

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

**Цель работы:** определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона.

**Приборы и принадлежности:** оптическая система, включающая плосковыпуклую линзу и плоскопараллельную пластинку; микроскоп с окулярной шкалой и источником света; два светофильтра (красный и зеленый).

**Объект измерений:** диаметр колец Ньютона.

**Средства измерений:** микроскоп с окулярной шкалой.

### 1. Теоретическая часть

В работе изучается явление интерференции монохроматического света с помощью колец Ньютона.

**Интерференция света** — это явление, которое наблюдается при суперпозиции (независимом наложении) когерентных электромагнитных волн и сопровождается перераспределением светового потока в пространстве.

При рассмотрении интерференции используют энергетическую характеристику, называемую *интенсивностью* света (электромагнитных колебаний, электромагнитных волн). Интенсивность электромагнитной волны  $I$  пропорциональна среднему по времени значению квадрата амплитуды колебаний  $E_0$  вектора напряженности электромагнитного поля:

$$I \sim \langle E_0^2 \rangle. \quad (1)$$

Результат интерференции проявляется в виде чередования максимумов и минимумов интенсивности света в пространстве и называется *интерференционной картиной*. Соответственно параметрами интерференционной картины являются положение ее максимумов и минимумов и ширина получаемых светлых и темных полос.

Необходимым условием интерференции световых волн является их когерентность. *Когерентность* — согласованное протекание во времени и в пространстве нескольких волновых процессов. Волновые процессы называются *когерентными*, если разность их фаз не зависит от времени.

Рассмотрим случай наложения в пространстве двух когерентных электромагнитных волн, которые возбуждают в некоторой точке два колебания (колебания вектора  $\mathbf{E}^*$ ) одинакового направления:

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t + \varphi_{01}), \quad (2)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t + \varphi_{02}). \quad (3)$$

Здесь  $E_{01}$  и  $E_{02}$  — амплитуды колебаний векторов напряженности электрического поля первой и второй волны соответственно;  $\omega$  — круговая частота колебаний;  $\varphi_{01}$  и  $\varphi_{02}$  — начальные фазы колебаний в рассматриваемой точке, не зависящие от времени.

Амплитуда результирующего колебания вектора  $\mathbf{E}$  в данной точке будет определяться результатом их суперпозиции с помощью векторной диаграммы:

$$E_0 = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_{01} - \varphi_{02})}. \quad (4)$$

В формулу (4) входит величина разности начальных фаз складываемых колебаний в рассматриваемой точке. Но поскольку начальные фазы от времени не зависят, то и разность фаз ( $\varphi_{01} - \varphi_{02}$ ) остается постоянной во времени, а значит, и амплитуда  $E_0$  тоже.

По формулам (1) и (4) получим выражением для результирующей интенсивности света в данной точке пространства:

$$I_0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_{01} - \varphi_{02}). \quad (5)$$

Разность фаз для когерентных волн имеет постоянное во времени значение, но свое для каждой точки пространства, поэтому величина  $I_0$  тоже будет меняться в пространстве и зависеть исключительно от нее.

В формуле (5) последнее слагаемое называется *интерференционным членом*. Это слагаемое обращается в ноль в случае, когда волны не когерентны, то есть не интерферируют. В этом случае

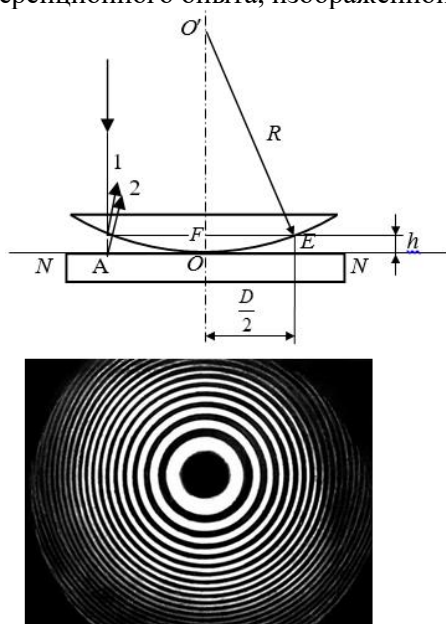
---

\* Векторы выделены полужирным начертанием.

