

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА  
(Задания № 4, 5, 6, 7, 8)

КУЙБЫШЕВ 1978

УДК 535.41 (083.96)

Составители:

ст. преп. каф. физики КуАИ *А. Н. Пещенко, Л. А. Башкирцева,*  
ас. каф. *В. П. Кабанова, З. А. Куликова*

Под редакцией доц. *А. И. Федосова*

Утверждена  
на редакционно-издательском совете института 9.01.76 г.

Наблюдения над волнами, излучаемыми двумя источниками и накладывающимися друг на друга, показывают, что каждая из волн не оказывает влияния на распространение другой. В этом заключается принцип суперпозиции или принцип наложения волн. Смещение, которое получает каждая частица среды в любой момент времени при наложении одной волны на другую, может быть определено путем геометрического сложения смещений, вызываемых каждой волной в отдельности.

Монохроматическая волна описывается уравнением

$$x = A \cos \left( \omega t - \frac{2\pi l}{\lambda'} + \varphi_0 \right),$$

где под  $x$  следует понимать любую величину, изменяющуюся по волновому закону;

$\lambda'$  — длина волны в данной среде;

$l$  — расстояние, которое волна проходит от источника до точки наблюдения.

Введем для фазы волны обозначение

$$\omega t - \frac{2\pi l}{\lambda'} + \varphi_0 = \varphi.$$

Тогда получим

$$x = A \cos \varphi.$$

Хотя излагаемая теория интерференции применима к любым волнам, мы в дальнейшем будем рассматривать световые волны. Для них фазу волны можно записать в таком виде

$$\varphi = \omega t - \frac{2\pi n l}{\lambda} + \varphi_0, \quad (1)$$

где  $n$  — показатель преломления среды;

$\lambda$  — длина волны в вакууме; величина  $nl$  называется оптической длиной пути.

Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются переменным электрическим полем. В соответствии с этим мы в дальнейшем будем говорить о световом векторе, подразумевая под ним вектор напряженности электрического поля.

Рассмотрим сложение двух гармонических волн

$$x_1 = A_1 \cos \varphi_1;$$

$$x_2 = A_2 \cos \varphi_2.$$

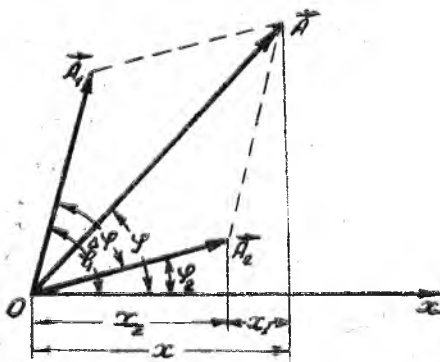


Рис. 1

Сложение волн проведем, используя метод векторных диаграмм. Из точки  $O$  (рис. 1), взятой на оси  $x$ , построим два вектора  $A_1$  и  $A_2$ , которые образуют с осью углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Длины векторов  $A_1$  и  $A_2$  равны соответственно амплитудам слагаемых колебаний. Тогда, как известно, вектор

$$\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2 \quad (2)$$

будет изображать суммарное колебание. Его длина будет амплитудой колебания, а угол  $\varphi$  — фазой.

Возведя равенство (2) в квадрат, получим

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3)$$

Частоты видимых световых волн лежат в интервале

$$\nu = (0,40 - 0,75) \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

Частота изменений вектора плотности потока энергии в волне будет еще больше (она равна  $2\nu$ ). Ни глаз, ни какой-либо иной приемник световой энергии не может уследить за столь частыми изменениями потока энергии, они регистрируют усредненный по времени световой поток. Среднее за период значение плотности светового потока называется интенсивностью света  $I$ . Поскольку интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды, то интенсивность результирующей волны согласно (3) будет равна

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

Практически мы никогда не имеем дела с чистыми гармоническими колебаниями, т. е. колебаниями, длящимися бесконечно долго с неизменной амплитудой, поэтому результирующая интенсивность также меняется с течением времени.

Обозначим минимальный промежуток времени наблюдения  $\tau$ . Это время всегда много больше периода световой волны

$$\tau \gg T.$$

Вычислим среднюю интенсивность результирующей волны за промежуток времени  $\tau$ :

$$I = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} I dt = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt.$$

Если разность фаз  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  остается неизменной в течение времени наблюдения  $\tau$ , то

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt = \cos(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Следовательно,

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

и

$$I \neq I_1 + I_2.$$

При случайном же обрыве и возобновлении колебаний разность фаз беспорядочно меняется, многократно пробегая за время  $\tau$  все значения от 0 до  $2\pi$ . Поэтому,  $\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt$  близко к нулю, а

$$I = I_1 + I_2.$$

Итак, при сложении двух волн надо различать два случая:

1. Разность фаз волн сохраняется неизменной за минимальное время  $\tau$ , достаточное для наблюдений. Такие волны называются когерентными. При наложении когерентных волн интенсивность результирующей волны отличается от суммы интенсивностей накладывающихся волн и может быть больше или меньше ее в зависимости от разности фаз. При этом происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в

других — минимумы интенсивности. Это явление называется интерференцией волн.

Если разность фаз равна четному числу  $\pi$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2k\pi,$$

где  $k$  — любое целое число, то

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (4)$$

В этом случае волны максимально усиливают друг друга (максимум интерференции).

Если же разность фаз равна нечетному числу  $\pi$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (2k-1)\pi,$$

то

$$I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (5)$$

и волны максимально ослабляют друг друга (минимум интерференции). Особенно отчетливо проявляется интерференция в том случае, когда интенсивность обеих интерферирующих волн одинакова, т. е.  $I_1 = I_2$ . Тогда согласно уравнениям (4) и (5) в максимумах  $I = 4I_1$ , в минимумах —  $I = 0$ .

2. Разность фаз волн беспорядочно меняется за время наблюдения (волны некогерентные). В этом случае интенсивность результирующей волны равна сумме интенсивностей накладывающихся волн. Интерференции нет.

Выясним при каких условиях две волны будут когерентны. Согласно (1) разность фаз двух волн равна

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (\omega_1 - \omega_2)t + \frac{2\pi(n_2 l_2 - n_1 l_1)}{\lambda} + \varphi_1^0 - \varphi_2^0. \quad (6)$$

Величина  $\delta = n_2 l_2 - n_1 l_1$

называется оптической разностью хода. Если обе волны распространяются в одной среде, то

$$\delta = n(l_2 - l_1).$$

Для когерентных волн каждое слагаемое в сумме (6) должно быть постоянным. Следовательно, волны когерентны и могут интерферировать, если:

они имеют одинаковую частоту (одинаковый период), т. е.

$$\omega_1 = \omega_2;$$

оптическая разность хода постоянна

$$\delta = \text{const};$$

начальная разность фаз

$$\varphi^0_1 - \varphi^0_2 = \text{const.}$$

На практике естественные источники света излучают поток некогерентных волн. Опыт показывает, что, когда два независимых источника света, например, две лампочки, или даже два различных участка одного и того же светящегося тела посылают световые волны в одну область пространства, то мы не наблюдаем интерференции и констатируем сложение освещенностей. Физическая причина некогерентности волн, испускаемых двумя независимыми источниками, состоит в том, что излучение света происходит вследствие атомных процессов.

В двух самостоятельных источниках света мы будем иметь дело с излучением атомов, не связанных друг с другом. В каждом из таких атомов процесс излучения длится очень короткое время ( $10^{-8}$ ), обрываясь вследствие потери энергии на излучение или вследствие помех и взаимодействия с окружающими атомами.

Даже в наиболее благоприятных случаях, когда мешающее действие окружающих атомов сведено к минимуму (свечение сильно разряженных газов), длительность правильного излучения не превышает  $10^{-8}$  с. После прекращения свечения атом может вновь испускать световые волны, но уже с новой начальной фазой. Поэтому разность фаз между излучениями двух таких независимых атомов будет изменяться в начале всякого нового акта испускания, т. е. через чрезвычайно короткие промежутки времени. Такие источники некогерентны и мгновенные интерференционные картины сменяются настолько быстро и беспорядочно, что мы наблюдаем только среднюю картину, т. е. равномерное распределение освещенности.

