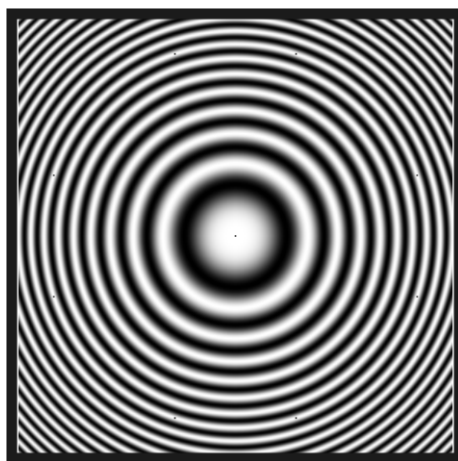


***ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ***  
***ОПТИКА***

**Интерферометр Майкельсона  
с лазерным источником света**



ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского»

В.П. Рябухо, В.В. Лычагов, А.Л. Кальянов

**Интерферометр Майкельсона  
с лазерным источником света**

Руководство к лабораторной работе  
по курсу общей физики

**ОПТИКА  
ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА**

Саратов, 2009 г.



Цель работы: изучение явления интерференции света, устройства и принципа действия интерферометра Майкельсона, ознакомление с измерительными возможностями интерферометра.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Интерферометры это оптические устройства для наблюдения эффектов интерференции волн и использования этих эффектов в измерительных целях. Интерферометрия это совокупность методов и средств измерений, основанных на явлении интерференции волн. Интерференция волн - явление взаимного усиления или гашения колебаний при наложении двух или многих взаимнокогерентных волн. При интерференции происходит пространственное перераспределение интенсивности колебаний, возбуждаемых волнами, и образование светлых и темных интерференционных полос – максимумов и минимумов интерференции. Светлые полосы образуются там, где колебания складываются в фазе и усиливают друг друга. Это означает, что разность фаз колебаний равна  $\Delta\varphi = 2\pi m$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Темные полосы образуются там, где колебания оказываются в противофазе,  $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$ , и ослабляют друг друга.

Для наблюдения эффектов интерференции необходима взаимная когерентность волн, при которой разность фаз колебаний, возбуждаемых волнами в области их наложения, остается неизменной во времени,  $\Delta\varphi = \text{const}$ .

Волны от физически различных источников взаимно некогерентны. Поэтому для получения взаимнокогерентных волн используют оптические устройства - интерферометры, в которых волну от одного источника разделяют на две части – на две волны, которые потом тем или иным способом накладывают друг на друга. Интерферометры можно разделить на два вида – с делением исходной волны по амплитуде и с делением по волновому фронту. К первому виду относятся интерферометры Ньютона, Физо, Майкельсона, Маха-Цендера, Жамена, Саньяка и др, а ко второму виду – интерферометры Юнга, Релея, звездный интерферометр Майкельсона, бизеркала Френеля, бипризма Френеля, билинза Бийе, зеркало Ллойда и др.

В настоящей работе изучается принцип действия и измерительные возможности интерферометра Майкельсона, получившего наиболее широкое распространение в измерительной технике и научных исследованиях. Схема интерферометра Майкельсона представлена на рис. 1.

Световая волна от источника  $S$  делится полупрозрачным зеркалом  $BS$  на две части – две волны, которые распространяются в направлениях перпендикулярных плоским зеркалам  $M1$  и  $M2$ . Отраженные от зеркал волны возвращаются к делителю  $BS$ . Каждая из этих волн опять делится полупрозрачным зеркалом по амплитуде, так что в выходной ветви интерферометра складываются две волны. Результат интерференции этих волн можно наблюдать на экране в плоскости  $xu$  на некотором расстоянии от делителя  $BS$ .

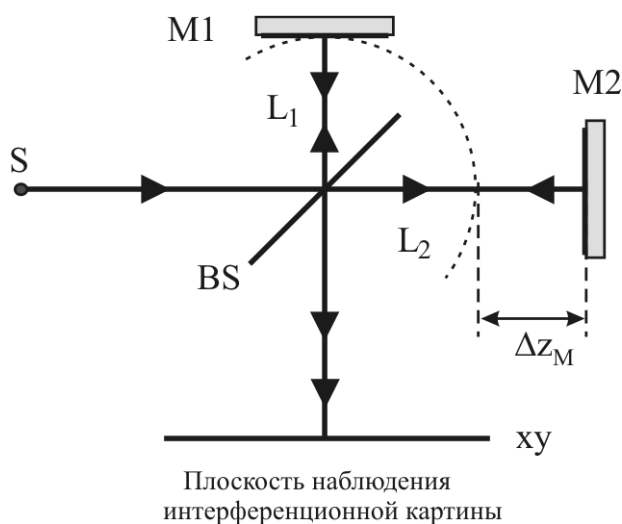


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра Майкельсона:

$S$  - источник света,  $BS$  - полупрозрачное зеркало – делитель исходного пучка света;  $M_1$  и  $M_2$  - плоские зеркала;  $xy$  - плоскость наблюдения интерференционной картины;  $L_1$  и  $L_2$  - длины плеч интерферометра,  $\Delta z_M = L_2 - L_1$  - разность длин плеч интерферометра.

