

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 45

### НАБЛЮДЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

**Цель работы** – изучение интерференции света при наблюдении колец Ньютона, определение радиуса кривизны плоско-выпуклой линзы.

#### 1. Теоретические основы работы

**Интерференцией** называют явление перераспределения энергии световых волн в пространстве, возникающее при наложении двух или более **когерентных** волн (см. примечания<sup>1,3</sup> к работе № 42). В результате интерференции возникает картина, представляющая собой чередование максимумов и минимумов интенсивности света.

Две когерентные волны можно получить двумя способами – **делением фронта** исходной волны и **делением** ее **амплитуды**. И в том и в другом случае исходную волну разделяют на две (которые «автоматически» являются когерентными), организуют разность хода и затем сводят их в месте в некоторой области пространства. В результате в этой области возникает интерференционная картина. Интерференционные картины более отчётливы в **квазимонохроматическом** свете, который получают из белого света с помощью светофильтров.

Получение когерентных волн делением амплитуды реализуется в экспериментальной установке «кольца Ньютона». Интерференционная картина в виде колец Ньютона наблюдаются в случае, когда выпуклая поверхность линзы малой кривизны соприкасается с поверхностью хорошо отполированной пластинки; при этом остающаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от центра к краям. Геометрические места точек, соответствующие одинаковой толщине воздушного зазора, являются окружностями.

Разделение исходной квазимонохроматической волны на две (отражённую  $I'$  и прошедшую  $I''$ ) происходит на сферической поверхности плоско-выпуклой линзы  $P'ON'$ . Далее прошедшая волна  $I''$  отражается от поверхности плоскопараллельной стеклянной пластинки  $PON$  (рис.1). Интерференционная картина возникает при наложении этих двух волн вблизи сферической поверхности линзы.

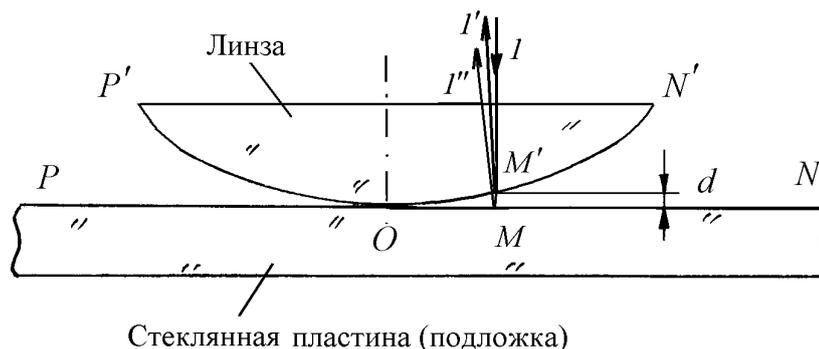


Рис. 1. Схема системы линза - подложка

Геометрическую разность хода  $\Delta$  между лучами  $I'$  и  $I''$  с достаточной степенью точности можно принять равной  $2d$  – удвоенной толщине воздушного зазора.

Определим оптическую разность хода в точках, отстоящих на расстоянии  $r$  от оси симметрии, пользуясь схемой, приведенной на рис. 2.

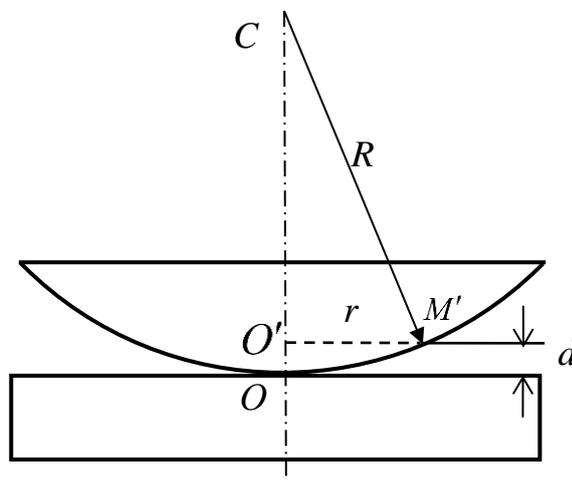


Рис. 2. К расчету оптической разности хода

Из треугольника  $CO'M'$  на рис. 1 (точка  $C$  – геометрический центр сферической поверхности линзы) находим

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 \approx 2Rd. \quad (1)$$

Здесь  $R$  - радиус сферической поверхности линзы,  $r = O'M'$ . Откуда  $2d = r^2/R$ .

Оптическая разность хода  $\Delta$  лучей  $I'$  и  $I''$  равна:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны. Слагаемое  $\lambda/2$  в последнем уравнении учитывает дополнительную разность хода, возникающую из-за того, что отражение от оптически более плотной среды (в точке  $M$  подложки) происходит в противофазе<sup>1</sup>.

Из осевой симметрии следует, что геометрические места постоянной разности хода будут представлять собой систему концентрических колец. Поэтому наблюдаемая интерференционная картина представляет собой чередующиеся светлые и темные кольца, называемые **кольцами Ньютона**. Согласно классификации, кольца Ньютона являются **линиями равной толщины**, где под толщиной понимается соответствующая толщина кольцевого зазора.

Следует отметить, что при прохождении света через систему линза-подложка выполняется закон сохранения энергии, поэтому интерференционные картины, наблюдаемые в отраженном и проходящем свете, являются взаимно дополняющими друг друга. В тех местах, где в

отраженном свете наблюдается максимум интерференции (светлые кольца), в проходящем свете наблюдается минимум (темные кольца). Однако, если в отраженном свете интерферируют пучки примерно одинаковой интенсивности, то в прошедшем – существенно отличающиеся по интенсивности. Поэтому в проходящем свете интерференционная картина будет менее отчетливой и наблюдение проводят, как правило, в отраженном свете.

