

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

А.В. Косоголов, Л.Л. Литвиненко, А.В. Семиколенов

КОЛЬЦА НЬЮТОНА

*Методические указания к лабораторной работе О-74
по курсу общей физики*

Под редакцией *В.И. Вишнякова*

М о с к в а

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

2014

УДК 535.41
ББК 22.343.4
К

Рецензент

Косогоров А.В., Литвиненко Л.Л., А.В. Семиколенов

Кольца Ньютона: Метод. указания к лабораторной работе № О - 74 по курсу общей физики/ Под ред. В.И. Вишнякова – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – с.: ил.

Изложены основные теоретические сведения об интерференции света от двух когерентных источников света и интерференции на тонкой воздушной прослойке между выпуклой поверхностью плоско-выпуклой линзы и плоской стеклянной пластинкой, необходимые для выполнения лабораторной работы. Описана лабораторная установка, даны указания по проведению измерений и обработке их результатов.

Для студентов 2-го курса всех специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 535.41
ББК 22.343.4

Цель работы – измерение в установке «Кольца Ньютона» диаметров интерференционных колец для разных длин световых волн и определение длин волн монохроматического света при известном радиусе кривизны плоско-выпуклой линзы.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Интерференция световых волн

Если две световые волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания напряжённости электрического поля одинакового направления:

$$E_{01} \cos(\omega t + \varphi_{01}) \text{ и } E_{02} \cos(\omega t + \varphi_{02}), \quad (1)$$

то амплитуда результирующего колебания так же, как и для механических волн определяется из выражения

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \delta, \quad (2)$$

где $\delta = \varphi_{02} - \varphi_{01}$.

Если разность фаз δ возбуждаемых волнами колебаний остаётся постоянной во времени, то волны называют **когерентными**.

Для некогерентных волн δ непрерывно меняется, принимая с равной вероятностью любые значения, вследствие чего $\langle \cos \delta \rangle = 0$ и

$$\langle E_0^2 \rangle = \langle E_{01}^2 \rangle + \langle E_{02}^2 \rangle \Rightarrow I = I_1 + I_2, \quad (3)$$

где I, I_1, I_2 - интенсивности световых волн.

В случае когерентных волн

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

В тех точках пространства, для которых $\cos \delta > 0$ имеем $I < I_1 + I_2$, а там, где $\cos \delta < 0 \Rightarrow I < I_1 + I_2$.

Интерференцией световых волн называют явление появления максимумов интенсивности света в одних точках пространства и минимумов в других.

Особенно чётко проявляется интерференция при $I_1 = I_2$. Тогда в максимумах $I = I_1$, а в минимумах $I = 0$.

Получить интерференционную картину от нескольких естественных источников света нельзя, т.к. такие источники всегда не когерентны.

Наблюдать интерференцию можно, если разделить с помощью отражений или преломлений волну, излучаемую одним источником, на две части, заставить эти две волны пройти разные оптические пути, а потом наложить друг на друга.

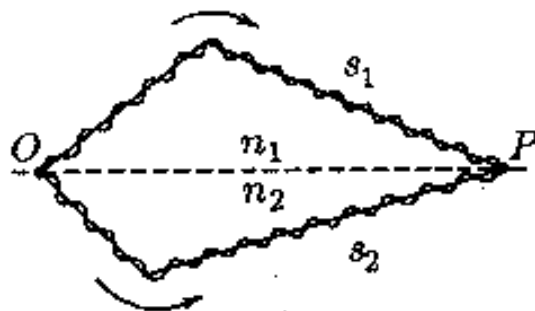


Рис. 1

Пусть разделение на две когерентные волны происходит в точке O . До т. P первая волна проходит в среде с показателем преломления n_1 путь s_1 , вторая волна проходит в среде с показателем преломления n_2 путь s_2 (рис. 1).