Колебания, возбуждаемые этими волнами, будут усиливать друг друга, если оптическая разность хода волн в плечах интерферометра  $2\Delta z_M$  равна целому числу длин волн  $\lambda_0$ ,  $2\Delta z_M = m\lambda_0$ , и ослаблять друг друга, если разность хода равна нечетному числу длин полувольт,  $2\Delta z_M = (2m+1)\lambda_0/2$ . В первом случае наблюдается максимум интерференции – светлая полосы, а во втором – минимум интерференции – темная полоса.

Волну, излучаемую квазитоочечным источником  $S$  можно рассматривать как квазисферическую. Следовательно, если делитель  $BS$  и зеркала  $M1$  и  $M2$  имеют плоскую форму, то на выходе интерферометра будет сложение двух квазисферических волн, исходящих от мнимых изображений источника  $S'_1$  и  $S''_2$  (рис. 2). Если зеркала интерферометра находятся на разных расстояниях  $L_1$  и  $L_2$  от делителя,  $L_2 - L_1 = \Delta z_M$ , то источники  $S'_1$  и  $S''_2$  также находятся на разных расстояниях  $z'_1$  и  $z''_2$  от плоскости наблюдения  $xy$ ,  $z''_2 - z'_1 = 2\Delta z_M$ . Таким образом можно рассмотреть эквивалентную схему интерферометра, приведенную на рис. 3.

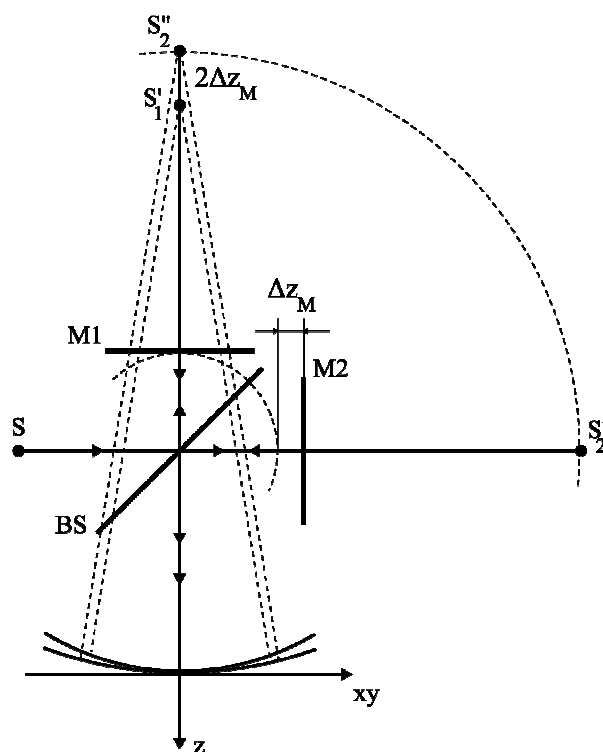


Рис. 2. Схема наложения и интерференции сферических волн в интерферометре Майкельсона:  $S$  – квазиточечный источник света;  $BS$  – полупрозрачное зеркало – делитель исходного пучка света;  $xy$  – плоскость наблюдения;  $z$  – оптическая ось интерферометра (продольная координата);  $S'_1$ ,  $S'_2$  – мнимые изображения источника  $S$  в зеркалах  $M_1$  и  $M_2$ ;  $S''_2$  – эквивалентное положение изображения  $S'_2$  для плоскости наблюдения  $x, y$ .

