

4.2.4 (119). ИНТЕРФЕРОМЕТР МАЙКЕЛЬСОНА

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

12 мая 2016 г.

В работе используются: интерферометр Майкельсона с подвижным зеркалом, лазер ЛГ-203, фотоумножитель ФЭУ-68 с блоком питания, частотомер ЧЗ-54, линзы.

Оптическая схема интерферометра Майкельсона приведена на рис. 1. Источник света – лазер ЛГ – излучает узкий пучок света, который фокусируется линзой L_1 . В фокусе этой линзы возникает точечный источник света S . Сферическая световая волна от источника S падает на делительный кубик ДК и делится его диагональной гранью на две волны — отражённую 1 и проходящую 2. Волна 1 отражается от зеркала $З_1$, возвращается к кубику, частично проходит сквозь него и попадает на экран Э. Волна 2 отражается от зеркала $З_2$, частично отражается от кубика и также попадает на экран. Световые волны 1 и 2 испускаются одним источником S , и они когерентны между собой. Эти волны создают на экране интерференционную картину. Для увеличения масштаба интерференционной картины может быть использована линза L_2 .

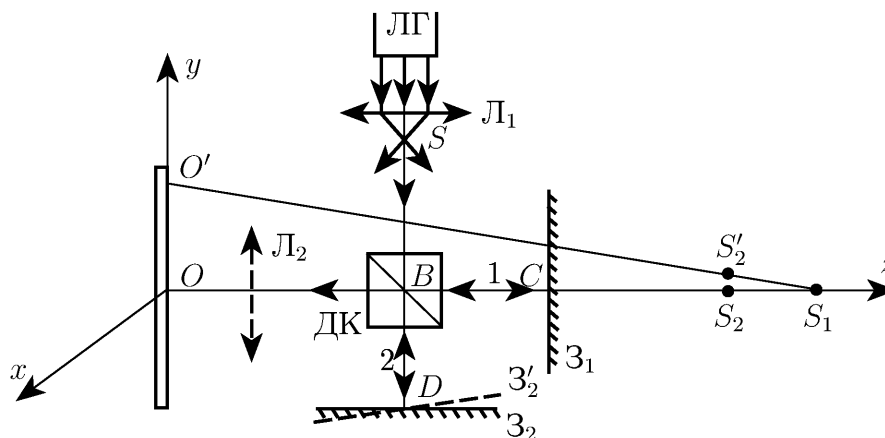


Рис. 1. Схема интерферометра

Зеркало $З_1$, установленное перпендикулярно падающему лучу, может перемещаться вдоль луча. В дальнейшем Это зеркало будет называться подвижным. Зеркало $З_2$ вдоль направления падающего луча не перемещается. Его, однако, можно наклонять по отношению к лучу.

Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Источником света служит гелий-неоновый лазер ЛГН-203. Его излучение обладает большой длиной когерентности, что позволяет получать хорошо различимую глазом интерференционную картину при разности хода в десятки сантиметров. Неподвижное зеркало $З_2$, поворачивается микрометрическими винтами M_r (относительно горизонтальной) и M_v (относительно вертикальной оси). Зеркало $З_1$ установлено перпендикулярно падающему лучу. Оно может передвигаться вдоль луча с помощью микрометрического винта, соединённого с двигателем Дв через муфту и редуктор РД, позволяющий менять скорость движения