Итак, мы видим, что ряд физических процессов, происходящих в источнике света, определяет наименьший интервал времени, в течение которого фазу и амплитуду можно считать постоянными. Этот промежуток называется временем когерентности ( $\tau_{\text{ког}}$ ).

Для обычных источников оно равно по порядку величины  $10^{-9} - 10^{-10}$  с. Расстояние  $L_{\text{ког}} = c \tau_{\text{ког}}$ , на которое распространялась волна за это время называется длиной когерентности. При продолжительности испускания  $\tau \approx 10^{-9}$  с и скорости света  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с эта длина порядка

$$L = c \tau \approx 30 \text{ см.}$$

Теперь можно сформулировать идею эксперимента для наблюдения интерференции световых волн: от одного точечного источника нужно тем или иным способом получить две системы волн, которые затем следует свести вместе в какой-то области пространства.

Если при этом для разности хода выполняется условие  $\delta < \sigma_{\text{ког}}$ , то должна наблюдаться интерференция. Эта идея и лежит в основе различных приборов и устройств, позволяющих наблюдать интерференцию.

В 1818 году Френель практически осуществил этот прием, заставив свет от источника отражаться от двух зеркал, расположенных под углом, близким к  $180^\circ$  (бизеркала Френеля).

Источник  $S$  (рис. 2) испускает свет, отражающийся от обоих

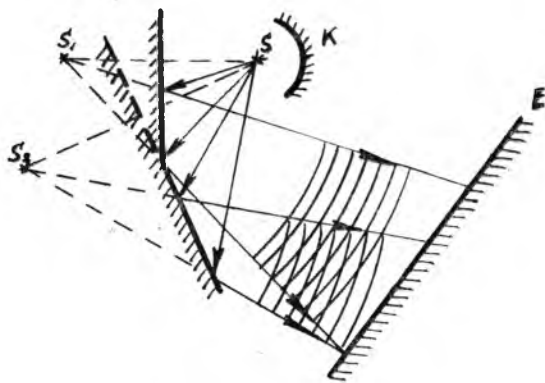


Рис. 2

зеркал и попадающий на экран  $E$ , защищенный от прямого попадания кожухом  $K$ . По законам отражения от плоского зеркала, лучи, отраженные от первого зеркала, как бы исходят из мнимого источника  $S_1$ , расположенного симметрично исходному источнику  $S$ . Аналогично, лучи, отраженные от второго зеркала, можно рассматривать исходящими из мнимого источника  $S_2$ , являющегося изображением источника  $S$  во втором зеркале.

Мнимые источники  $S_1$  и  $S_2$  взаимно когерентны, и исходящие из них пучки лучей пересекаются и интерферируют в области заштрихованной на рис. 2.



Еще раньше Юнг в 1802 году наблюдал интерференцию света и первый установил принцип сложения амплитуд, объяснив явление интерференции. В схеме Юнга (рис. 3) источни-

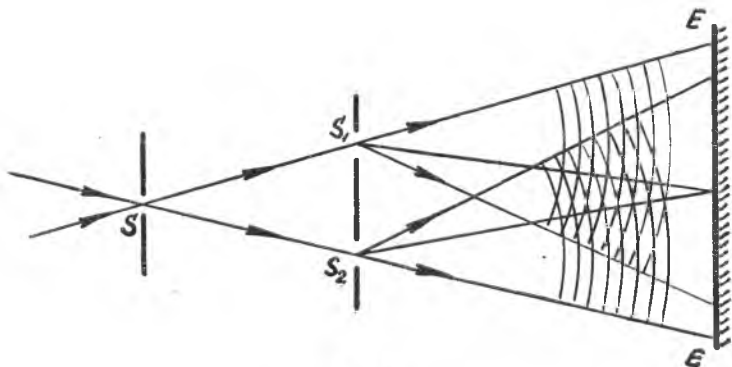


Рис. 3

ком света служит ярко освещенная щель  $S$ , от которой световая волна падает на две узкие щели  $S_1$  и  $S_2$ , освещаемые, таким образом, различными участками фронта одной и той же волны. Свет, проходящий через малые отверстия  $S_1$  и  $S_2$ , уклоняется от первоначального направления (дифракция), таким образом, что обе части этой волны перекрываются и интерферируют.

Вследствие указанных условий получения когерентных световых волн

$$\varphi_1^0 - \varphi_2^0 = 0.$$

Тогда

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi\delta}{\lambda}. \quad (7)$$

Используя условия образования максимумов и минимумов интерференции (4), (5) и выражение (7), получим эти условия в другом виде:  
при

$$\delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

получаются максимумы интерференции (число  $k$  называется порядком максимума);

при  $\delta = (2k-1) \frac{\lambda}{2} = k\lambda - \frac{\lambda}{2}$

— минимумы интерференции.

Рассмотрим интерференцию световых волн от двух точечных когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 4).

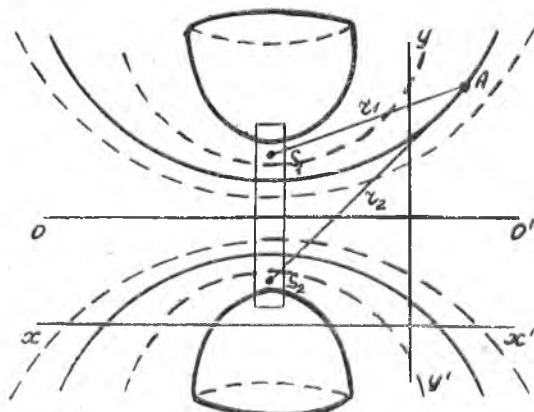


Рис. 4

Пусть наблюдение производится в точке  $A$ , находящейся на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$  от источников  $S_1$  и  $S_2$ . Если начальные фазы источников одинаковы, то при

$$n(r_2 - r_1) = k\lambda$$

колебания окажутся в совпадающих фазах и интенсивность света достигает максимума.

При

$$n(r_2 - r_1) = \left(k - \frac{1}{2}\right)\lambda$$

колебания окажутся в противоположных фазах и результирующая интенсивность будет минимальна. Таким образом, геометрическое место точек пространства, характеризующихся одинаковыми интенсивностями, удовлетворяет условию

$$r_2 - r_1 = \frac{k\lambda}{n} = \text{const}$$

или.

$$r_2 - r_1 = \frac{\left(k - \frac{1}{2}\right)\lambda}{n} = \text{const}.$$

Эти уравнения представляют собой уравнения поверхностей гиперboloидов вращения с осью  $S_1S_2$ , фокусами которых служат точки  $S_1$  и  $S_2$ .

На рис. 4 сплошными линиями изображены поверхности, отвечающие максимумам интенсивности, а пунктирными — минимумам интенсивности.

При пересечении поверхности гиперboloида плоскостью перпендикулярной оси вращения (плоскость  $xx'$ ) в сечении получаются интерференционные полосы в виде окружностей;

при пересечении же гиперboloида плоскостью параллельной оси вращения (плоскость  $yy'$ ) — гиперболы.

Вблизи средней плоскости, изображенной на чертеже линией  $OO$ , небольшие отрезки гипербол можно приближенно считать прямыми линиями.

Произведем расчет для разности хода лучей в произвольной точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $x$  от центральной линии экрана  $AA$  (рис. 5).

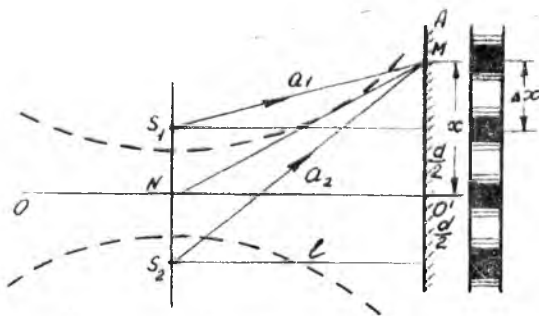


рис. 5

Экран располагается на расстоянии  $l$  от источников, много большем их взаимного расстояния  $a$ .