Если в т. O фаза колебаний равна ωt , то разность фаз колебаний, возбуждаемых в т. P

$$\delta = \omega \left(\frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \frac{\omega}{c} (n_2 s_2 - n_1 s_1) = \frac{2\pi\nu}{c} (n_2 s_2 - n_1 s_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (5)$$

где λ_0 - длина волны в вакууме;

$\Delta = (n_2 s_2 - n_1 s_1)$ - оптическая разность хода.

Условие максимума (волны приходят в т. P в одной фазе):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta = \pm m \cdot \lambda_0 \quad (m = 0; 1; 2; \dots) \\ \delta = \pm m \cdot 2\pi \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Условие минимума (волны приходят в т. P в противофазе):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta = \pm(2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0; 1; 2; \dots) \\ \delta = \pm(2m+1) \cdot \pi \end{array} \right\}. \quad (7)$$

На практике наблюдать интерференционную картину часто можно при отражении света от тонких пластинок или плёнок переменной толщины или от поверхностей воздушного клиновидного зазора между поверхностями двух прозрачных предметов. При наблюдении интерференции в естественном свете толщина пластинки или зазора для соблюдения условий пространственной и временной когерентности не должна превышать несколько сотых миллиметра ($\sim 0,05$ мм). При использовании лазера наблюдать интерференцию можно при значительно большей толщине пластинки.

Интерференционные полосы, наблюдаемые при освещении пластинки переменной толщины параллельным пучком света, называют полосами равной толщины.

Интерференция от тонких плёнок может наблюдаться не только в отражённом, но и в проходящем свете.

Кольца Ньютона

Кольцами Ньютона называют кольцевые интерференционные полосы равной толщины, наблюдаемые при отражении света от поверхностей воздушного зазора между стеклянной пластиной и соприкасающейся с ней плоско-выпуклой линзой (рис. 2).

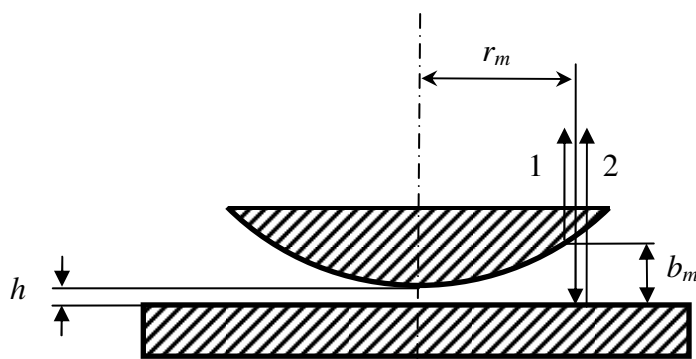


Рис. 2

Луч 1 отражается от нижней поверхности линзы и интерферирует с лучом 2, отражённым от верхней поверхности стеклянной пластины. Если контакт не идеальный, то надо принимать во внимание толщину зазора h . Если, например, имеется пылинка между линзой и стеклянной пластиной то $h > 0$ и $h < 0$ если линзу очень сильно прижать к пластине.

При нормальном падении света и идеальном контакте ($h = 0$) в центре интерференционной картины находится тёмное пятно при наблюдении в отражённом свете (светлое пятно в проходящем свете) – минимум нулевого порядка ($m = 0$). Пятно окружено системой чередующихся светлых и тёмных колец, ширина и интенсивность которых постепенно убывают по мере удаления от центрального пятна.

Геометрическая разность хода интерферирующих лучей – $(2b_m + h)$.
Оптическая разность хода

$$\Delta = 2(b_m + h) + \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

Дополнительная разность оптического хода $\frac{\lambda}{2}$ возникает из-за того, что луч, отражённый от поверхности стеклянной пластины испытывает фазовый сдвиг на π так как отражается от оптически более плотной среды, проходя через воздух – оптически менее плотную среду.

Для получения m -го тёмного интерференционного кольца в отражённом свете или светлого кольца в проходящем должно выполняться условие (7). Тогда

$$2(b_m + h) = m \lambda. \quad (9)$$

Радиус m -го кольца при идеальном контакте ($h=0$) определяется в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.