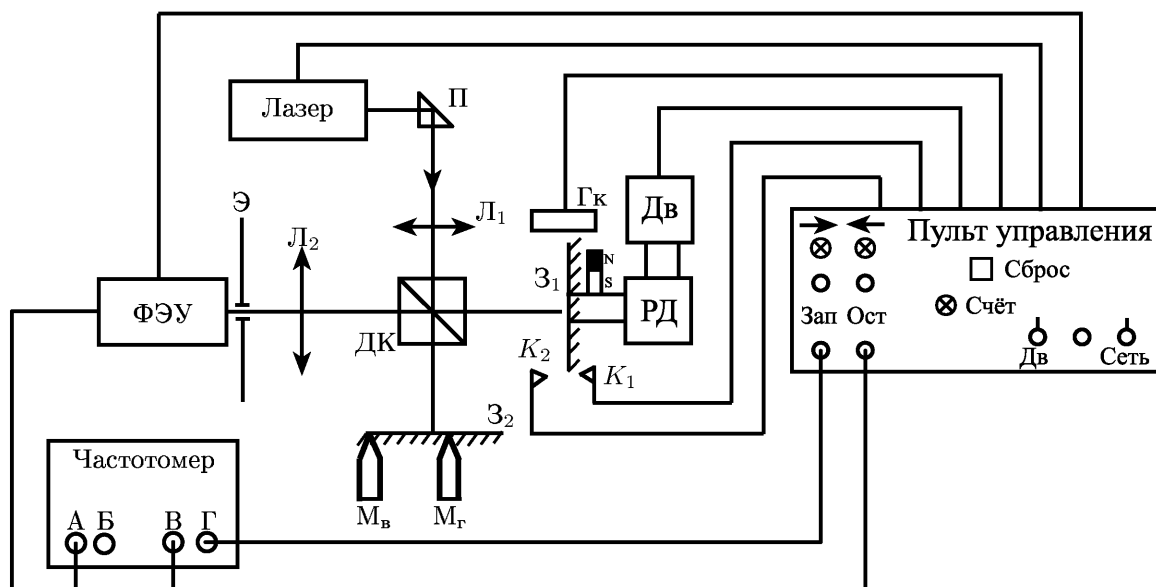


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

зеркала. Двигатель питается от сети через блок питания пульта управления. Концевые контакты K_1 и K_2 меняют направление движения зеркала на обратное. Включение лазера и двигателя производится с пульта управления. Сигнальные лампочки указывают, в какую сторону движется зеркало.

Интерференционная картина наблюдается на экране Э. Она может быть увеличена с помощью линзы L_2 . В этом случае на экране в увеличенном масштабе воспроизводится интерференционная картина, которая создаётся перед линзой в плоскости, сопряжённой экрану. Линза закреплена на съёмном столике, её фокусное расстояние 4,3 см.

Для регистрации изменения интенсивности света используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ-68, установленный непосредственно за экраном. Свет на окно ФЭУ попадает через небольшое отверстие в центре экрана. Для питания ФЭУ используется высоковольтный выпрямитель. Выпрямитель включается тумблером «Сеть» на пульте управления.

Периодическое изменение интенсивности света, возникающее при движении зеркала Z_1 , приводит к такому же изменению сигнала ФЭУ. Число периодов изменения интенсивности света пересчитывается частотомером ЧЗ-54. Частотомер может работать в одном из трёх режимов.

1. Он может измерять число импульсов, поступающих на его входы (А или Б) за некоторый промежуток времени (его продолжительность определяется поступлением сигналов на управляющие входы В и Г).

2. С помощью частотомера можно измерять промежутки времени. Для таких измерений в прибор встроен кварцевый генератор. Частотомер измеряет время, прошедшее между поступлением сигналов на его управляющие входы, подсчитывая соответствующее число импульсов кварцевого генератора.

3. Наконец, частотомер может измерять частоту сигнала, поступающего на

его вход, сравнивая число периодов исследуемого сигнала с числом импульсов кварцевого генератора.

Для получения управляющих сигналов используется геркон Гк (герметичный магнитоуправляемый контакт). Схема работает следующим образом. На отсчётной головке микрометрического винта зеркала Z_1 закреплён небольшой магнит. Головка вращается вместе с винтом. После срабатывания концевого контакта K_2 зеркало начинает двигаться от экрана. При приближении магнита к геркону вырабатывается управляющий сигнал, который подаётся через схему пульта управления на вход В частотомера. Частотомер начинает счёт импульсов. После того, как с помощью геркона зарегистрировано 32 оборота ходового винта, на вход Г частотомера подаётся сигнал на окончание счёта. После срабатывания концевого контакта K_1 зеркало начинает движение к экрану. На этом участке движения счёт импульсов не производится. Один оборот микрометрического винта приводит к перемещению зеркала на 1 мм. Таким образом, полное перемещение зеркала Z_1 составляет $l = 32$ мм.