Из рис. 5 получим:

$$a_2^2 = l^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2;$$

$$a_1^2 = l^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2;$$

вычитая почленно, будем иметь:

$$(a_2 - a_1)(a_2 + a_1) = 2ax.$$

Если  $l \gg a$  и  $l \gg x$ , то  $a_2 + a_1 \approx 2l$ , и оптическая разность хода будет равна

$$\delta \approx n(a_2 - a_1) = x \frac{an}{l}. \quad (8)$$

Для тех мест на экране, где разность хода равна целому числу волн или четному числу полуволен

$$\delta_{max} = k\lambda \quad (9)$$

колебания, приходящие от обоих источников, складываются, амплитуда удваивается, а интенсивность возрастает в четыре раза.

Там, где разность хода равна нечетному числу полуволен

$$\delta_{min} = (2k-1) \frac{\lambda}{2},$$

волны от обоих источников приходят в противоположной фазе и полностью гасят друг друга. В результате на экране будет наблюдаться система чередующихся светлых и темных полос с постепенными переходами, как это показано на рис. 3. Из формул (8) и (9) находим положения последовательных максимумов

$$x_k^{свет} = k\lambda \frac{l}{an}$$

и минимумов

$$x_k^{тем} = \left(k - \frac{1}{2}\right) \lambda \frac{l}{an}.$$

Картина будет представлять собой чередование резких черных полос, разделенных более светлыми промежутками, только в том случае, когда мы имеем дело с монохроматическим светом ( $\lambda$  имеет вполне определенное значение). Если же источник посылает белый свет, то интерференционная картина представит собой чередование цветных полос.

Расстояние между соседними максимумами или минимумами равно

$$\Delta x^{свет} = \Delta x^{тем} = x_{k+1} - x_k = (k+1) \lambda \frac{l}{an} - k \lambda \frac{l}{an} = \lambda \frac{l}{an}.$$

Это расстояние остается неизменным вдоль экрана. Поскольку длина световых волн очень мала, то для наблюдения картины интерференции необходимо, чтобы  $\Delta x \gg \lambda$ , а для этого расстояние между источниками должно быть малым

$$a \ll l.$$

Так, например, при  $\frac{l}{an} = 10^4$  и  $\lambda = 0,5$  мкм расстояние между максимумами на экране достигает  $\Delta x = 5$  мм и картина интерференции хорошо различима.

## Задание № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, диафрагма со щелью, набор светофильтров, бипризма, микроскоп, собирающая линза, источник света.

#### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

В данной работе для измерения длины световой волны используется бипризма Френеля. Она состоит из двух одинаковых призм с малыми преломляющими углами, имеющих общее основание (рис. 6).

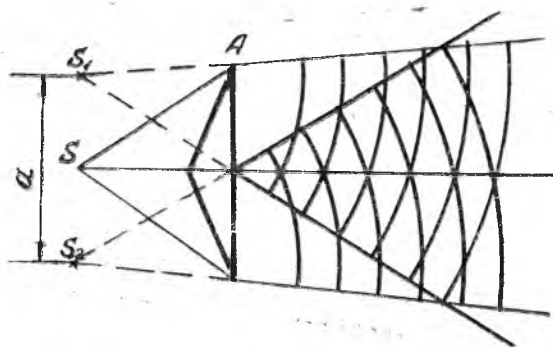


Рис. 6

Параллельно этому основанию помещается узкая щель  $S$ , служащая источником света. Падающий от щели пучок света после преломления в бипризме делится на два перекрывающихся пучка, как бы исходящих из двух мнимых изображений щели  $S_1$  и  $S_2$ . Так как источники  $S_1$  и  $S_2$  когерентны, то на экране наблюдается интерференционная картина.

Расстояние между соседними светлыми или темными полосами этой интерференционной картины определяется по формуле  $\Delta x = \frac{\lambda l}{an}$ . Учитывая, что показатель преломления воздуха  $n \approx 1$ , получим

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{a} .$$

Отсюда длина волны

$$\lambda = \frac{ax}{lk} , \quad (10)$$

где  $x$  — расстояние между  $k$  светлыми или темными полосами.

Для проведения измерений на оптической скамье устанавливают осветитель  $O$ , экран со щелью  $1$ , бипризму  $2$ , светофильтр  $3$ , микроскоп  $4$ , в который наблюдают интерференционную картину (рис. 7).

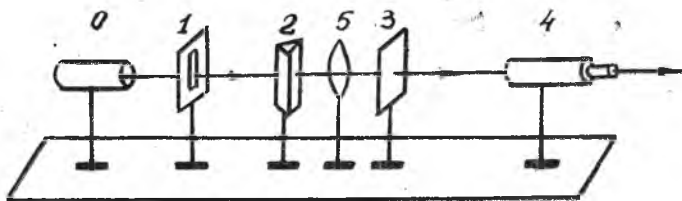


Рис. 7

Так как расстояние между щелью  $S$  и микроскопом велико по сравнению с расстоянием между изображениями щели  $S_1$  и  $S_2$ , то можно считать, что точки  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S$  лежат в одной плоскости, перпендикулярной оптической оси. Чтобы определить расстояние  $a$  между мнимыми источниками  $S_1$  и  $S_2$ , на оптическую скамью между бипризмой и светофильтром помещают собирающую линзу  $5$ , которая дает два действительных изображения щели  $S$  (рис. 8) в плоскости светофильтра.

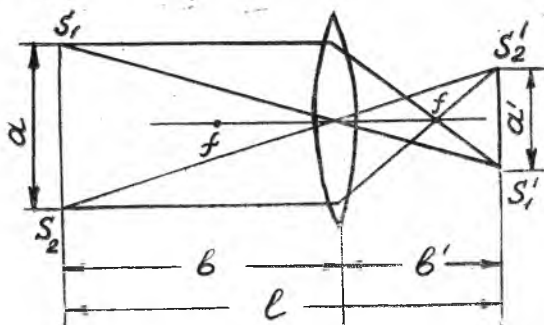


Рис. 8

Из рис. 8 видно, что

$$\frac{a}{a'} = \frac{b}{b'}, \text{ т. е. } a = \frac{a' b}{b'}$$

Подставляя полученное значение  $a$  в уравнение (10), получаем

$$\lambda = \frac{a' b x}{b' l k} \quad (11)$$

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверить правильность расположения приборов на оптической скамье (см. рис. 7).

2. Определить положение плоскости рассматриваемого объекта интерференционной картины. Для этого установить длину тубуса микроскопа 130 мм, при этом цена деления шкалы должна быть равна 0,058 мм. Затем перемещением глазной линзы окуляра добиться резкого изображения его шкалы. Перемещая светофильтр относительно микроскопа, получить отчетливое изображение букв на оправе светофильтра. В этом положении закрепить держатель светофильтра. Плоскость светофильтра и будет плоскостью рассматриваемого объекта.

3. Включить осветитель и, передвигая линзу  $B$ , добиться того, чтобы изображения щели  $S_1$  и  $S_2$  были отчетливо видны в микроскоп. Затем по делениям шкалы микроскопа измерить расстояние  $a'$  между этими изображениями.

4. Измерить расстояния  $b$  и  $b'$  (см. рис. 8).

5. Снять линзу со скамьи. В микроскоп будут видны темные и светлые полосы на фоне делений изображения окулярной шкалы. Измерить расстояние  $x$  между двумя достаточно удаленными друг от друга темными или светлыми полосами, подсчитав одновременно число полос  $K$ .

6. По формуле (11) вычислить длину световой волны. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Таблица

№ измерения	Фильтр	$C$ — цена деления шкалы окуляра микроскопа	$a'$	$b$	$b'$	$l$	$x$	$k$	

7. Заменить красный светофильтр зеленым и определить длину световой волны для зеленых лучей.

8. Рассчитать относительную приборную погрешность измерения. Погрешности измерения величин  $b$ ,  $b'$  и  $l$  малы по сравнению с погрешностями величин  $a'$  и  $x$ . Поэтому относительную погрешность измерения  $\lambda$  можно определить по формуле:

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_{a'}^2},$$

где  $\epsilon_x = \frac{c}{x}$  — относительная приборная погрешность измерения  $x$ ;

$\epsilon_{a'} = \frac{c}{a'}$  — относительная приборная погрешность измерения  $a'$ .



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление интерференции?
2. Какие источники волн называются когерентными?
3. Почему тупой угол бипризмы Френеля должен быть близким к  $180^\circ$ ?
4. Какой вид будет иметь интерференционная картина, если убрать светофильтр?
5. Как изменится расстояние между интерференционными полосами при замене зеленого светофильтра на красный?
6. Почему обычно не наблюдается интерференция от двух независимых источников света?
7. От каких независимых источников можно получить интерференционную картину?
8. Для чего в данной работе используется линза 5?