значение разности фаз ( $\varphi_{01} - \varphi_{02}$ ) непрерывно изменяется во времени, принимая случайные значения в интервале  $2\pi$ , и среднее по времени значение косинуса в интерференционном члене будет равно нулю. В результате никакой интерференционной картины не возникает, а наблюдаемая интенсивность света во всех точках пространства представляется просто суммой интенсивностей двух волн:  $I_0 = I_1 + I_2$ .

При интерференции же происходит перераспределение интенсивности света в пространстве: в одних местах возникают максимумы, в других – минимумы интенсивности. В случае одинаковой интенсивности интерферирующих волн ( $I_1 = I_2$ ) в максимумах  $I_0 = 4I$ , в минимумах  $I_0 = 0$ .

**Кольца Ньютона.** Интерференционная картина в виде колец является частным случаем полос равной толщины. Полосы равной толщины возникают в результате интерференции света от мест одинаковой толщины, что реализуется при использовании схемы интерференционного опыта, изображенной на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема опыта для получения колец Ньютона в отраженном свете и получаемая интерференционная картина

При наблюдении в *отраженном свете* интерференционная картина имеет вид концентрических темных и светлых колец (рис. 1): в центре находится темное пятно, которое окружено системой чередующихся темных и светлых колец, ширина и интенсивность которых постепенно убывают по мере удаления от центрального пятна. В *проходящем свете* наблюдается интерференционная картина, в которой центральное пятно светлое, следующее кольцо темное и т. д.

Интерференционные картины в отраженном и проходящем свете дополняют друг друга, иначе говоря, при их наложении получается однородная светящаяся поверхность.

Оптическая разность хода<sup>†</sup> лучей  $\Delta$ , отраженных от верхней (луч 1) и нижней (луч 2) поверхностей воздушного клина, определяется его удвоенной толщиной  $2h$  (показатель преломления воздуха  $n \approx 1$ ). Кроме того, следует учесть, что при отражении волны от оптически более плотной среды (большой  $n$ ) на границе  $NN$  воздух – стекло (точка А), то есть от пластины, фаза ее меняется скачком на  $\pi$  радиан, что соответствует возникновению дополнительной разности хода между лучами  $\lambda/2$ .

Полная разность хода  $\Delta$  будет, таким образом, складываться из удвоенной толщины клина и половины длины волны:

$$\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Интенсивность интерферирующих лучей будет минимальной в тех точках, для которых  $\Delta$  равняется нечетному числу полуволн:

$$\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$  – порядок максимума интерференции. Таким образом, минимум интенсивности будет наблюдаться для всех точек воздушного слоя, образующих кольцо с толщиной:

$$h = m\frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

---

<sup>†</sup> **Оптическая разность хода** — это разность оптических длин путей, проходимых волнами. В однородной среде оптическая длина пути равна произведению геометрической длины пути, пройденного волной, на показатель преломления среды.

В месте соприкосновения линзы с пластиной остается очень маленькая воздушная прослойка, толщина которой гораздо меньше длины волны, поэтому в формуле (6)  $2h \approx 0$ , и разность хода  $\Delta$  равна только  $\lambda/2$  за счет добавления полуволны при отражении от оптически более плотной среды (стеклянной пластинки). В результате в отраженном свете в центре интерференционной картины наблюдается минимум освещенности, то есть темное пятно.

Найдем связь между радиусом кривизны линзы  $R$ , диаметром кольца в интерференционной картине  $D$  и длиной световой волны  $\lambda$ . Из треугольника  $O'FE$  (рис. 1) для кольца с номером  $m$  выполняется соотношение:

$$R^2 = \frac{D_m^2}{4} + (R - h_m)^2, \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{D_m^2}{4} + R^2 - 2Rh_m + h_m^2. \quad (10)$$

Считая  $h_m^2$  малым по сравнению с  $2Rh_m$ , преобразуем (10):

$$h_m = \frac{D_m^2}{8R}. \quad (11)$$

Решая совместно уравнения (8) и (11), находим:

$$\lambda = \frac{D_m^2}{4mR}. \quad (12)$$

Практически, вследствие упругой деформации стекла, невозможно добиться идеального соприкосновения линзы с пластиной в одной точке, поэтому для получения более точного результата следует вычислять  $\lambda$  не по одному кольцу, а путем сравнения диаметров двух колец по формуле:

$$\lambda = \frac{(D_p + D_m)(D_p - D_m)}{4(p - m)R}, \quad (13)$$

где  $p$  и  $m$  – номера темных колец;  $D_p$  и  $D_m$  – их диаметры.

