2) Вращая винт перемещения ВП, установить подвижное зеркало Z_2 в положение, соответствующее равенству плеч. Примерное значение по шкале индикатора ИНД, при котором данное условие выполнено, указано на установке.

3) Наблюдая в центральный окуляр ОК и перемещая зеркало Z_2 в небольшом диапазоне, попытаться найти интерференционную картину в белом свете. Она представляет собой центральную темную полосу⁸ и несколько симметрично расположенных радужных полос.

Вследствие того, что наклон зеркала Z_1 неизвестен, возможна ситуация, когда обнаружить интерференционные полосы в белом свете не удастся. В этом случае следует установить зеленый светофильтр, что позволит расширить область интерференции.

Если обнаружить интерференционную картину и в этом случае не удастся, следует обратиться к преподавателю или дежурному лаборанту.

4) Наблюдаемая интерференционная картина может иметь вид полос произвольной ширины и ориентации. Регулировка параметров полос осуществляется с помощью микрометров V_1 и V_2 , управляющих наклонами неподвижного зеркала Z_1 . Поворачивая ручки микрометров на небольшие углы, проследить за изменением картины. Вследствие небольшого люфта картина может иногда «убегать» из поля зрения, ее необходимо «возвращать», перемещая винтом ВП зеркало Z_2 .

⁷ Интерференционную картину можно наблюдать как с матовой пластинкой, так и со щелью.

⁸ Линия нулевого порядка интерференции будет темной, а не светлой, вследствие того, что при отражении пучка (1) от СДП возникает дополнительная разность фаз, равная π (отражение от оптически более плотной среды). Поэтому при равенстве плеч интерферирующие волны (1) и (2) приходят в противофазе.

В результате следует получить картину в виде вертикально расположенных полос с шириной, удобной для наблюдения и подсчетов.

5) Если регулировка осуществлялась при зеленом светофильтре, то убрать его и найти нулевой порядок в белом свете. Вращая винт перемещения ВП, установить темную ахроматическую полосу напротив вертикальной измерительной нити в окуляре.

Записать показания x_0 индикатора ИНД, соответствующие нулевому порядку интерференции⁹.

В результате выполнения упражнения найдено положение зеркала Z_2 , соответствующее нулевому порядку интерференции, получена интерференционная картина в виде полос равной толщины.

Упражнение 2.

Измерение ширины полосы пропускания светофильтра интерференционным методом.

Первоначально в белом свете лампы накаливания ЛН наблюдается интерференционная картина в виде вертикальной ахроматической темной полосы нулевого порядка и нескольких радужных полос.

1) Обойму со светофильтрами СФ повернуть в положение, соответствующее одному из светофильтров. Вследствие сужения спектрального интервала излучения число видимых интерференционных полос возрастает.

2) Вращая винт ВП в произвольном направлении, проследить за смещением интерференционных полос и постепенным размытием картины. Вращение продолжать до тех пор, пока полосы не станут практически не различимы. Записать текущее значение x_1 индикатора ИНД.

3) Далее, вращая винт в противоположном направлении, подсчитать количество N видимых интерференционных полос до их практически полного пропадания. Записать новое значение x_2 индикатора ИНД.

4) Вычислить длину волны, соответствующую центру полосы пропускания светофильтра. Перемещение зеркала Z_2 равно $\Delta x = x_2 - x_1$, при этом разность хода между пучками, отраженными от зеркал, изменится на величину, в 2 раза большую. В то же время порядок интерференции изменится на N (от $-N/2$ до $+N/2$). Следовательно, длина волны центра полосы пропускания может быть рассчитана по формуле (10):

$$\lambda_{cp} = \frac{2\Delta x}{N}.$$

⁹ Для записи результатов рекомендуется использовать таблицу, приведенную в **Приложении 2**.