## ЛИТЕРАТУРА

- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики, т. 3. М., «Наука», § 10, 11.  
Савельев И. В. Курс общей физики, т. 3. М., «Наука», 1968, § 16—18.

## Задание № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Приборы и принадлежности: микроскоп, устройство для наблюдения колец Ньютона, осветитель.

#### ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

Частный случай интерференции в тонких пленках — кольца Ньютона. Они наблюдаются в том случае, когда выпуклая поверхность линзы малой кривизны соприкасается с плоской поверхностью хорошо отполированной пластинки, так что оставшаяся между ними прослойка постепенно утолщается от центра к краям.

Если на линзу падает монохроматический свет, то световые волны, отраженные от верхней и нижней границ этой прослойки, будут интерферировать между собой.

При наблюдении в отраженном свете видна система концентрических светлых и темных колец убывающей ширины, в центре которой находится темное пятно. В проходящем свете получается обратная картина: в центре светлое пятно, а затем чередующие темные и светлые кольца. Оптическая разность хода лучей 1 и 2 (рис. 9)  $\delta = (AC + CB)n + \frac{\lambda}{2}$ , где  $n$  — показатель преломления среды между линзой и пластинкой, слагаемое  $\lambda/2$  учитывает потерю полволны при отражении 2 луча в точке  $C$  от оптически более плотной среды.

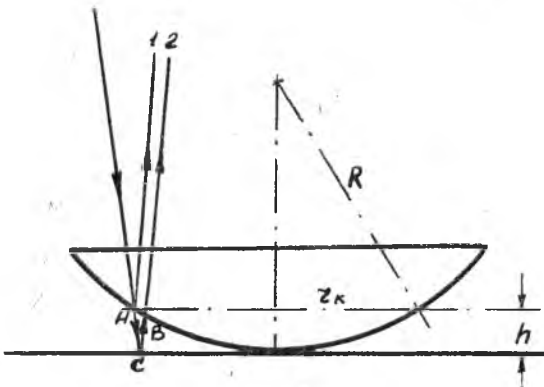


Рис. 9

Ввиду того, что толщина прослойки  $h$  очень мала,  $AC \approx CB \approx h$  и

$$\delta = 2hn + \frac{\lambda}{2}. \quad (12)$$

Из рис. 9 видно, что  $(R-h)^2 = R^2 - r_k^2$

$$\text{или } R^2 - 2Rh + h^2 = R^2 - r_k^2,$$

где  $r_k$  — радиус кольца Ньютона.

Так как  $h \ll R$ , величиной  $h^2$  можно пренебречь, тогда

$$2Rh = r_k^2, \text{ отсюда } h = \frac{r_k^2}{2R}.$$

Подставив это значение  $h$  в формулу (12), получим

$$\delta = \frac{r_k^2}{R} n + \frac{\lambda}{2}.$$

Для светлых колец в отраженном свете  $\delta = k\lambda$  и  $\frac{r_k^2}{R}n + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$ . Отсюда радиусы светлых колец Ньютона определяются формулой  $r_k = \sqrt{(2k-1)\frac{R\lambda}{2n}}$ , где  $k=1, 2, 3, 4, \dots$

Если прослойка воздушная, то  $n=1$  и

$$r_k = \sqrt{(2k-1)R\frac{\lambda}{2}}. \quad (13)$$

Для темных колец в отраженном свете  $\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$  и

$$\frac{r_k^2}{R}n + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}.$$

Отсюда радиусы темных колец Ньютона определяются формулой

$$r_k = \sqrt{kR\frac{\lambda}{n}}, \text{ где } k=0, 1, 2, \dots$$

Если прослойка воздушна, то

$$r_k = \sqrt{kR\lambda}. \quad (14)$$

Пользуясь одним из выражений (13) или (14) можно определить длину световой волны. Однако вследствие упругой деформации стекла и присутствия пылинок невозможно добиться идеального соприкосновения сферической линзы и плоской пластинки в одной точке. Более точный результат получится, если вычислить  $\lambda$  по разности радиусов двух темных или двух светлых колец  $r_m$  и  $r_n$ .

Окончательная формула будет иметь следующий вид.

$$\lambda = \frac{r_n^2 - r_m^2}{R(n-m)}$$

или через диаметры колец  $d_m$  и  $d_n$

$$\lambda = \frac{d_n^2 - d_m^2}{4R(n-m)}. \quad (15)$$

где  $n$  и  $m$  — номера колец.

Для уменьшения погрешности измерения длины волны  $\lambda$ , рекомендуется при расчете брать кольца, отличающиеся по номеру на большую величину.

## ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Установка, предлагаемая в данной работе, состоит из следующих частей:

Устройство для получения колец Ньютона (стеклянная плоскопараллельная пластинка и длиннофокусная линза, для удобства заключенные в оправу).

В центре соприкосновения линзы и стеклянной пластинки получаются кольца Ньютона. Если смотреть невооруженным глазом, то система колец представляется в виде небольшого пятнышка.

Подставка для удобного расположения линзы с пластинкой.

Микроскоп с окулярной шкалой для измерения диаметров колец Ньютона.

В оправе окуляра микроскопа помещен красный светофильтр.

Цена наименьшего деления микроскопа 0,018 мм.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Положить на подставку устройство для получения колец Ньютона. Осторожно передвигая микроскоп относительно подставки, добиться, чтобы кольца оказались в центре поля зрения микроскопа, т. е., чтобы точка пересечения нитей окуляра попала в центр колец.

2. Измерить по порядку, начиная от центра, диаметры всех темных колец (темные кольца тоньше, чем светлые, поэтому результаты будут точнее).

Диаметры находят как разность отсчетов от нуля шкалы до точек пересечения середины полоски, образующей кольцо,

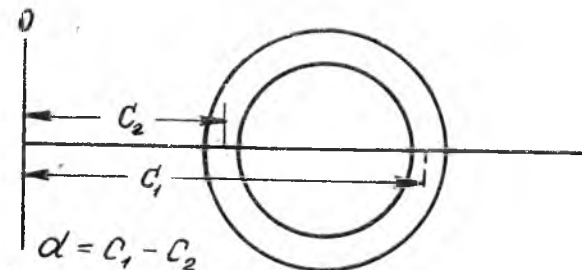


Рис. 10

с линией, вдоль которой нанесены деления шкалы (рис. 10).

3. Повернуть окулярную шкалу на  $90^\circ$  и снова измерить диаметр. Значение диаметра каждого кольца брать как среднее значение из 2-х отсчетов.

4. По полученным данным вычислить длину волны по формуле (15).

Значение  $R$  — радиуса кривизны линзы смотри на установке. При вычислении не рекомендуется брать соседние кольца.

5. Все результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Таблица

№ кольца	Первое положение окулярной шкалы		Второе положение окулярной шкалы		Диаметр в делениях шкалы			$\lambda$ мм	$\Delta\lambda$ мм
	Отчет по		Отчет по		$d' = c'_1 - c'_2$	$d'' = c''_1 - c''_2$	$d = \frac{d' + d''}{2}$		
	правому краю кольца $C'_1$	левому краю кольца $C'_2$	правому краю кольца $C''_1$	левому краю кольца $C''_2$					
1									
2									
3									
4									
5									
6									
Среднее значение длины волны $\bar{\lambda}$									X

6. Вычислить среднюю квадратичную погрешность результата среднего арифметического

$$S_{\bar{\lambda}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\Delta\lambda_k)^2}{n(n-1)}}$$

7. Оценить абсолютную погрешность результата серии измерений  $\Delta\lambda = t_{\alpha,n} S_{\bar{\lambda}}$ ,

где  $t_{\alpha,n}$  — коэффициент Стьюдента, зависящий от числа

произведенных измерений  $n$  и от величины надежности  $\alpha$ . Рекомендуется значение  $\alpha$  брать в интервале от 0,9 до 0,98.