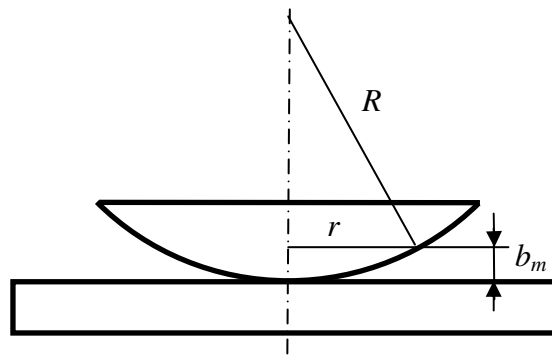


Рис. 3

По теореме Пифагора $r_m^2 = R^2 - (R - b_m)^2$. Учитывая, что $b_m \ll R$ получаем

$$r_m^2 = 2Rb_m. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что

$$r_m^2 = m R \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

Зная радиус кривизны линзы R , и произведя замеры радиусов интерференционных колец можно определить длину волны монохроматического света

$$\lambda = \frac{r_m^2}{m R}. \quad (12)$$

Если контакт не идеальный $h \neq 0$, то

$$r_m^2 = m R \lambda \pm 2 R h . \quad (13)$$

В этом случае длина волны определяется по тангенсу угла наклона графика функции $r_m^2 = f(m)$.

Отметим, что в приведённых выше расчётах для колец Ньютона не учитывается влияние света, отражающегося от плоской поверхности линзы и задней поверхности стеклянной пластины. Как отмечалось выше толщина тонкой пластинки или зазора не должна превышать 0,05 мм для выполнения условия пространственно-временной когерентности интерферирующих волн не лазерных источников света. Толщина линзы и стеклянной пластины в экспериментах с кольцами Ньютона значительно больше этой величины.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание экспериментальной установки

Внешний вид установки показан на рис. 4.

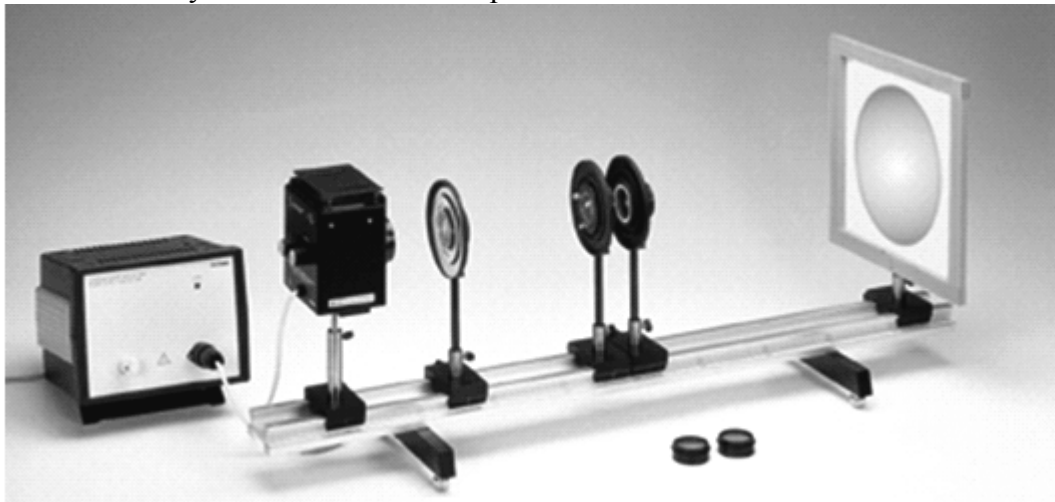


Рис. 4

На оптическую скамью установлены:

- фонарь с ртутной лампой высокого давления, снабжённый двойным конденсором (фокусное расстояние 60 мм),
- держатель объектива светофильтра,
- оптический объект для получения колец Ньютона (плосковыпуклая линза, прижатая тремя регулировочными винтами к стеклянной пластине),
- держатель объектива с фокусным расстоянием 50 мм,
- экран, расположенный на расстоянии 40 см от объектива.