5) Вычислить полосу пропускания $\Delta\lambda$ светофильтра. Так как порядок, в котором пропадает интерференционная картина, равен $N/2$, то из формулы (11) следует:

$$\begin{aligned} N/2 &= \frac{\lambda_{cp}}{\Delta\lambda}; \\ \Delta\lambda &= \frac{2\lambda_{cp}}{N} = \frac{4\Delta x}{N^2}. \end{aligned}$$

6) Рассчитать длину когерентности по формуле (13).

7) Аналогичные измерения и вычисления провести еще для одного-двух светофильтров (по указанию преподавателя).

Упражнение 3.

Измерение длин волн в спектре ртути по сдвигу интерференционных полос равной толщины

1) Выключить лампу накаливания ЛН и включить ртутную лампу РЛ. Установить ее на оптической оси системы напротив собирающей линзы Л $\Delta\lambda$ и провести настройку способом, предложенным в п.1) упражнения 1.

2) Ввести в пучок **зеленый** светофильтр, выделяющий соответствующую линию в спектре ртути. Так как ширина этой линии существенно меньше полосы пропускания светофильтра, то интерференционные полосы будут отчетливо видны даже при значительном перемещении зеркала Z_2 .

3) Вращая винт ВП в произвольном направлении, найти величину $\Delta x_{зел}$ смещения Z_2 соответствующего прохождению через поле зрения окуляра ста интерференционных полос. Найти длину волны зеленой ртути $\lambda_{зел}$, пользуясь соотношением (10):

$$\lambda_{зел} = \frac{2\Delta x_{зел}}{N},$$

где $\Delta x_{зел}$ - перемещение зеркала Z_2 , соответствующее сдвигу картины на $N=100$ полос.

4) Произвести те же измерения и расчеты для **сине-фиолетовой** линии ртутного спектра.

Упражнение 4.

Измерение разности длин волн двух близких линий ртутного спектра

Как отмечалось выше, интерференционная картина, полученная от двух близких по длине волны спектральных линий, по мере изменения разности хода между интерферирующими лучами становится то более, то менее четкой.

Эта картина периодических пространственных "биений" есть результат суперпозиции двух интерференционных картин, с несколько различными пространственными периодами. По измерениям периода «биений» можно

получить оценку разности длин волн, создающих интерференционную картину переменной четкости.

1) Установить на пути пучка света, идущего от ртутной лампы РЛ, **желтый** светофильтр. Установить зеркало Z_2 в положение, соответствующее нулевому порядку интерференции (соответствующее показание индикатора ИНД было найдено в упражнении 1). Убедиться, что при этом наблюдается четкая интерференционная картина.

2) Вращая винт ВП, найти положение зеркала Z_2 , при котором происходит полное размытие картины. Записать соответствующее показание x_1 индикатора ИНД.

Внимание! Вращение следует осуществлять в направлении, соответствующему перемещению зеркала Z_2 от светоделительной пластины (показания на индикаторе должны возрасти)! Данное требование необходимо для выполнения последующих упражнений.

3) Продолжая вращение в том же направлении, найти положение x_2 зеркала Z_2 , соответствующее 11-му размытию интерференционной картины¹⁰. В этом случае смещение Z_2 , соответствующее двум последовательным размытиям интерференционной картины, будет равно

$$\Delta L = \frac{x_2 - x_1}{10}.$$

4) Рассчитать разность длин волн $\delta\lambda$ двух желтых линий спектра ртути, пользуясь соотношением (16):

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{cp}^2}{2\Delta L},$$

где $\lambda_{cp} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} = 578$ нанометров.

Упражнение 5.

Наблюдение интерференционных полос равного наклона (колец) и измерение длины световой волны

По окончании предыдущего упражнения длины плеч интерферометра существенно отличаются друг от друга, что позволяет получить интерференционную картину в виде полос (колец) равного наклона.

1) Заменить в обойме СФ желтый светофильтр на **зеленый**. В этом случае будут наблюдаться четкие интерференционные полосы.