8. Окончательный результат записать в виде

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda, \quad \varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} 100\%.$$

Погрешности, обусловленные погрешностями приборов, можно не учитывать, так как в данной работе они меньше случайных.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление интерференции света?
2. Объясните возникновение интерференционных колец Ньютона?
3. Какой круг будет в центре интерференционной картины, если наблюдение проводить в отраженном свете.
4. При наблюдении в отраженном свете центральный круг оказался светлым. Почему? Как устранить центральный светлый круг?
5. В чем состоит условие минимума и максимума света при интерференции когерентных лучей?
6. Где плотнее располагаются кольца — в центре или на периферии? Почему?
7. Что произойдет с интерференционной картиной при увеличении расстояния между линзой и пластинкой?
8. Почему радиус кривизны линзы должен быть велик?
9. Почему при работе с кольцами Ньютона, лучше применить светофильтр?
10. Радиусы каких колец нужно измерять, чтобы погрешности были минимальными?

## ЛИТЕРАТУРА

- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики, т. 3. М., Физматгиз, 1961, § 11.
- Савельев И. В. Курс общей физики, т. 3. М., «Наука», 1968, § 19.
- Яворский Б. М., Детлаф Л. А. Курс общей физики, т. 3. М., «Высшая школа», 1967, § 5, 3.

## Задание № 6

### ИЗУЧЕНИЕ ЧИСТОТЫ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА

Приборы и принадлежности: микроинтерферометр МИИ-4, исследуемый образец.

#### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

При выполнении работы использовался микроинтерферометр МИИ-4, разработанный академиком В. П. Линником.

Принцип действия микроинтерферометра основан на использовании явления интерференции света для визуальной оценки и измерения высоты неровностей тонкообрабатываемых поверхностей, а также фотографирования обнаруженных дефектов обработки.

Оптическая схема микроинтерферометра МИИ-4 изображена на рис. 11. Пучок света от источника  $S$  падает на полупрозрачную стеклянную пластинку  $P$  и разделяется ею на два пучка, один из которых сразу попадает на исследуемую поверхность  $\Pi$ , а второй — на гладкое эталонное зеркало  $Z_1$ . После отражения эти лучи вновь соединяются на пластинке  $P$  и выходят из интерферометра в вертикальном направлении. Для удобства наблюдения направление интерферирующих лучей изменяется зеркалом  $Z_2$ .

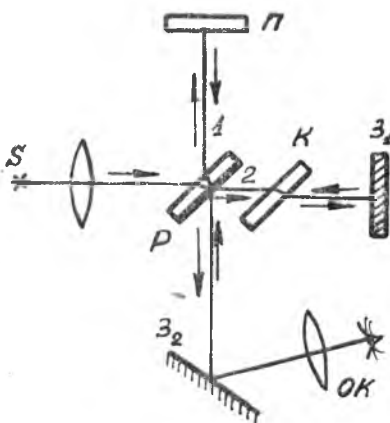


Рис. 11

Интерференционная картина рассматривается в поле зрения окуляра  $OK$ . Луч 1 проходит пластинку  $P$  дважды (вверх и вниз). Для того, чтобы устранить возникающую при этом дополнительную разность хода, на пути горизонтального луча 2 устанавливается стеклянная пластинка  $K$  параллельно  $P$  и такой же толщины. Следует учесть, что на рис. 11 показан

только ход центральных лучей от источника. Разность хода интерферирующих лучей обусловлена разностью плечей интерферометра и наклоном поверхностей П и З<sub>1</sub>.

В точках поля наблюдения, где оптическая разность хода пучков равна  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  и т. д., получаются светлые полосы, а в точках, где разность хода равна  $\lambda/2$ ,  $3\lambda/2$ ,  $5\lambda/2$  и т. д. — темные полосы.

Интерференционная картина в белом свете имеет следующий вид: в центре поля — белая ахроматическая полоса, по обеим сторонам от нее — две черные полосы с цветными каемками и дальше — по три или четыре цветные полосы с каждой стороны. Переход от одной светлой (или темной) полосы к другой светлой (или темной) полосе соответствует изменению разности хода лучей на одну длину волны  $\lambda$ .

В приборе имеются два светофильтра (зеленый и желтый), с помощью которых получается монохроматический свет. При работе в монохроматическом свете в поле зрения должны быть видны чередующиеся черные и светлые (зеленые или желтые) полосы.

Перемещение исследуемой поверхности П вверх или вниз на какую-либо малую величину вызывает изменение разности хода лучей на удвоенную величину, так как свет проходит расстояние до П дважды.

Например, при смещении поверхности П на величину, равную  $\lambda/2$ , полосы в поле зрения сместятся на один интервал между ними, что соответствует изменению разности хода на  $\lambda$ .

Аналогичная картина будет и в том случае, когда сама поверхность П остается на месте, но на ней есть дефекты обработки — бугры или впадины.

Если, например, на ней имеется царапина, глубиной  $\lambda/2$ , то возникает добавочная разность хода, равная  $\lambda$ , и интерференционная полоса искривится так, что достигает полосы следующего порядка (рис. 12).

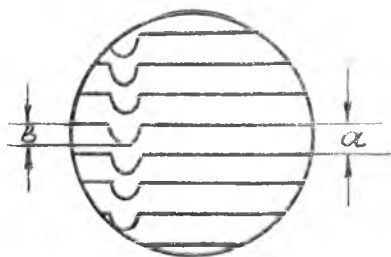


Рис. 12

Аналогично искривятся все интерференционные полосы, перпендикулярные царапине.

При оценке искривления полосы величину искривления  $b$  выражают в долях  $a$  между полосами. Другими словами, величину искривления  $n$  находят как отношение глубины искривления



полос  $b$  к расстоянию между ними  $a$ :  $n = \frac{b}{a}$ ; искомая глубина царапины определится из соотношений:

$$d = n \frac{\lambda}{2}; \quad d = \frac{b}{a} \frac{\lambda}{2}. \quad (16)$$

Выражение (16) справедливо и для дробных значений  $n$ .

Все измерения, производимые на интерферометре МИИ-4, очень точны. Точность измерения величины искривления составляет 0,1 интервала между полосами, что соответствует высоте неровности, равной

$$\frac{\lambda}{2} \cdot 0,1 = 0,05 \lambda.$$

Например, при  $\lambda = 0,53$  мкм наименьшая высота неровности, которую можно измерить на приборе, составляет:

$$0,05 \cdot 0,53 \text{ мкм} = 0,0265 \text{ мкм}.$$

Итак, приближенно 0,027 мкм соответствует 0,1 интервала между полосами.

В данной работе предлагается изучить с помощью микроинтерферометра МИИ-4 поверхность тонкообработанного образца в белом и монохроматическом свете, отыскать дефектные участки поверхности и измерить высоту или глубину неровностей.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить осветитель 1 (рис. 13) и положить на предметный столик 2 интерферометра образец исследуемой поверхностью вниз.

2. Повернуть рукоятку 3 так, чтобы указатель (стрелка) стоял вертикально, и вращением микрометрического винта 4 добиться резкого изображения исследуемой поверхности.

3. Повернуть рукоятку 3 так, чтобы указатель стоял горизонтально. В этом случае включается эталонное зеркало и при наблюдении в окуляр будут одновременно видны исследуемая поверхность и интерференционные полосы. Вращением винта 4 добиться четкой фокусировки картины полос и поверхности образца.

4. Вращая столик 2, установить образец так, чтобы следы обработки поверхности (царапины) оказались перпендикулярными интерференционным полосам.

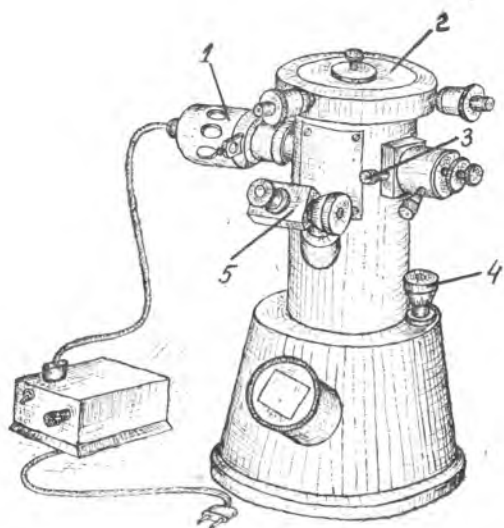


Рис. 13

5. Установить окулярный микрометр 5 на тубусе микроскопа до упора и развернуть его так, чтобы одна из линий перекрестия была направлена вдоль интерференционных полос.