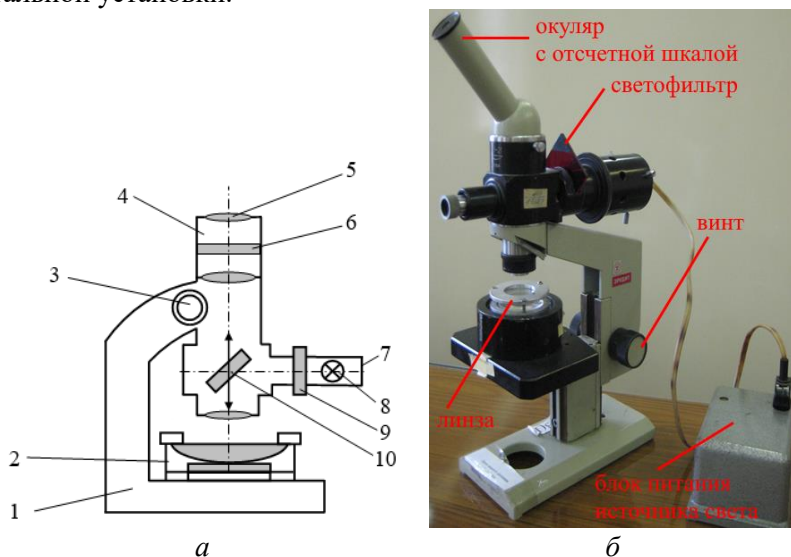
Радиус кривизны линзы тогда находится по формуле:

$$R = \frac{(D_p + D_m)(D_p - D_m)}{4(p - m)\lambda}. \quad (14)$$

В данной работе, применяя формулу (14), сначала определяют радиус кривизны неизвестной линзы при известной длине волны красного света  $\lambda$ . Затем по формуле (13) определяют длину волны другого монохроматического света (зеленого). Для получения монохроматического света (красный и зеленый) используются лампа накаливания и соответствующие светофильтры.

## 2. Методика проведения измерений и описание установки

Для исследования интерференционной картины колец Ньютона используется экспериментальная установка, выполненная на базе измерительного микроскопа со сменными светофильтрами. На рис. 2 представлены схема и общий вид экспериментальной установки.



**Рис. 2.** Экспериментальная установка:  
а – схема, б – общий вид.

На столик измерительного микроскопа **1** помещают оптическую систему, состоящую из плосковыпуклой линзы, установленной на плоскопараллельной пластине в оправе **2**. С помощью винта **3** перемещением тубуса **4** микроскопа по вертикали добиваются резкости интерференционной картины, наблюдаемой

в окуляре **5**. Для определения диаметров колец Ньютона используется отсчетная шкала **6** (окулярный микрометр). Цена деления шкалы указана на микроскопе. Перемещением оптической системы **2** на столике добиваются того, чтобы получаемые кольца интерференции наблюдались в поле зрения микроскопа. Для получения необходимого освещения поверхности линзы к тубусу измерительного микроскопа приделана камера **7**. В ней помещается источник света **8** (лампа накаливания) и поставленная под углом  $45^\circ$  к оси микроскопа полупрозрачная пластина **10**. В камере **7** имеется отверстие для светофильтров **9**, применяемых для получения из пучка белого света, создаваемого лампой накаливания, монохроматического света с разной длиной волны.

### **3. Порядок выполнения работы**

#### **а) проведение измерений в лаборатории**

1. Подготовьте микроскоп к работе: включите лампу накаливания **8** и в тубусе **4** микроскопа в отверстие для светофильтров **9** установите *красный* светофильтр.

2. На столик микроскопа **1** поместите оптическую систему **2** – оправку с линзой и стеклянной пластиной.

3. Перемещением оптической системы **2** на столике микроскопа **1** добейтесь того, чтобы в поле зрения микроскопа наблюдались интерференционные кольца, располагающиеся концентрично относительно поля зрения микроскопа, а отсчетная шкала **6** проходила через их центр. Перемещением тубуса микроскопа винтом **3** по вертикали добейтесь резкости интерференционной картины.