2) Медленно и плавно изменяя винтами B_1 и B_2 наклон неподвижного зеркала Z_1 , расширить интерференционные полосы настолько, чтобы все поле зрения было занято какой-либо одной интерференционной полосой. Это будет

¹⁰ Смещение зеркала будет довольно существенным, поэтому процесс перемещения может длиться несколько минут. При этом подсчитывается только число размытий, число полос считать не надо!

означать, что воздушный клин между зеркалами превратился практически в плоскопараллельный воздушный слой.

3) Заменить на ВУ входную щель прибора матовым стеклом. Это можно сделать, повернув головку со щелью как целое вокруг горизонтальной оси.

4) Переключить с помощью ПОТ световой пучок в наблюдательной системе на телескоп Т для наблюдения полос равного наклона (колец). При правильной настройке в телескопе должна наблюдаться система интерференционных колец.

5) Смещая подвижное зеркало Z_2 в ту или иную сторону, наблюдать, как кольца в центре картины «схлопываются» или «разбегаются». Дать объяснение этому эффекту.

6) Зная по показаниям индикатора разность длин плеч интерферометра, оценить по формуле (8) порядок интерференции в центре картины. Вспомнить, как изменяется порядок колец по мере их удаления от центра.

Зарисовать интерференционную картину и указать порядок интерференции центрального пятна и двух ближайших к нему колец.

7) Провести измерение той или иной длины волны λ_{pm} ртутного спектра по методике, аналогичной упражнению 3 (по указанию преподавателя).

8) Установить другой светофильтр, пронаблюдать изменение интерференционной картины и рассчитать порядок интерференции в центре. Рассчитать длину волны линии ртути (по указанию преподавателя).

Упражнение 6.

Получение зависимости показателя преломления стекла от длины волны интерференционным методом

Пусть в одно из двух равных плеч интерферометра дополнительно вводится стеклянная пластинка толщиной d . Очевидно, что тогда наблюдаемая в белом свете интерференционная картина исчезнет, так как между интерферирующими лучами возникнет разность хода, равная

$$\Delta s = 2d(n_{cm} - n_g) = 2d(n_{cm} - 1), \quad (17)$$

где $n_{cm}, n_g = 1$ - показатели преломления стекла и воздуха соответственно.

Для того чтобы восстановить интерференционную картину в поле зрения трубы (вновь привести к нити окуляра ахроматическую центральную интерференционную полосу), необходимо увеличить длину другого плеча интерферометра на величину

$$\Delta x = \frac{\Delta s}{2} = d(n_{cm} - 1).$$

Тогда показатель преломления стекла может быть найден по формуле:

$$n_{cm} = 1 + \frac{\Delta x}{d}.$$

Перечисленные операции и осуществляются в настоящем упражнении. Однако практическое выполнение изложенного метода нуждается в некотором искусственном приеме. Дело в том, что подвижное зеркало используемого в установке интерферометра может перемещаться не более, чем на три

миллиметра. Учитывая, что $n_{ст} \approx 1.5$, легко получить, что толщина пластины d не должна превышать 1,5 мм. Однако изготовить плоскопараллельную пластинку такой толщины и диаметром в 50 мм с качеством поверхностей, пригодных для интерферометрических измерений, не представляется возможным из-за деформаций, возникающих в тонком слое стекла. С более толстой стеклянной пластинкой не позволяет работать используемый интерферометр.

Поэтому поступают так: из стекла одного и того же сорта изготавливают две толстые плоскопараллельные пластинки, но с разностью толщин около 1 мм. Затем, в процессе измерений, в одно плечо интерферометра вводится первая пластинка толщиной d_1 , а в другое - вторая пластинка толщиной d_2 , что эквивалентно введению в одно из плеч интерферометра пластинки толщиной $d = d_1 - d_2$. Сдвиг интерференционной картины, вызванный этим слоем стекла, уже может быть скомпенсирован изменением длины второго плеча интерферометра за счет перемещения подвижного зеркала. Именно так и делается в настоящем упражнении. Этим объясняется наличие в приборе двух подвижных стеклянных пластин СП1 и СП2 (на столике и на ползушке) в обоих плечах интерферометра. Толщина стеклянных пластин указана на установке.