6. Ввести в ход лучей светофильтр и измерить ширину интерференционной полосы. Для этого совместить нить перекрестия последовательно с полосами, находящимися на одном и другом краю интерференционной картины. Разделив разность полученных отсчетов на число полос  $m$  между ними, найти ширину  $a$  одной полосы:

$$a = \frac{N_1 - N_2}{m} .$$

Все измерения следует произвести как в белом так и в монохроматическом свете.

7. Измерить глубину искривления полос

$$b = N_3 - N_4 .$$

8. Определить глубину царапины на поверхности образца по формулам

$$d = \frac{\lambda}{2} \frac{m(N_3 - N_4)}{N_1 - N_2} \text{ — для монохроматического света. и}$$

$$d = 0,27 \frac{m(N_3 - N_4)}{N_1 - N_2} \text{ --- для белого света}$$

(для белого света принимают  $\lambda = 0,55$  мкм).

При работе со светофильтрами используйте следующие длины волн:

$$\begin{aligned} \lambda \text{ зелен.} &= 0,543 \text{ мкм;} \\ \lambda \text{ желт.} &= 0,590 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

Все результаты измерений записать в таблицу.

Таблица

№ опыта	Фильтр	$N_1$	$N_2$	$m$	$N_3$	$N_4$	$d$
1.	зеленый						
2.	желтый						
3.	белый						

9. Найти среднее значение глубины царапины  $\bar{d}$ .

10. Оценить погрешность полученного значения глубины царапины  $d$ .

Оценку погрешности произвести следующим образом:

а) вычислить относительную погрешность измерения глубины царапины  $d$  по формуле

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{\bar{d}} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{2 \Delta N}{N_3 - N_4} + \frac{2 \Delta N}{N_1 - N_2} .$$

где  $\Delta \lambda$  — величина погрешности, с которой взято значение  $\lambda$  (эта погрешность составляет  $\pm 0,5$  последней значащей цифры);

$\Delta N$  — абсолютная погрешность при отсчете значений  $N_i$ ;

$N_1, N_2, N_3, N_4$  — результаты одного опыта;

б) оценить доверительные границы погрешности результата измерения

$$\Delta d = \varepsilon_d \bar{d} ;$$

в) окончательный результат записать в виде

$$d = \bar{d} \pm \Delta d .$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление интерференции света?
2. Какие источники называются когерентными?
3. Какие способы получения когерентных лучей применяются в оптических системах?
4. Сформулируйте условия минимума и максимума интерференции.
5. Начертите оптическую схему интерферометра МИИ-4 и объясните принцип его действия.
6. Какова роль пластинки К (см. рис. 11)?
7. На сколько изменится разность хода лучей при переходе от одной светлой (или темной) полосы к другой светлой (или темной) полосе?
8. На исследуемой поверхности имеется царапина глубиной  $\frac{\lambda}{2}$ . На сколько сместится интерференционная полоса в этом месте?
9. При каком светофильтре красном или зеленом расстояние между интерференционными полосами будет больше?
10. По какой формуле определяется глубина царапины?

## ЛИТЕРАТУРА

Ландсберг Г. С. Оптика. М., Гостехиздат, 1957, гл. VII.  
Савельев И. В. Курс общей физики. М., «Наука», 1968, гл. III.

## Задание № 7

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ОТ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА РЭЛЕЯ

Приборы и принадлежности: лабораторный интерферометр ИТР-1, насос, манометр, колба.

#### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Интерферометр ИТР-1 является универсальным лабораторным прибором, предназначенным для точного определения коэффициентов преломления прозрачных сред (жидкостей, газов) и для изучения зависимости этих коэффициентов от концентрации, давления и других характеристик исследуемой среды.

Оптическая схема прибора приведена на рис. 14.

Параллельный пучок света от источника  $S$  разделяется диафрагмой  $D$  на два когерентных пучка, проходящих через две кюветы одинаковой длины  $l$ . Одна кювета наполняется

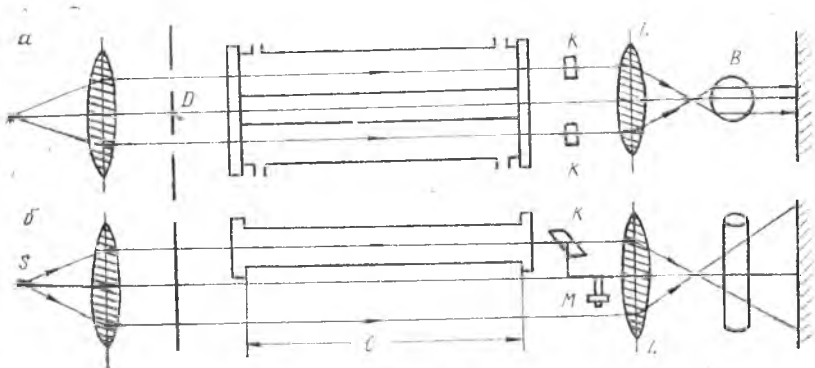


Рис. 14

эталонным, а другая — испытуемым газом. Вследствие различия показателей преломления испытуемого и эталонного газов, появляется дополнительная оптическая разность хода между лучами, прошедшими через разные отверстия диафрагмы  $D$ . Это приводит к смещению наблюдаемой в окуляре интерференционной картины. Измеряя величину смещения интерференционных полос, определяют разность показателей преломления газов. Оптическая разность хода в этом случае равна

$$\delta = n_1 l - nl = l(n_1 - n),$$

где  $n$  — показатель преломления эталонного:

$n_1$  — испытуемого газа.

Исследуемые газы вводятся в кюветы, которые занимают только верхнюю часть пространства перед объективом. Нижние пучки лучей проходят под кюветами и образуют нижнюю неподвижную систему интерференционных полос, верхние — проходят через газовые кюветы (двухкамерные) и образуют верхнюю подвижную систему полос.

Интерференционная картина в виде вертикальных полос наблюдается после преломления пучков в вертикальной цилиндрической линзе  $B$ .

При значительной разности показателей преломления газов, верхняя система полос уйдет из поля зрения окуляра и на ее месте будет видна светлая полоса  $I$  (см. рис. 15).

В том случае, когда в обеих камерах кюветы разность хода равна нулю, верхняя интерференционная система полос совпадает с нижней — неподвижной III (см. рис. 15).

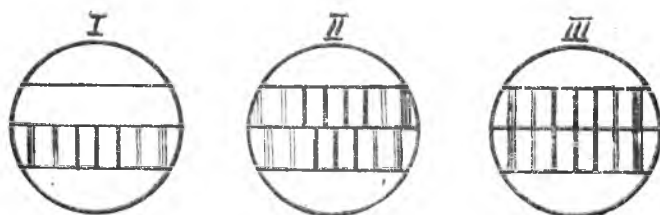


Рис. 15

При наличии разности хода в камерах кюветы — верхняя система полос будет сдвинута относительно нижней на некоторую величину, зависящую от разностей показателей преломления сравниваемых газов II (см. рис. 15).

Таким образом, в интерферометре нижняя система полос является, как бы индексом, по которому производится отсчет. На пути верхних пучков лучей установлены две одинаковые плоскопараллельные стеклянные пластинки К, одна из которых может поворачиваться вокруг горизонтальной оси с помощью микрометричного механизма М. Меняя угол поворота можно компенсировать ту разность хода, которая создается в камерах кюветы.

Микрометричный механизм имеет две шкалы, из которых одна неподвижная имеет 30 делений, а вторая — вращающаяся — 100 делений. Смещение интерференционной картины на ширину одной полосы, т. е. на расстояние между соседними максимумами (или минимумами), соответствует изменению разности хода лучей на одну длину волны. Поэтому, измерив величину смещения  $\eta$  в долях ширины полосы, по формуле

$$l \Delta n = \eta \lambda$$

легко найти изменение показателя преломления вещества.

Так как освещение производится белым светом, то расчет ведется для средней длины волны видимого спектра ( $\lambda = 0,55$  мкм). Прибор ИТР-1 позволяет измерять малые разности показателей преломления жидкостей и газов с точностью до  $10^{-8}$ .