ЗАДАНИЕ

Работа содержит несколько упражнений.

В первом упражнении исследуется интерференционная картина, возникающая при различных положениях зеркала Z_2 , проверяется формула (2.69).

Во втором упражнении измеряется длина волны лазерного излучения путём пересчёта интерференционных колец, пропадающих в центре экрана при движении зеркала Z_1 . Такие измерения не очень точны, но обладают тем преимуществом, что не требуют сложных расчётов.

В третьем упражнении исследуется эффект Доплера.

Перед началом работы следует отъюстировать установку.

I. Юстировка системы

1. Включите блок питания установки (тумблер слева от частотомера).
2. Убедитесь, что луч от поворотной призмы (П на рис.2) идёт параллельно столу на высоте 100 ± 2 мм (при этом линза L_1 и делительный кубик сняты).
3. Установите оправу с зеркалом Z_2 перпендикулярно лучу поворотом оправы в зеркале (грубо): для этого освободите фиксирующие (жёлтые) винты, микровинтами M_r и M_b установите плоскость правильно и снова зажмите фиксирующие винты.

Поочерёдно вращая винты M_r , M_b зеркала Z_2 , заведите (точно) отражённый луч на поворотную призму.

4. Установите делительный кубик в центре системы и определите его положение относительно вертикали: луч от поворотной призмы, отразившись от полупрозрачной грани кубика, должен попасть на центр подвижного зеркала Z_1 , а прямой луч, отразившись от зеркала Z_2 , — на центр экрана. При этом пучки должны проходить через центр кубика, а яркость пятен, отражённых от подвижного и неподвижного зеркал, на экране должна быть примерно одинаковой.

Если яркость пятен на экране заметно отличается, поверните кубик относительно вертикали на 90° и ещё раз проведите настройку. Центр экрана (вход в ФЭУ) должен находиться на той же высоте, что и луч от поворотной призмы до зеркала Z_2 (около 10 см).

- Поочерёдно вращая винты столика разделительного кубика, совместите оба луча в центре экрана.

Полезно убедиться в высокой чувствительности оптической системы к механическим деформациям. Последите за тем, как «дышит» интерференционная картина на экране, если надавить пальцем на металлическую станину интерферометра: полосы равного наклона двигаются по дифракционному пятну лазера на экране.

- Поставьте линзу L_1 между поворотной призмой и кубиком. Убедитесь, что лазерный луч проходит через центр линзы (все пятна на зеркалах и на экране должны остаться на одной высоте). При необходимости совместите центр линзы с осью пучка.

Перемещая линзу поперёк луча, совместите центр интерференционной картины с отверстием ФЭУ на экране. Прикрепите линзу к столу скобой с винтом.

II. Исследование интерференционной картины

- Чтобы увеличить интерференционную картину, установите между экраном и кубиком столик с линзой L_2 . Перемещая линзу, добейтесь того, чтобы центр колец снова совпал с отверстием в экране.
- Слегка проворачивая ручную муфту двигателя, добейтесь того, чтобы в центре экрана оказалось тёмное пятно. Приложите к экрану лист бумаги, на котором проведён крест из взаимно перпендикулярных линий. Совместите центр креста с центром колец, наметьте положение пяти-шести первых тёмных колец и измерьте их диаметры.¹
- Убедитесь в справедливости формулы (2.69) Введения:

$$r_n \simeq \sqrt{2nL(L-a)/m_0}.$$

Здесь $m_0 = a/\lambda = 2(BC - BD)/\lambda \simeq 1,2 \cdot 10^5$ — порядок интерференции (номер центрального кольца).

Для этого постройте график зависимости квадрата радиуса кольца r_n от его номера n . По наклону полученной прямой найдите величину $\Delta r_n^2 / \Delta n$.