В состав установки входит также блок питания ртутной лампы, который подключается к электросети с помощью сетевого шнура, вставленного в разъём на задней панели устройства. Ртутная лампа подключается специальным кабелем к четырёхштырьковому разъёму (3) с заземлением, расположенному на передней панели блока питания (рис.5).

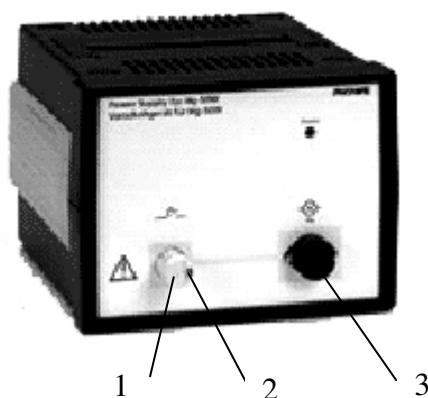


Рис. 5

Внимание:

- нельзя использовать мобильные телефоны и другие гаджеты в непосредственной близости от экспериментальной установки (не ближе чем 2 м);
- блок питания должен быть установлен так, чтобы легко были доступны выключатель on/off и сетевой шнур;
- нельзя закрывать вентиляционные отверстия;
- нельзя допускать попадания в вентиляционные отверстия какой-либо жидкости.

Порядок выполнения эксперимента и обработки результатов измерений

1. Ознакомьтесь с основными элементами экспериментальной установки и убедитесь в отсутствии видимых признаков повреждений приборов и шнура питания.

2. Закрепите на экране чистый лист белой бумаги.

3. Выключателем, находящимся на задней панели блока питания включите ртутную лампу. Лампа загорается сразу или через несколько секунд. Если лампа не загорается, проверьте, находится ли в рабочем положении кнопка тепловой защиты 1 (рис. 5).

Примечание: при перегреве лампы срабатывает тепловая защита (выходит кнопка 1) и для повторного включения ртутной лампы требуется некоторое время, необходимое для её охлаждения. Если лампа не включается, несмотря на охлаждение до нормальной температуры обратитесь к инженеру-лаборанту.

4. Не вставляя в держатель цветные фильтры, произведите **в присутствии инженера-лаборанта** регулировку установки для получения на экране интерференционных колец. Поворачивая три регулировочных винта на оптическом объекте, установите светлое пятно в центре интерференционных колец в середине экрана. При проведении этой настройки все регулировочные винты должны быть надёжно затянуты, чтобы обеспечить касание поверхностей линзы и стеклянной пластины.

5. Установите в держатель жёлтый фильтр и нанесите на экране в виде яркой точки положение центра светлого пятна. При помощи линейки проведите карандашом через эту точку прямую линию и нанесите на ней положение светлых интерференционных колец.

6. Снимите с экрана бумажный лист и измерьте диаметры D_m^* колец. Диаметры следует измерять с точностью не менее ± 1 мм.

7. По формуле $r_m = \frac{D_m^*}{2k}$ рассчитайте радиусы колец Ньютона ($k = 7$ – коэффициент увеличения объектива $F = 50$ мм) и их квадраты. Полученные данные внесите в табл. 1.

Таблица 1

Номер кольца m	Диаметр кольца D_m^* , мм	Радиус кольца r_m , мм	Квадрат радиуса r_m^2 , мм ²
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

8. Повторите действия указанные в пунктах 5., 6 и 7. для зелёного и синего светофильтров.

9. Постройте графики функции $r_m^2 = f(m)$ для жёлтого, зелёного и синего светофильтров. Типичный вид таких графиков приведён на рис. 6.