Насосная система служит для создания определенных давлений газа в одной из кювет интерферометра. Ее схема пред-

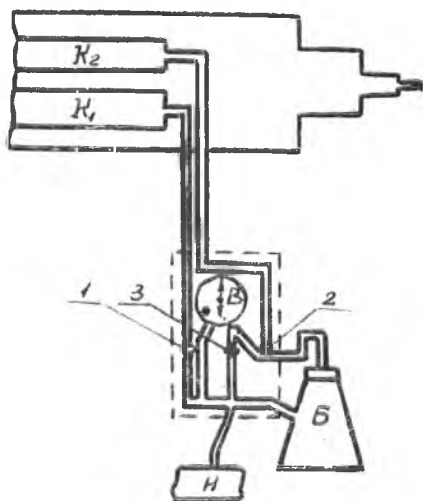


Рис. 16

ставлена на рис. 16: Н — насос; 1, 2, 3 — краны; В — манометр и Б — баллон (цена одного наименьшего деления манометра 1 мм рт. ст.).

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе необходимо исследовать зависимость показателя преломления воздуха от давления.

1. Определить нулевое положение шкалы интерферометра  $N_0$ . При этом все краны насосной системы (см. рис. 16) должны быть открыты, а резиновый шланг от насоса отключен.

Подключить интерферометр к внешней сети, убедиться, что в поле зрения окуляра прибора появились верхняя и нижняя системы интерференционных полос. Отрегулировать накал лампочки осветителя так, чтобы яркость интерференционной картины была наиболее удобной для наблюдения. Вращением микрометричного механизма М (см. рис. 14) добиться совмещения обеих интерференционных картин по центральной темной полосе (эта полоса не имеет цветных каемок). Совмещение произвести несколько раз и вычислить среднее значение нулевого положения шкалы  $N_0$ .

2. Определить разность хода лучей при повышении (выше атмосферного) давления воздуха в кювете  $K_1$  (см. рис. 16). При этом в кювете  $K_2$  поддерживается атмосферное давление и кран 2 должен быть закрыт во время опыта. Для более плавного изменения давления в кювете  $K_1$ , она соединяется с насосом Н через баллон Б. Давление повышают до 60 мм рт. ст., производя через каждые 10 мм рт. ст. с помощью микрометра совмещение верхней и нижней системы интерференционных полос. Значения избыточных давлений  $\Delta p$  и соответствующие им показания микрометричного механизма  $N_i$  записать в таблицу.

Т а б л и ц а

Измерения при давлениях выше атмосферного					Измерения при давлениях ниже атмосферного					
$N_0$	$\Delta p$	$N_i$	$N_i - N_0$	$\Delta n \cdot 10^6$	$N_0$	$\Delta p$	$N_i$	$N_i - N_0$	$\Delta n \cdot 10^6$	$\frac{\Delta(\Delta n)}{\Delta p}$

3. Определить разность хода лучей при понижении давления (ниже атмосферного) воздуха в кювете  $K_2$  (см. рис. 16).

Прежде чем производить измерения, необходимо снова проверить положение нулевого отсчета прибора (см. п. 1).

Компенсационный механизм К (см. рис. 14) в интерферометре устроен так, что позволяет компенсировать разность хода, когда в одной из кювет будет постоянно повышенное давление относительно другой кюветы. Поэтому теперь в кювете  $K_1$  поддерживают атмосферное давление, а откачку воздуха производят из кюветы  $K_2$  и кран 1 должен быть закрыт во время всего опыта. С помощью насоса понижают давление до 60 мм рт. ст. И через 10 мм рт. ст. проводят измерения аналогично описанным выше. Полученные результаты записать в таблицу.

4. Вычислить разности показателей преломления воздуха при заданном и атмосферном давлениях по формуле

$$\Delta n = \frac{\delta}{l} .$$



Значения  $\delta$  вычисляются по показаниям микрометра с учетом того что перемещение подвижной шкалы на одно деление соответствует изменению разности хода на  $1/30$  длины волны, т. е.

$$\delta = \frac{\lambda}{30}(N_i - N_0),$$

где  $N_i$  и  $N_0$  выражены в мелких делениях микрометра. Таким образом расчетная формула принимает вид

$$\Delta n = \frac{\lambda(N_i - N_0)}{30l}.$$

5. Полученные результаты занести в таблицу.

6. Вычислить приборную погрешность по формуле

$$\frac{\Delta(\Delta n)}{\Delta n} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta(\Delta N)}{\Delta N} + \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{2 \Delta N}{N_i - N_0} + \frac{\Delta l}{l},$$

где  $l = 1000$  мм;  $\lambda = 0,55$  мкм;  $\Delta \lambda = 0,005$  мкм;  $\Delta N = 2$  дел.

7. Построить график зависимости  $\Delta n$  от  $\Delta p$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Начертить оптическую схему интерферометра Рэлея и объяснить принцип его действия.

2. Почему темные полосы, наблюдаемые в интерферометре, имеют цветные каемки?

3. В чем заключается явление интерференции света?

4. Какие колебания называются когерентными? Их характерная особенность.

5. Запишите условие главных максимумов при интерференции света от двух когерентных источников.

6. При наложении каких лучей получается подвижная часть интерференционной картины, наблюдаемая в интерферометре Рэлея?

7. Точность совмещения полос в данном приборе равна около  $1/30$  ширины полосы. Какова при этом погрешность в определении разности показателей преломления газа в кюветках?

8. Как вычисляется разность фаз двух интерферирующих колебаний, проходящих через среды с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ ?

### ЛИТЕРАТУРА

- Калитеевский В. Г. Волновая оптика. М., «Наука», 1971, § 4.1—4.8.  
 Ландсберг Г. С. Оптика. М., Гостехиздат, 1954, § 11—13.  
 Савельев И. В. Курс общей физики. т. 3. М., «Наука», 1971, § 16, 17; г. 1, § 69.

## Задание № 8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА РЭЛЕЯ

Приборы и принадлежности: лабораторный интерферометр ИТР-2, исследуемые растворы спирта в воде различной концентрации.

#### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Интерферометр ИТР-2 является универсальным лабораторным прибором, предназначенным для точного определения коэффициентов преломления прозрачных сред (жидкостей, газов) и для изучения зависимости этих коэффициентов от концентрации.

Оптическая схема прибора изображена на рис. 17 (вид сверху) и на рис. 18 (вид сбоку).

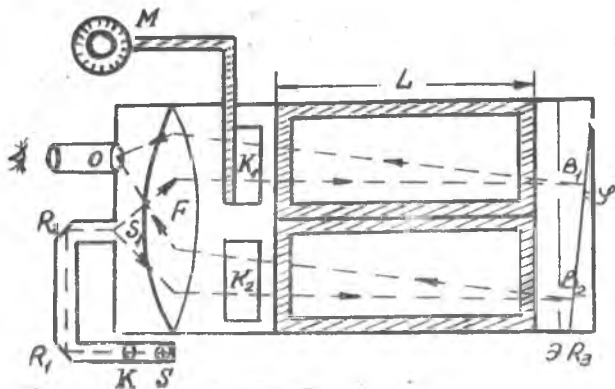


Рис. 17

Свет от источника  $S$ , с помощью конденсора  $K$  и двух зеркал  $R_1$  и  $R_2$  собирается на узкой входной щели прибора  $S_1$ , расположенной в фокусе объектива  $F$ . Из объектива свет выходит параллельным пучком. На пути этих лучей в верхней части прибора (см. рис. 18) находятся плоскопараллельные стеклянные пластинки  $K_1$  и  $K_2$ , называемые компенсаторами, и двухкамерная кювета для исследуемых веществ. Кювета

расположена в термокамере. Пройдя через кювету, свет падает на плоский экран Э с двумя параллельными щелями В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub>. За щелями расположено плоское зеркало R<sub>3</sub>, отражающее лучи под очень малым углом φ. В обратном направлении лучи вновь проходят через щели в экране Э, кювету, компенсаторы и собираются в фокальной плоскости объектива F в точке О.