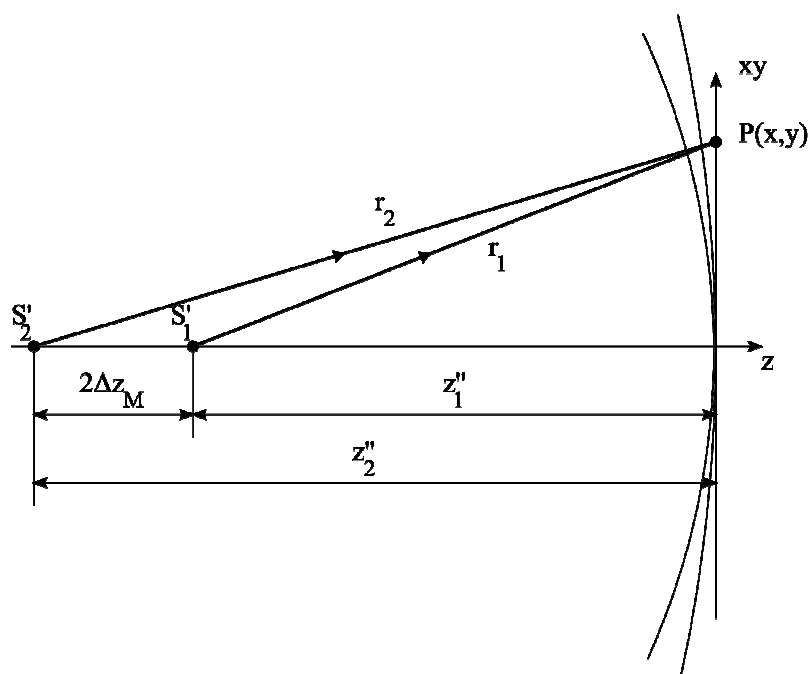


Рис. 3. Эквивалентная схема интерферометра Майкельсона с квазиточечным источником света и интерференцией сферических волн:  $S'_1$ ,  $S'_2$  – мнимые изображения источника  $S$  в зеркалах интерферометра  $M_1$  и  $M_2$ ;  $x, y$  – плоскость наблюдения интерференционной картины

При сложении двух взаимнокогерентных волн для интенсивности результирующих колебаний можно получить уравнение

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi_{12}), \quad (1)$$

где  $I_1, I_2$  - интенсивности складываемых колебаний,  $\Delta\varphi_{12}$  - разность фаз колебаний.

Колебания, приходящие в точку  $P(x, y)$  от источников  $S'_2$  и  $S'_1$  будут иметь разность фаз

$$\Delta\varphi_{12}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (r_1 - r_2) n, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме,  $r_1$  и  $r_2$  - расстояния от источников до точки наблюдения  $P$ ,  $n$  - показатель преломления среды.

Будем полагать, что  $n \approx 1$  (среда - воздух) и расстояния  $z''_1$  и  $z''_2$  намного больше расстояний  $x$  и  $y$  от оптической оси. Тогда для (2) можно получить приближенное выражение

$$\Delta\varphi_{12}(x, y) \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ 2\Delta z_M - \frac{1}{2} \frac{2\Delta z_M}{z''_1 z''_2} (x^2 + y^2) \right]. \quad (3)$$

При подстановке (3) в (1) получаем распределение интенсивности в интерференционной картине в плоскости  $x, y$

$$I(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_0} \left( 2\Delta z_M - \frac{\Delta z_M}{z''_1 z''_2} (x^2 + y^2) \right) \right]. \quad (4)$$

Из (4) следует, что распределение интенсивности в плоскости наблюдения носит осесимметричный характер - максимумы и минимумы интенсивности  $I(x, y)$  - светлые и темные полосы, имеют форму окружностей. Уравнения этих окружностей можно записать в следующем виде:

$$\text{для светлых полос: } \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ 2\Delta z_M - \frac{\Delta z_M}{z''_1 z''_2} (x^2 + y^2) \right] = 2\pi n, \quad (5)$$

$$\text{для темных полос: } \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ 2\Delta z_M - \frac{\Delta z_M}{z''_1 z''_2} (x^2 + y^2) \right] = (2m + 1)\pi, \quad (6)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  - порядок интерференции, который в центре максимален и убывает при удалении от центра на периферию.

Изображения интерференционных полос, полученные с помощью численного расчета с использованием уравнения (4), показаны на рис. 4.