При описанных интерференционных измерениях показателя преломления, выполняемых в белом свете, необходимо учитывать следующее обстоятельство. Все сорта стекла обладают дисперсией, т.е. показатель преломления стекла зависит от длины волны света. Поэтому, передвигая подвижное зеркало Z_2 , в присутствии пластин невозможно полностью восстановить ту интерференционную картину, которая наблюдалась в белом свете в нулевом порядке, до их введения в плечи интерферометра. Ведь разность хода (17), возникающая в результате установки пластин, будет вследствие дисперсии зависеть от длины волны. Вместо прежней картины в поле зрения прибора после надлежащего компенсационного сдвига подвижного зеркала будет видна целая серия близко расположенных друг к другу интерференционных картин разных цветов, соответствующих разным длинам волн, входящих в состав видимого спектра. Центральную полосу нулевого порядка для каждой такой квазимонохроматической интерференционной картины можно поочередно приводить к совпадению с нитью окуляра соответствующим перемещением подвижного зеркала Z_2 . Измеряя по индикатору ИНД величину перемещения подвижного зеркала, можно находить значения показателя преломления для разных длин волн. Иначе говоря, интерферометр открывает возможность изучить дисперсию исследуемого стекла. Необходимо только указать каким образом определяются те длины волн, для которых производятся измерения показателя преломления.

При выполнении настоящего упражнения следует произвести следующие действия:

1) В предыдущем упражнении в телескоп Т наблюдалась система колец равного наклона, для этого плоскости зеркал Z_1 и Z_2 были установлены

перпендикулярно друг другу. В настоящем упражнении следует вновь вернуться к наблюдению полос равной толщины.

Чтобы это сделать, необходимо переключить световой пучок с помощью ПОТ в наблюдательной системе с телескопа Т на окуляр ОК для наблюдения полос равной толщины. Используя винты V_1 и V_2 , отрегулировать наклон неподвижного зеркала Z_1 так, чтобы видеть четкую систему полос в свете ртутной лампы.

2) Выключить ртутную лампу РЛ и включить лампу накаливания ЛН. Установить ее на оптической оси системы напротив собирающей линзы L_1 и провести настройку способом, предложенным в п.1 упражнения 1. Так как разность плеч, установленная в предыдущем упражнении, велика, никакой интерференционной картины в окуляр ОК не наблюдается.

3) Ввести в плечи интерферометра стеклянные пластины известных толщин (указаны на установке). В плечо неподвижного зеркала Z_1 пластина СП1 толщиной d_1 вводится поворотом на 90 градусов вокруг горизонтальной оси. В плечо подвижного зеркала Z_2 пластина СП2 толщиной d_2 вводится перемещением оправы вдоль горизонтальной направляющей. При этом по-прежнему никакой интерференционной картины в окуляр ОК не наблюдается.

4) Так как $d_1 > d_2$, то неподвижное зеркало Z_2 должно быть смещено от положения, соответствующего нулевому порядку в отсутствие пластин (было найдено в упражнении 1) на расстояние, равное $(d_1 - d_2) \cdot (n_{cm} - 1)$. Считая $n_{cm} \approx 1.5$, оценить примерное положение Z_2 , при котором должен наблюдаться нулевой порядок интерференции уже в присутствии пластин. Вращая винт перемещения ВП зеркала Z_2 , установить данное значение на индикаторе ИНД.

Так как точное значение показателя преломления стекла неизвестно, то, перемещая Z_2 вперед-назад относительно рассчитанного положения и ведя непрерывные наблюдения в окуляр ОК, найти интерференционную картину в белом свете лампы накаливания. Отметим, что в отличие от упражнения 1, когда в центре наблюдалась темная ахроматическая полоса, теперь в окуляр ОК будет видна система цветных полос (почему?).