Согласно рис 1, $L = OS_1 = BS_1 + OB$, $L - a = OS_2 = BS_2 + OB$, $BS_1 = 2BC + SB$, $BS_2 = 2BD + SB$. Проведите расчёт, принимая $SB = 5$ см, $BC = 26$ см (для среднего положения зеркала), $BD = 22$ см, расстояние от делительного кубика до линзы L_2 — 16,5 см, расстояние от линзы до экрана $a_1 = 15$ см, фокусное расстояние линзы $f = 4,3$ см.

¹ Из-за недостаточной механической развязки измерить радиусы колец затруднительно. Упражнения 2 и 3 легко выполняются, если сфотографировать интерференционную картину и провести измерения по фотографии.

Для увеличения размеров колец перед экраном установлена линза \mathcal{L}_2 , поэтому в формуле (2.69) вместо L следует взять расстояние $L' = L - (a_1 + a_2)$ (см. рис.3). Рассчитав a_2 по формуле линзы, получим

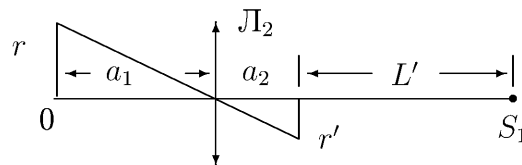


Рис. 3. Расчет радиусов колец

$$\frac{\Delta r_n^2}{\Delta n} = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 \cdot r_n'^2 \simeq \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 \cdot \frac{2L'(L' - a)}{m_0}.$$

Сравните экспериментальный результат с теоретическим расчётом.

- Получите на экране картину вертикальных полос. Для этого уведите центр пятна в сторону по горизонтали ($O \rightarrow O'$ на рис. 1), сместив микрометр M_v на 0,08–0,09 мм от исходного положения. Измерьте ширину полосы в центре экрана (в т. O) и расстояние $O'O$ на экране. Зная OS_1 , оцените угол поворота зеркала и смещение изображения источника света (S_2S_2'). Угол поворота зеркала вдвое меньше угла OO'/OS_1 .

III. Измерение длины волны лазерного излучения

- Вновь получите картину колец. Снимите столик с линзой \mathcal{L}_2 . Совместите центр интерференционной картины с отверстием в экране (входом «ФЭУ»).
- Включите тумблер «Сеть» на частотомере, при этом должны загореться лампы индикаторного табло.
- Установите частотомер в режим счёта импульсов. Для этого переключатель рода работы поставьте в положение «Интервал А/В-Г», кнопка «блок» отжата, ручка «время индикации» — в среднем положении, кнопка ручной работы с изображением руки отжата (автоматический режим). Положения ручек на блоке частотомера «измеритель интервалов времени» отмечены.
- Переместите рычаг регулятора скорости двигателя в положение 2 (регулятор разрешается переключать ТОЛЬКО при выключенном двигателе).

Включите двигатель тумблерами «Сеть» и «Дв» на пульте управления; при этом загорится индикатор, указывающий направление движения («←» или «→») и зеркало начнёт движение от ФЭУ.

Проследите за работой схемы управления двигателем при 2–3 изменениях направления движения зеркала.

Частотомер должен запускаться в начале рабочего хода зеркала (не позже одного полного оборота ходового винта) и останавливаться после совершения полных 32 оборотов винта (близко к концу рабочего хода, но, тем не менее, до его завершения). Для наблюдения за согласованностью функционирования частотомера и блока управления на переднюю панель последнего выведен индикатор «Счёт» — неоновая лампочка, загорающаяся в момент команды на запуск счёта и гаснущая при команде на его остановку. Таким образом, при правильной работе пуск частотомера должен выполняться в момент загорания этого индикатора, а

остановка частотомера – при его погасании. Иными словами, индикаторы «Счёт» частотомера и блока управления должны загораться и гаснуть одновременно.