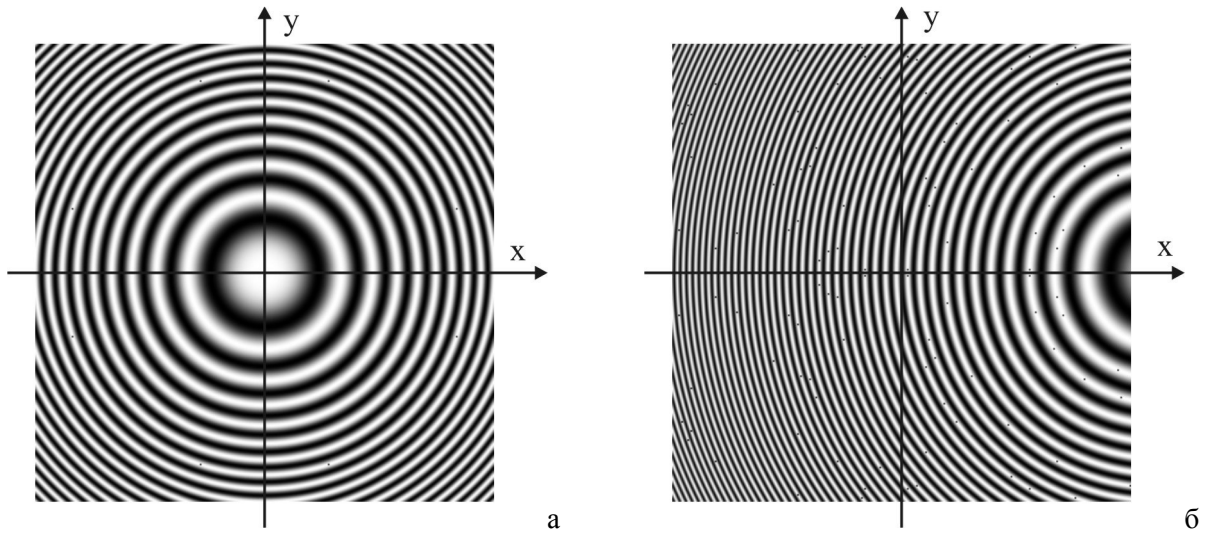


Рис. 4. Кольцевые интерференционные полосы, образующиеся на выходе интерферометра Майкельсона: а – при расположении зеркал перпендикулярно оптической оси интерферометра; б – при наклоне одного зеркала на малый угол.

При смещении зеркала интерферометра вдоль оси  $z$  изменяется величина  $\Delta z_M$  и изменяется разность фаз колебаний в каждой точке  $x, y$  плоскости наблюдения. Кольцевые полосы или расходятся из центра или сходятся в центре в зависимости от направления смещения зеркала. Если  $\Delta z_M$  увеличивается, то полосы разбегаются и наоборот.

Уравнения (5) и (6) позволяют определить величину  $\Delta z_M$ , при известном значении  $z_2''$ , измеряя диаметры интерференционных полос  $2R_{m_1}$  и  $2R_{m_2}$  различных порядков интерференции  $m_1$  и  $m_2$ :

$$\Delta z_M = \frac{z_2''^2 \lambda_0 (m_1 - m_2)}{2z_2'' \lambda_0 (m_1 - m_2) + R_{m_1}^2 - R_{m_2}^2}. \quad (7)$$

По интерференционным полосам можно определить и изменение величины  $\Delta z_M$  при смещении зеркала  $\delta(\Delta z_M) = \Delta z_M' - \Delta z_M''$ . В этом случае определяются диаметры колец  $2R_{m_1}'$  и  $2R_{m_2}'$  с порядками интерференции  $m_1$  и  $m_2$  при одном положении зеркала и диаметры колец  $2R_{m_3}''$  и  $2R_{m_4}''$  с порядками интерференции  $m_3$  и  $m_4$  при другом положении зеркала. Из (7) для  $\delta(\Delta z_M)$  можно получить выражение

$$\delta(\Delta z_M) = \frac{\Delta R''^2 - \Delta R'^2}{4\Delta m \lambda_0 + \frac{2(\Delta R''^2 + \Delta R'^2)}{z_2''^2} + \frac{\Delta R'^2 \Delta R''^2}{z_2''^2 \Delta m \lambda_0}}, \quad (8)$$

где  $\Delta R'^2 = R_{m_1}'^2 - R_{m_2}'^2$ ,  $\Delta R''^2 = R_{m_3}''^2 - R_{m_4}''^2$ ,  $\Delta m = m_3 - m_4 = m_1 - m_2$ . Из выражений (7) и (8) видно, что нет необходимости знать порядки интерференционных полос, по которым рассчитывается разность хода в интерферометре, так как в формулах фигурирует лишь



разность порядков. Помимо этого, выражение (8) получено для случая, когда разность порядков интерференции в первом и втором измерениях одинакова.