4. Измерьте диаметры первых четырех темных колец в двух взаимно перпендикулярных направлениях, поворачивая окуляр **5** с отсчетной шкалой на  $90^\circ$ . Сначала проведите измерения диаметров четырех колец в одном направлении (левый и правый край), затем поверните окуляр со шкалой на  $90^\circ$  и измерьте диаметры колец в другом направлении (верхний и нижний край).

5. Запишите в таблицу 1 числовые отметки шкалы, относящиеся к двум точкам диаметра каждого темного кольца. Темное пятно в середине соответствует нулевому порядку  $m = 0$ .

6. На пути лучей от лампы накаливания установите зеленый светофильтр. Повторите измерение диаметров колец в двух взаимно перпендикулярных направлениях так же как в пункте 4.

Данные измерений занесите в таблицу 1.

7. Покажите заполненную таблицу 1 преподавателю.

### **б) обработка результатов измерений**

9. Рассчитайте диаметры измеренных колец в делениях окулярной шкалы и переведите их в миллиметры.

10. Вычислите радиус кривизны линзы по формуле (14) для красного светофильтра. Длину волны считайте равной 0,68 мкм. Кольца группируйте так: первое с четвертым; второе с третьим. Результаты расчета занесите в таблицу 2.

11. Вычислите среднее значение радиуса кривизны линзы в мм.

12. Пользуясь вычисленным средним значением радиуса кривизны линзы, рассчитайте по формуле (13) длину волны зеленого света.

13. Для одного из расчетов радиуса кривизны линзы определите относительную погрешность измерения по формуле:

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta D_p + \Delta D_m}{D_p + D_m} + \frac{\Delta D_p + \Delta D_m}{D_p - D_m}, \quad (15)$$

считая  $\Delta \lambda = 0,04$  мкм, а  $\Delta D_p$  и  $\Delta D_m$  определяя из точности измерений  $D_p$  и  $D_m$ .

14. Пользуясь вычисленным значением относительной погрешности измерения радиуса кривизны линзы, рассчитайте относительную погрешность измерения длины волны зеленого света по формуле:

$$\delta \lambda = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta D_p + \Delta D_m}{D_p + D_m} + \frac{\Delta D_p + \Delta D_m}{D_p - D_m}. \quad (16)$$

15. Запишите окончательные результаты для радиуса кривизны линзы и длины волны зеленого цвета с учетом погрешностей их определения.



Таблица 1

Измеренные диаметры колец Ньютона для двух светофильтров

Цена деления измерительной шкалы (мм/дел)						
Светофильтр	Номер кольца	Числовые отметки точек, лежащих на диаметре темного кольца (деления шкалы)		Диаметры колец (деления шкалы)	Средний диаметр колец (деления шкалы)	Средний диаметр колец (мм)
		Левый край кольца	Правый край кольца			
		Верхний край кольца	Нижний край кольца			
КРАСНЫЙ ( $\lambda = 0,68$ мкм)	1					
	2					
	3					
	4					
ЗЕЛЁНЫЙ ( $\lambda$ нужно определить)	1					
	2					
	3					
	4					

Таблица 2

## Определение радиуса кривизны линзы

Свето- фильтр	$\lambda$ , мкм	$p$	$m$	$p - m$	$D_p$	$D_m$	$D_p + D_m$	$D_p - D_m$	$R$ , мм
Красный	0,68	4	1						
		3	2						
Зеленый $\lambda =$		4	1						
		3	2						

## Контрольные вопросы

1. Что называется интерференцией света?
2. Какое условие является необходимым для получения интерференционной картины при сложении двух световых потоков?
3. Каким образом можно получить когерентные световые потоки?
4. Чем отличается оптическая разность хода двух волн от геометрической?
5. Дайте вывод формулы для расчета радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона.
6. Как изменится интерференционная картина, если ее наблюдать без светофильтров?
7. Сформулируйте условия, при которых интерферирующие лучи взаимно усиливают друг друга и взаимно ослабляют друг друга.
8. Как изменится интерференционная картина, если ее наблюдать не в отраженном, а в проходящем свете?
9. Как изменятся радиусы колец Ньютона, если воздух между линзой и пластиной заменить водой?
10. Почему для получения колец Ньютона радиус кривизны  $R$  применяемой линзы должен быть большим?

## Список литературы

В качестве литературы для изучения явления интерференции и в частности схемы с кольцами Ньютона рекомендуется: [1, § 4.1–4.4; 2, § 172–174]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 тт. Т. 4. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2021. 256 с.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2020. 557 с.