5) Ввести в первичный световой пучок какой-либо из светофильтров, использованный ранее в упражнении 2. Наклоном зеркала Z_1 добиться четкой интерференционной картины в виде вертикальных полос ширины, удобной для наблюдения.

6) Чтобы определить показатель преломления для длины волны пропускания используемого светофильтра (была найдена в упражнении 2) необходимо найти положение нулевого порядка интерференции. Для этого найти крайние положения зеркала Z_2 , при которых картина размывается (аналогично упражнению 2) и записать соответствующие показания x_1 и x_2 на индикаторе ИНД. Координата нулевого порядка x_{0cm} будет соответствовать среднему арифметическому этих показаний.

7) Зная разность толщин пластин $(d_1 - d_2)$ и разность положений нулевого максимума $(x_{0cm} - x_0)$ в присутствии и отсутствии пластин, рассчитать показатель преломления стекла для данной длины волны по формуле:

$$n_{cm}(\lambda) = 1 + \frac{x_{0cm} - x_0}{d_1 - d_2}. \quad (18)$$

8) Аналогичным образом найти показатели преломления стекла с использованием других светофильтров, примененных в упражнении 2.

В отчете по задаче представить:

- 1) длину волны λ_{cp} центра и ширину $\Delta\lambda$ полосы пропускания каждого из светофильтров (упражнение 2);
- 2) длины волн λ_{pm} спектра ртутной лампы (упражнения 3 и 5);
- 3) разность длин волн $\delta\lambda$ двух желтых линий в спектре ртутной лампы (упражнение 4);
- 4) порядок интерференции в центре системы полос (колец) равного наклона (упражнение 5);
- 5) показатели преломления n_{cm} стекла для длин волн пропускания светофильтров (упражнение 6).

Для всех величин следует оценить погрешность!

Технические данные установки

В работе используется учебно-демонстрационный интерферометр Майкельсона марки ИЗК-452. Однако в приборе произведены многочисленные переделки, необходимые для его использования в перечисленных выше упражнениях (сделан новый осветитель со сменными лампами накаливания и ртутной лампой, установлена поворотная призма, позволяющая включать в работу и выключать монохроматор, усилены пружины, управляющие обратным ходом каретки подвижного зеркала, заменен индикатор перемещений зеркала, изменена наблюдательная система прибора, установлена ползушка для введения стеклянного диска в плечо подвижного зеркала, металлические крышки футляра интерферометра, не допускавшие обзора его внутреннего устройства, заменены прозрачными и т. д.). В работе используется ртутная лампа ПРК-2.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976, §29.
2. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985. §26.
3. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Наука, 2004. Лекция 11.
4. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1986. §5.3.

Контрольные вопросы и задания.

1. Нарисуйте схему интерферометра Майкельсона и объясните, как формируется интерференционная картина.
2. Как с помощью интерферометра Майкельсона получить полосы равной толщины и равного наклона?
3. Как изменяется интерференционная картина при смещении одного из зеркал?
4. Как изменяется интерференционная картина при наклоне одного из зеркал?
5. При каких условиях можно наблюдать интерференцию от лампы накаливания с помощью интерферометра Майкельсона?
6. Как отличаются интерференционные картины для случаев квазимонохроматического источника и источника, излучающего две близкие длины волны?
7. Как с помощью интерферометра Майкельсона измерить длину волны монохроматического излучения?
8. Как с помощью интерферометра Майкельсона оценить ширину полосы квазимонохроматического излучения?
9. Как с помощью интерферометра Майкельсона найти разность длин волн двойной линии в спектре излучения?
10. Как с помощью интерферометра Майкельсона измерить зависимость показателя преломления от длины волны?

Приложение 1.

Связь между разностью хода и разностью фаз.