Вышеприведенный способ определения смещения зеркала  $\Delta z_M$  имеет сравнительно низкую точность. Существенно более точный способ определения величины  $\Delta z_M$  и ее изменения заключается в определении изменения интенсивности в центре интерференционной картины ( $x=0, y=0$ ) при смещении зеркала. На рис.5. приведен график изменения интенсивности  $I(x=0, y=0, \Delta z_M)$ , рассчитанный с использованием (4)

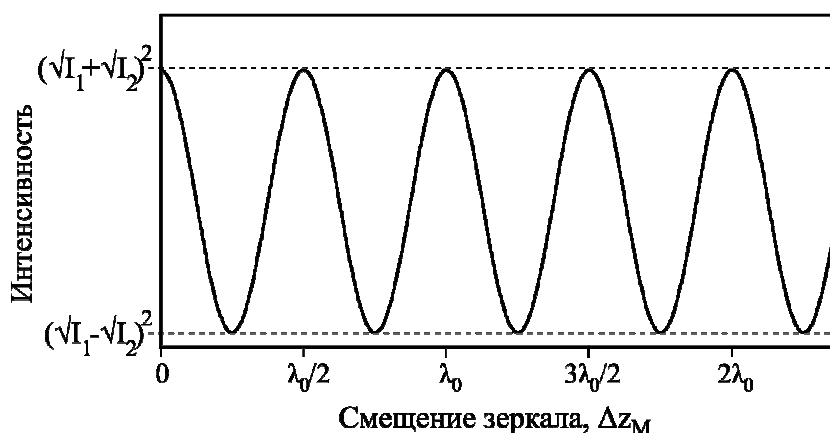


Рис. 5. Изменение интенсивности света в центре интерференционной картины в зависимости от величины смещения  $\Delta z_M$  зеркала интерферометра Майкельсона.

Смещение зеркала на  $\lambda_0/4$  сопровождается изменением интенсивности от максимума до минимума. Определяя число таких осцилляций  $N$  можно с точностью до  $\lambda_0/4$  определить величину смещения зеркала

$$\delta(\Delta z_M) = N \frac{\lambda_0}{4}. \quad (9)$$

Для  $\lambda_0 = 0.6328$  мкм (излучение газового He-Ne лазера) точность измерения составляет  $\approx 0.16$  мкм. С помощью электронных средств регистрации интерференционного сигнала можно существенно увеличить точность измерений (до единиц и долей нанометров).

Наклон одного из зеркал интерферометра на малый угол  $\alpha$  приводит к поперечному смещению центра концентричности кольцевых интерференционных полос (рис.4,б) на величину

$$\Delta x \approx \frac{z_2 z_1''}{\Delta z_M} \alpha, \quad (10)$$

где  $z_2$  - расстояние от источника  $S$  до зеркала  $M2$ , равное расстоянию от зеркала  $M2$  до изображения источника  $S'_2$ ,  $z_1''$  - расстояние от вторичного источника  $S'_1$  до плоскости наблюдения интерференционной картины.



При достаточно больших углах  $\alpha$  полосы имеют малый период и эти полосы могут быть неразличимы (не разрешаться) глазом. Поэтому для наблюдения интерференционных полос невооруженным глазом необходимо иметь достаточно малый угол наклона зеркала интерферометра к его оптической оси. Изменение угла наклона зеркал интерферометра осуществляется с помощью прецизионных механических устройств.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

**Приборы и принадлежности:** интерферометр Майкельсона, закрепленный на вертикальной металлической плите; лазерный источник излучения – лазерный диод; белый экран, закрепленный в струбцине на рейтере; линейка; отвертка.

### **Устройство лазерного интерферометра Майкельсона**

Оптическая схема интерферометра и его фотография приведены на рис. 8 и 9. Интерферометр состоит из лазерного источника – полупроводникового лазера (лазерного диода) LD, закрепленного в металлической оправе, собирающей линзы L, светоделительного куба BS, двух плоских зеркал M1, M2 и экрана P, расположенного на некотором удалении по оптической оси интерферометра. Длина волны излучения лазерного диода  $\lambda_0 \approx 0,65 \text{ мкм}$ . Питание диода осуществляется с помощью блока питания (на рис.6 не показан) от электросети 220 В, 50 Гц. Зеркало M1 закреплено в механическом устройстве AM, обеспечивающем возможность прецизионного изменения наклона плоскости зеркала по отношению к оптической оси интерферометра. Наклон зеркала M1 можно изменять с помощью 2-х прецизионных винтов устройства AM с помощью отвертки. Зеркало M2 закреплено на микрометрическом столике, обеспечивающим возможность контролируемого прецизионного перемещения зеркала вдоль оптической оси интерферометра. Микрометрический винт столика имеет шкалу отсчета с наименьшей ценой деления 10 мкм. Интерференционная картина на выходе интерферометра наблюдается на белом экране P, закрепленном в струбцине на рейтере.