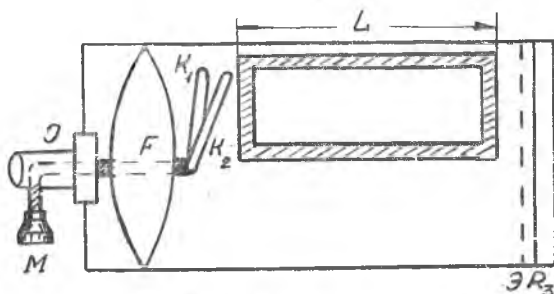


Рис. 18

В этой точке имеется сильный цилиндрический окуляр, предназначенный для наблюдения интерференционной картины. Так как щели имеют значительную ширину (5 мм), интерференционные полосы располагаются близко друг к другу. Для того, чтобы их различить, необходимо сильное увеличение в направлении, перпендикулярном щелям. Это и осуществляется короткофокусной цилиндрической линзой. Параллельный пучок света от источника S разделяется щелями В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> на два когерентных пучка, проходящих через камеры кюветы одинаковой длины L.

Одна камера наполняется эталонной жидкостью с показателем преломления  $n_1$  (растворитель), а другая — исследуемым раствором с показателем преломления  $n_2$ . Вследствие различия показателей преломления жидкостей в камерах, появляется дополнительная оптическая разность хода между лучами, она равна:

$$\delta = 2L(n_2 - n_1),$$

где множитель 2 является следствием того, что световые лучи проходят через жидкость дважды.

Добавочная разность хода приводит к смещению верхней части интерференционной картины относительно нижней на некоторую величину (рис. 19, б), зависящую от разности по-

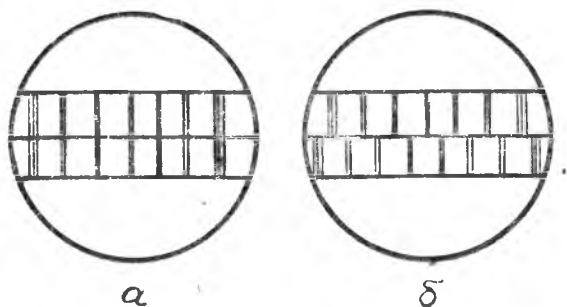


Рис. 19

казателей преломления, сравниваемых жидкостей. Нижняя система полос остается неподвижной, так как она получается в результате интерференции лучей, проходящих ниже компенсаторов и кюветы. Поэтому нижнюю систему полос можно принять за индикатор, относительно которого производится отсчет. Измерение смещения верхней системы полос производят с помощью компенсаторов  $K_1$  и  $K_2$ .

Одна пластина  $K_1$  свободно вращается вокруг оси, перпендикулярной щелям, изменяя свой наклон (рис. 20). При этом

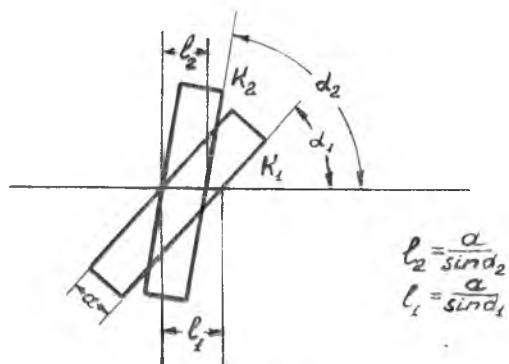


Рис. 20

изменяется длина пути луча света в стекле, чем вносится дополнительная разность хода:

$$\delta_1 = 2 n_{\text{пл}} (l_1 - l_2),$$

где  $n_{\text{пл}}$  — показатель преломления пластинок; множитель 2 показывает, что лучи проходят через пластинки дважды.

Изменяя угол  $\alpha$ , можно в широких пределах менять разность хода  $\delta_1$  и таким образом компенсировать разность хода  $\delta$ . При этом верхняя интерференционная система полос совпадает с нижней — неподвижной (см. рис. 19, а). Наклон пластинки осуществляется микрометрическим винтом М (см. рис. 17). Каждому показанию микрометра соответствует определенное значение угла поворота пластинки  $K_1$ , а следовательно, определенная оптическая разность хода  $\delta_1$ . Если оптическая разность хода  $\delta$  скомпенсирована, то  $\delta = \delta_1$  и показания микрометра будут определяться только значениями показателя преломления  $n_2$  при постоянном  $n_1$ .

Известно, что показатель преломления раствора зависит от его концентрации, причем при малых концентрациях наблюдается прямая пропорциональная зависимость. Следовательно, концентрацию раствора можно найти с помощью микрометра  $N$ .

Микрометрический винт имеет две шкалы, из которых одна неподвижная имеет 30 делений, а вторая — вращающаяся — 100 делений, следовательно, в сумме по микрометричному механизму может быть отсчитано 3000 делений.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе предлагается определить неизвестную концентрацию раствора спирта в воде, придерживаясь следующего порядка:

1. Включить осветитель и наблюдать интерференционную картину. Если полосы в нижней части плохо видны, то, вращая окуляр, добиться хорошей видимости. Если в верхней части поля зрения полосы отсутствуют или сдвинуты относительно нижней, то вращением микрометрического винта М привести их к совмещению. При совмещении верхней системы полос с нижней показание микрометра должно быть близким к нулю.

2. Налить в термокамеру дистиллированную воду и, перемешивая ее, добиться хорошей видимости системы интерференционных полос.

3. Вставить кювету, оба отделения которой заполнены дистиллированной водой (растворителем), и определить так называемый нуль кюветы  $N_0$ , т. е. тот отсчет по барабану, при котором интерференционные картины совпадают. Совмещение полос произвести три раза.

4. Одну из камер кюветы поочередно заполнять растворами известной концентрации. Эту камеру закрыть крышкой, которая прижимается к ней специальными упругими держателями. Другая камера должна быть постоянно заполнена дистиллированной водой.

5. Наблюдая в окуляр прибора, добиться совмещения обеих интерференционных картин по нулевой полосе. Нулевую полосу опознают по отсутствию хроматизма (цветных каемок). Соседние полосы имеют цветные каемки, которые увеличиваются по мере возрастания номера полосы, отсчитываемого от нулевой полосы. Отсчет по микрометру  $N$  произвести три раза до получения устойчивого отсчета.

6. Вычислить разность  $(N - N_0)$ .

7. Результаты всех измерений занести в таблицу.

Таблица

$N_0$	$c, \%$	$N$	$\bar{N}$	$\bar{N} - N_0$	$c_x$
	$c_1 =$	1.			
		2.			
		3.			
	$c_2 =$	1.			
		2.			
		3.			
	$c_3 =$	1.			
		2.			
		3.			
$N_0 =$	$c_4 =$	1.			
2.					
3.					

8. Построить градуировочную кривую, откладывая по оси абсцисс концентрацию растворов  $C$ , а по оси ординат — показания микрометра  $(N - N_0)$ .

9. Заполнить камеру кюветы раствором неизвестной концентрации. Совместить верхнюю систему полос с нижней и снять отсчет по микрометру.

10. Используя градуировочный график, определить искомую концентрацию раствора спирта в воде  $C_x$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление интерференции света?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Каково условие максимума и минимума света при интерференции?
4. Какая разница между геометрической и оптической разностью хода?
5. Объясните принцип действия интерферометра ИГР-2.
6. Объясните возникновение интерференционной картины от двух щелей.
7. Какие лучи образуют верхнюю систему интерференционных полос в интерферометре? Какие — нижнюю?
8. С какой целью используются в интерферометре компенсаторы?
9. Как по смещению интерференционных полос можно измерить концентрацию растворов?
10. Почему нулевая полоса не имеет окраски?

### ЛИТЕРАТУРА

- Ландсберг Г. С. Оптика. М., Гостехиздат, 1952, § 45, 46.  
Савельев И. В. Курс общей физики, т. 3. М., «Наука», 1967, § 24, 25.

Составители:

*Альбина Николаевна Пещенко,  
Любовь Александровна Башкирцева,  
Вера Петровна Кабанова,  
Зинаида Ахатовна Куликова*

## ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Лабораторная работа

Редактор И. М. Чулкова  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор С. С. Рубан

Сдано в набор 17.6.77 г. Подписано к печати 18.1.78 г.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага тип № 2. Физ. п. л. 2,5.  
Усл. п. л. 2,32. Тираж 2000 экз. Бесплатно. Заказ № 927.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт им. академика С. П. Королева,  
Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151

---

Типография УЭЗ КуАИ, Куйбышев, ул. Ульяновская, 18