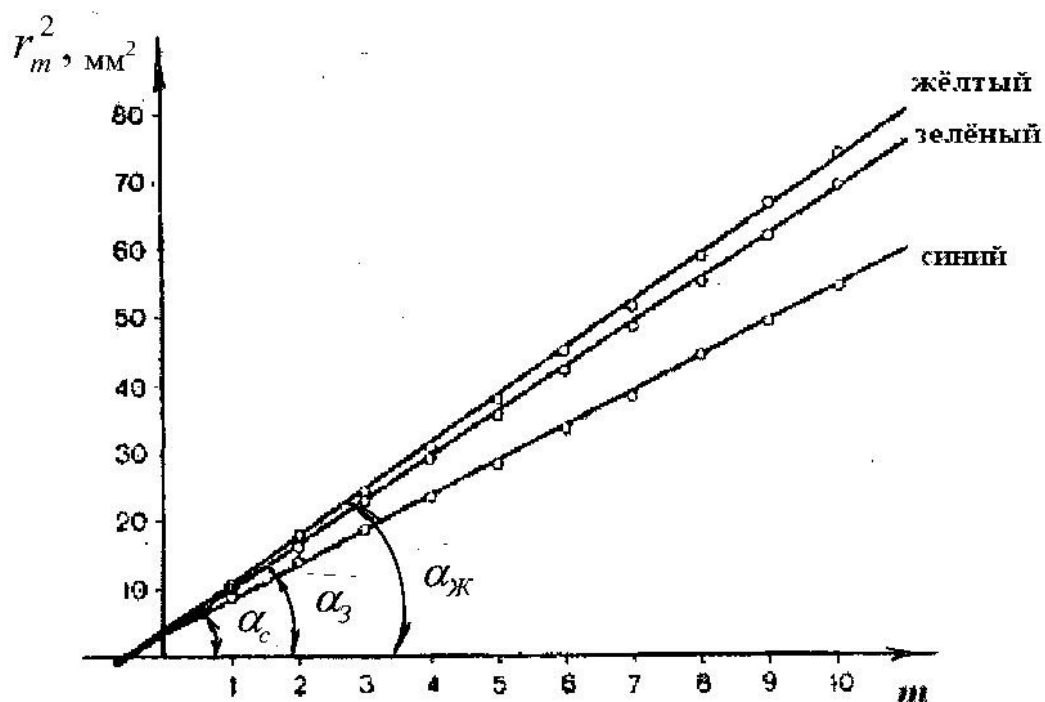


Рис. 6

9. По формуле $\langle \lambda \rangle = \frac{\text{tg } \alpha}{R}$ рассчитайте средние значения длин волн для жёлтого, зелёного и синего светофильтров.

Здесь $R = 12141$ мм – радиус кривизны плосковыпуклой линзы;

$$\text{tg } \alpha = \frac{\Delta r_m^2}{\Delta m}. \text{ Рекомендуется взять } \Delta m = (8 - 2) = 6.$$

10. Рассчитайте погрешность измерения длины волны по формуле $\Delta\lambda = \lambda \cdot \frac{\Delta(\Delta r_m^2)}{\Delta r_m^2}$, где $\Delta(\Delta r_m^2) = 1$ мм.

Результаты измерений длин волн представьте в виде $\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta\lambda$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается оптическая разность хода двух волн от геометрической разности хода?
2. Каковы условия интерференционных максимумов и минимумов для оптической разности хода и разности фаз?
3. При каких условиях образуются интерференционные полосы равной толщины и равного наклона? К какому типу полос относятся кольца Ньютона?
4. Чем отличаются кольца Ньютона, наблюдаемые в отражённом свете, от колец, наблюдаемых в проходящем свете?
5. Как изменяются радиусы колец Ньютона при не идеальном контакте между стеклянными поверхностями линзы и пластины?
6. Как изменятся радиусы колец Ньютона, если воздух между линзой и пластиной заменить водой?
7. При помощи формулы тонкой линзы получите значение коэффициента увеличения для данной установки (фокусное расстояние объектива – 50 мм, расстояние от объектива до экрана – 40 см).

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иродов И.Е.* Волновые процессы. Основные законы: Учеб. Пособие для вузов – 2-е изд., дополн. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 263 с.:
2. *Литвинов О.С., Горелик В.С.* Электромагнитные волны и оптика. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2006. 447 с.