В случае каких-либо отклонений в ходе процесса (отсутствия или слишком позднего запуска частотомера, отсутствия остановки счёта до окончания рабочего хода, асинхронности работы частотомера и индикатора «Счёт» блока управления) сбойный цикл следует пропустить, а схему привести в исходное положение (для чего нажать кнопку «Сброс» блока управления и кнопки «Стоп» и «Сброс» частотомера), после чего ожидать начала следующего рабочего цикла установки. Показания частотомера в сбойном цикле следует считать ошибочными, они не фиксируются в протоколе измерений и не используются при обработке результатов. При необходимости для ускорения работы можно принудительно вернуть зеркало к началу рабочего хода кнопками переключения направления его движения.

Если вы обнаружите сбой в работе аппаратуры, обратитесь к преподавателю или лаборанту.²

5. Определите по табло частотомера число колец N , прошедших через центр экрана (через вход «ФЭУ») за время движения зеркала. В выбранном режиме работы частотомер включается при отходе зеркала от контакта K_2 и выключается после 32-го оборота ходового винта. Перемещение зеркала $l = 32$ мм. Запуск частотомера происходит автоматически: после вспышки индикатора «→» (движение от экрана) загорается лампочка селектора частотомера и начинается отсчёт.

Проведите измерения числа интерференционных полос N , проходящих через центр экрана, не менее 10 раз. Отключите двигатель.

По результатам этих измерений найдите длину волны лазерного излучения, используя формулу (2.70) Введения ($l = vT = N\lambda/2$) и оцените ошибку.

Сравните полученный результат с паспортным: $\lambda = 6328 \text{ \AA}$.

IV. Исследование эффекта Доплера

Измерения сводятся к определению частоты колебаний интенсивности света на входе ФЭУ при движении зеркала и определению скорости этого движения. Для проверки результатов измерений используется формула (2.70).

При измерении частоты частотомер работает в режиме измерения частоты, при измерении скорости — в режиме измерения времени (скорость рассчитывается по времени, которое требуется для перемещения зеркала на расстояние $l = 32$ мм).

1. При измерении времени передвижения зеркала переключатель «Род работы» ставится в положение «интерв. В-Г», переключатель «Метки времени» — в положение 1 mS (т.е. время движения зеркала измеряется в миллисекундах).

² Возможные сбои: 1) счётчик числа колец не включается; 2) счётчик не выключается после прохождения 32-х см (не гаснет кнопка «счёт» на частотомере); в этом случае следует выключить и снова включить двигатель тумблером «Дв».

Чтобы измерить доплеровское смещение частоты, переключатель «Род работы» устанавливается в положение «Частота А», переключатель «Время счёта-множитель» — в положение 10^3 , кнопка ручной работы отжата. Вращением ручки «Время индикации» подбирается удобное для наблюдения время, в течение которого измеренное значение частоты высвечивается на табло ($\sim 2-3$ с). Если флуктуация частоты велика, можно использовать режим счёта импульсов за время движения зеркала — это даёт усреднённую частоту.

2. Установите максимальную скорость передвижения зеркала (рычаг регулятора скорости — в положение 1). Включите двигатель.
3. При выбранном значении скорости сначала измерьте время передвижения зеркала на расстояние l , затем доплеровскую частоту — частоту изменения яркости света, падающего на ФЭУ (число полос, проходящих через ФЭУ за 1 с). Повторите измерения столько раз, сколько необходимо, чтобы погрешность измерения этих величин не превышала 2%.
4. Повторите измерения ещё для 2–3-х значений скорости передвижения зеркала (переключать регулятор ТОЛЬКО при выключенном двигателе!).
5. При остановленном двигателе измерьте частоту дрожания картины. Сравните с изменением доплеровской частоты во время движения (скорость двигателя флуктуирует).
6. Постройте график доплеровской частоты в зависимости от скорости передвижения зеркала. Используйте полученные результаты для определения длины световой волны. Совпадает ли найденное вами значение с длиной волны, определённой в предыдущем упражнении?
7. Выключите тумблер «Сеть» частотомера. В тот момент, когда зеркало находится приблизительно посередине между контактами K_1 и K_2 , выключите двигатель (тумблеры «Дв» и «Сеть» на пульте управления). Установите рычаг переключения скорости редуктора в положение 1.

Выключите напряжение на блоке питания.

12-V-2016 г.