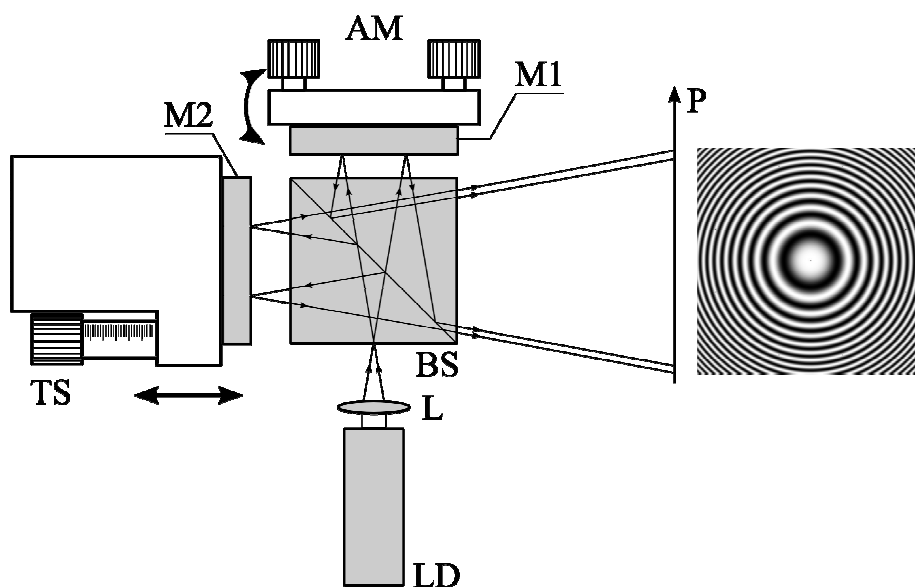


Рис. 8. Принципиальная схема лабораторной установки:  
 LD – лазерный диод, L – линза, BS – светоделительный куб, M1, M2 – плоские зеркала,  
 TS – микрометрический столик перемещения зеркала M2, AM – держатель зеркала M1 с  
 возможностью прецизионного изменения угла наклона зеркала, P – экран для наблюдения  
 картины интерференционных полос.