Пусть вдоль направления x распространяется плоская монохроматическая волна

$$E(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t + \psi_0).$$

Для двух точек с координатами x_1 и x_2 , находящихся на расстоянии $\Delta x = x_2 - x_1$ друг от друга, разность фаз, зафиксированная в один момент времени, равна

$$\begin{aligned} \varphi &= \Phi_2 - \Phi_1 = (kx_2 - \omega t + \psi_0) - (kx_1 - \omega t + \psi_0) = \\ &= k(x_2 - x_1) = k \cdot \Delta x \end{aligned}$$

Если две монохроматические волны пройдут до точки встречи разные пути x_1 и x_2 , то между ними возникнет не зависящая от времени оптическая разность хода $\Delta s = n(x_2 - x_1)$, где n – показатель преломления среды, в которой распространяются волны. Появившаяся между волнами разность фаз в точке наблюдения равна

$$\varphi = k \cdot \Delta s,$$

где k – волновое число ($k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\nu}{c}$, c – скорость света).

Заметим, что разность хода Δs не зависит от частоты и длины волны света, а определяется лишь разностью путей, пройденных волнами до точки встречи, в то время как разность фаз φ зависит от частоты и длины волны накладывающихся волн.

Приложение 2.

Таблица для записи результатов измерений

(рекомендуется распечатать)

Ф.И.О _____ № группы _____

Задача 135

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ
ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Названия упражнений (кратко) указать самостоятельно!

В ячейки « $x_{1,2}$ » вносить **показания индикатора**, разность хода Δx считать в мм.

Упр. 1 _____

Источник света: _____

Координата нулевого порядка (показания индикатора)	
Цена деления индикатора	0,002 мм

Упр. 2 _____

Источник света: _____

светофильтр	x_1	x_2	N	Δx (мм)	$\lambda_{\text{ср}}$ (нм) и погр.	$\Delta \lambda$ (нм) и погр.	Длина когерентности (мкм)

Упр. 3 _____

Источник света: _____

светофильтр	x_1	x_2	N	Δx (мм)	λ (нм) и погр.	$\lambda_{\text{табл}}$ (нм)
			100			
			100			

Упр. 4 _____

Источник света: _____

светофильтр	x_1	x_2	Число размытий	Δx (мм)	$\lambda_{\text{ср}}$ (нм)	$\delta \lambda$ (нм) и погр.	$\delta \lambda_{\text{табл}}$ (нм)
			10		578		

Упр. 5 _____

Источник света: _____

светофильтр	x_1	x_2	N	Δ (мм)х	$\lambda_{\text{ср}}$ (нм)и погр.	$\Delta s_{\text{центр}}$ (мм)	$m_{\text{центр}}$
			100				
			100				

Упр. 6 _____

Источник света: _____

Толщина пластины d_1 (мм)	Толщина пластины d_2 (мм)	$d_1 - d_2$ (мм)

Используются те же светофильтры, что и в Упр. 2.

светофильтр	λ (упр.2)	x_1	x_2	$x_{0\text{ст}}$	x_0 (упр.1)	$n_{\text{ст}}$ и погр.

Вспомогательные расчеты выполняются на обратной стороне листа.

Приложение 3.**Схема использования оборудования при выполнении задачи №135**

Номер упражнения	Источник света	Светофильтр	Выходное устройство	Наблюдение
1	Лампа накаливания	Нет	Матовое стекло (при настройке), затем матовое стекло или щель	Окуляр
2	Лампа накаливания	Зеленый, красный, синий	Матовое стекло или щель	Окуляр
3	Ртутная лампа	Зеленый Сине-фиолетовый	Матовое стекло (при настройке), затем матовое стекло или щель	Окуляр
4	Ртутная лампа	Желтый	Матовое стекло или щель	Окуляр
5	Ртутная лампа	Зеленый плюс другой	Матовое стекло	Телескоп
6	Лампа накаливания	Как в упр.2	Матовое стекло или щель	Окуляр