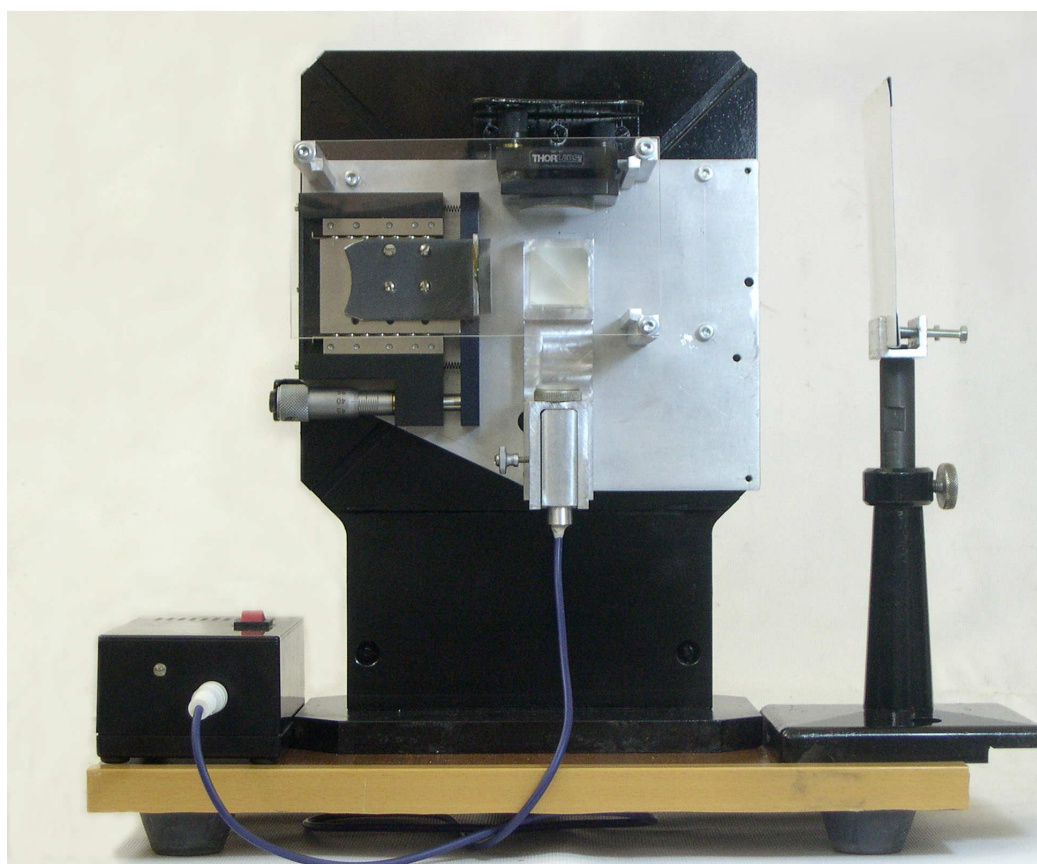


Рис.9. Фотография установки – интерферометра Майкельсона с лазерным источником света.

## Практические задания

### Задание 0. Юстировка интерферометра.

Перед выполнением измерений с помощью интерферометра необходимо его соответствующим образом настроить - отъюстировать. Лазерный диод LD необходимо закрепить в специальном держателе. Лазерный пучок должен быть направлен вверх к светоделительному кубу BS по оптической оси интерферометра.

Фокусное расстояние  $f$  линзы L и место ее крепления подобраны таким образом, что параллельный пучок света, выходящий из лазера фокусируется на переднюю грань делительного куба. Поэтому вторичный квазиточечный источник квазисферической лазерной волны располагается на оптической оси в плоскости передней грани делительного куба (рис.8).

После отражения от обоих зеркал лазерные пучки снова проходят через светоделительный куб, после чего на выходе интерферометра на экране Р, можно увидеть два световых пятна, образованных пучками, пришедшими из двух каналов интерферометра. В этом можно убедиться, перекрывая последовательно каждый из каналов листом черной бумаги. Эти два пятна могут быть смещены друг относительно друга, что говорит о наличии наклона одного зеркала относительно другого и относительно оптической оси. Пятна необходимо максимально точно совместить друг с другом путем наклона зеркала М1 с помощью юстировочных винтов устройства АМ, поворачивая которые можно наклонять платформу, на которой закреплено зеркало, по двум осям. Вращая по очереди эти винты, добиться полного совмещения световых пятен на экране. После этого на экране должна появиться интерференционная картина в виде системы концентрических интерференционных полос (рис.4 и рис.8). Изменяя взаимный наклон зеркала М1 интерферометра, необходимо центральные кольца вывести на оптическую ось интерферометра в центр экрана. После этого можно переходить к выполнению задания 1.

### Задание 1. Определение относительного продольного расположения зеркал $\Delta z_M$ по измеренным диаметрам интерференционных полос.

Если зеркала интерферометра располагаются на различных расстояниях от делительного куба -  $\Delta z_M \neq 0$ , то наблюдается система кольцевых интерференционных полос. Увеличение  $\Delta z_M$  сопровождается увеличением числа интерференционных колец. Измеряя диаметры этих колец, можно определить величину  $\Delta z_M$ .

Относительное продольное расположение зеркал  $\Delta z_M$  в интерферометре вычисляется с использованием формулы (7). Для этого в интерференционной картине, наблюдаемой на экране Р, выделить два светлых или два темных интерференционных кольца разных порядков  $m$  и измерить их диаметры. Расстояние от изображения

источника в зеркале M2 до плоскости наблюдения  $z_2''$  определяется с помощью линейки, исходя из предположения о том, что источник квазисферических волн расположен в плоскости передней грани делительного куба.

Процедуру измерений повторить для нескольких пар интерференционных полос. Сравнить вычисленные значения  $\Delta z_M$ .

**Задание 2.** Определение смещения  $\delta(\Delta z_M)$  зеркала M2 по изменению диаметров интерференционных колец.

Смещение зеркала  $\delta(\Delta z_M)$  определяется по формуле (8). Сначала измеряются диаметры кольцевых интерференционных полос при некотором начальном положении зеркала M2. Затем при помощи микрометрического винта столика TS сместить зеркало M2 на 4-5 малых делений винта, что соответствует смещению приблизительно на 40-50 мкм. Измерить диаметры кольцевых интерференционных полос того же порядка для нового положения зеркала M2, после чего, подставив измеренные значения в выражение (8), определить смещение зеркала M2 и сверить полученное значение с заданным смещением. Объяснить причину различий.

**Задание 3.** Определение смещения  $\delta(\Delta z_M)$  зеркала M2 по периодическому изменению интенсивности света на оптической оси интерференционной картины.

Для выполнения этого задания на экране необходимо отметить положение какой-либо интерференционной полосы, темной или светлой, и отметить по микрометрическому винту соответствующее положение зеркала M2. Затем, медленно вращая микрометрический винт, смещать зеркало M2, наблюдая при этом изменение интенсивности в указанной области экрана. При поступательном движении зеркала светлая полоса будет сменяться темной и наоборот. Смена одной светлой (темной) полосы на следующую по порядку светлую (темную) полосу соответствует смещению зеркала M2 на величину порядка  $\lambda_0/2$ . Сместить зеркало M2 так, чтобы в наблюдаемой области экрана сменилось последовательно 100 светлых (темных) интерференционных полос, отметить положение микрометрического винта, соответствующее конечному положению зеркала. После этого вычислить величину смещения зеркала M2, зная центральную длину волны излучения лазера и число прошедших интерференционных полос и сравнить полученное значение со значением, вычисленным по показаниям микрометрического винта.

**Задание 4.** Определение угла наклона  $\alpha$  одного зеркала относительно другого по известному периоду интерференционных полос.

Формула (11) позволяет вычислить угол взаимного наклона зеркал, зная период интерференционных полос, наблюдаемых на экране. Однако, для этого необходимо, чтобы разность хода в интерферометре была равна нулю:  $2\Delta z_M = 0$ . Такие условия наблюдения интерференции можно получить, изменяя продольное положение зеркала M2. Вращением микрометрического винта столика TS можно очень точно смещать зеркало M2 в продольном направлении. Продольное смещение зеркала M2 необходимо осуществлять очень осторожно, крайне малым поворотом микрометрического винта. В процессе продольного смещения зеркала M2 необходимо контролировать наклон зеркала M1, для того, чтобы центр концентричности интерференционных полос не смещался с оптической оси. Когда величина  $\Delta z_M$  станет минимальной или равной 0, радиусы интерференционных полос станут максимальными. На экране в этом случае будет наблюдаться одно большое либо темное, либо светлое пятно, либо будет наблюдаться мерцание, связанное с вибрацией элементов интерферометра. Если при этом наклонить зеркало M1 на малый угол  $\alpha$ , на экране возникнут почти прямолинейные полосы, по периоду которых, воспользовавшись формулой (11) можно определить угол наклона  $\alpha$ .

### Контрольные вопросы и задания

1. Запишите уравнение для интенсивности света в интерференционной картине, образующейся при сложении двух волн с интенсивностями  $I_1$  и  $I_2$ , в зависимости от разности фаз  $\Delta\varphi_{12}$  этих волн.
2. Запишите выражение для разности фаз  $\Delta\varphi_{12}$  и разности хода  $\Delta_{12}$  волн в интерферометре, при которых формируются максимумы и минимумы интерференции этих волн.
3. Нарисуйте оптическую схему интерферометра Майкельсона с точечным источником.
4. На какое расстояние необходимо сместить зеркало интерферометра Майкельсона, чтобы на выходе интерферометра на его оптической оси светлая полоса заместились темной полосой (интенсивность света изменилась от максимального до минимального значения)?
5. Запишите выражение для разности фаз  $\Delta\varphi_{12}(x, y)$  на выходе интерферометра Майкельсона в плоскости, перпендикулярной оптической оси, в зависимости от положения источника  $S$  и расстояний от делителя до зеркал интерферометра.
6. Получите формулу для периода интерференционных полос, наблюдаемых на выходе интерферометра Майкельсона, при наклоне одного зеркала на угол  $\alpha$  и одинаковом расстоянии между делителем и зеркалами.
7. Какие изменения претерпевает картина кольцевых интерференционных полос на выходе интерферометра Майкельсона, когда одно зеркало интерферометра смещается, и разность хода волн увеличивается или уменьшается?
8. Определите частоту колебаний интенсивности света в интерференционной картине при перемещении зеркала интерферометра Майкельсона со скоростью  $V$  вдоль оптической оси.

### Литература

1. Бутиков Е.И. Оптика. - С.-Петербург: Невский Диалект: БХВ-Петербург. 2003. - 480 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. Издание 6-е. - М.: Наука, 2006. - 928 с.
3. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. - М.: Высшая школа, 1995. - 463 с.
4. Матвеев А.Н. Оптика. - М.: Высшая школа, 1985. - 351 с.
5. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: Учебник. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 656 с.
6. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башнина Г.Л. Основы оптики. Издательство: С.-П. Изд-во «Питер», 2006. – 336 с.
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики, т. IV. Оптика. - М.: Физматлит, 2005. - 792 с.