Радиусы темных колец определяются условиями интерференционных минимумов

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} + m\lambda, \quad (3)$$

где целое число  $m$  – порядок интерференционного минимума.

Радиусы светлых определяются условиями интерференционных максимумов

$$\Delta = k\lambda, \quad (4)$$

где целое число  $k$  – порядок интерференционного максимума.

Из (2) и (3) для радиусов темных колец получим

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}, \quad (5)$$

а для радиусов светлых колец

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

(6)

Здесь  $m$  и  $k = 1, 2, 3 \dots$  – номера темных и светлых колец.

Для темных колец из (5) следует, что

$$\frac{r_m^2}{\lambda} = Rm, \quad (7)$$

т.е. зависимость  $r_m^2 / \lambda$  от номера кольца  $m$  является линейной. Это обстоятельство можно использовать для определения радиуса кривизны линзы  $R$ , как углового коэффициента уравнения прямой, построенной в соответствующих координатах.

Примечание. Конструктивные детали данной установки (между выпуклой поверхностью линзы с стеклом имеется зазор отличный от нуля) приводят к тому, что, в зависимости от положения юстировочных винтов, в центре картины не обязательно находится тёмное пятно, а линейная экстраполяция графика  $r_m^2/\lambda$  в точку  $m=0$  не обязательно даёт  $r_m^2/\lambda$ , что находится в определённом противоречии с приведённой упрощённой теорией. Так как при расчётах радиуса кривизны линзы  $R$  используется только *наклон* данной прямой, то это обстоятельство не приводит к ошибке.

## 2. Описание экспериментальной установки

Схема установки представлена на рис.3. Освещение плоско-выпуклой линзы 2, находящейся в специальной оправе, производится полупроводниковым лазером 1 с длиной волны  $\lambda=650$  нм. Лучи лазера, отражённые от выпуклой поверхности линзы и от плоского стекла, проецируются на экран 3 с коэффициентом увеличения  $\alpha=KL$ , где  $K=0,057$  мм<sup>-1</sup>. Радиусы колец на экране измеряются при помощи шкалы экрана (рис.3).

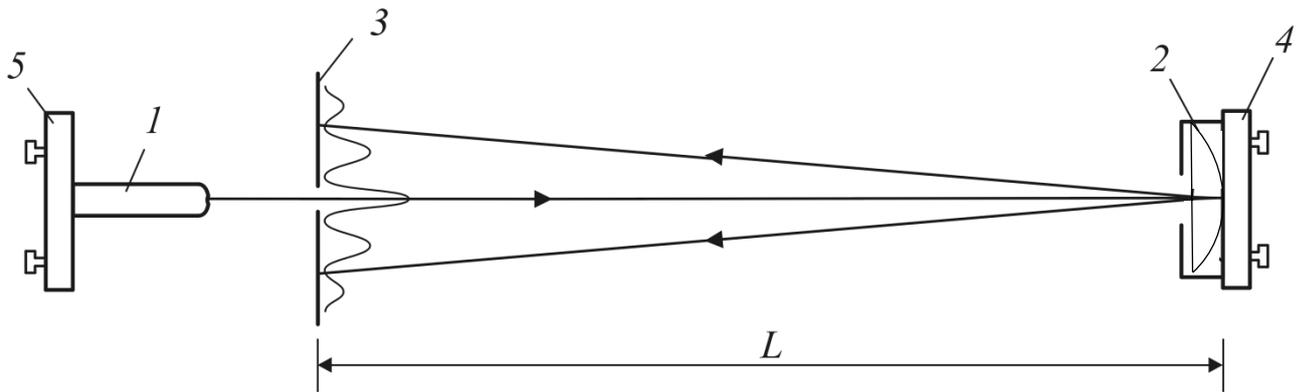


Рис. 2

1 - полупроводниковый лазер  $\lambda=0,65$  мкм

2 - плоско-выпуклая линза в оправе

3 - измерительный экран

4, 5 - юстируемые держатели оптики

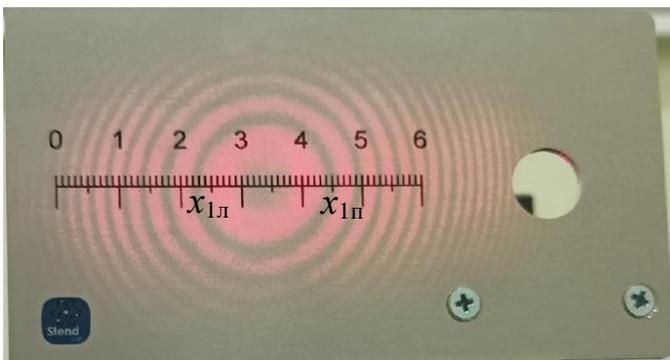


Рис. 3. Измерительная шкала экрана.

## 3. Порядок выполнения работы

Заполните табл. 1 спецификации измерительных приборов. Внесите в протокол данные установки.

## Спецификация измерительных приборов

Таблица 1

Название прибора и его тип	Пределы измерения	Цена деления	Инструментальная погрешность
Линейка	0 – 400 мм	1 мм	0,5 мм
Шкала экрана	0 – 60 мм	1 мм	0,5 мм

### *Данные установки*

Коэффициент увеличения оптической системы установки  $\alpha = KL$ , где  $K=0,057 \text{ мм}^{-1}$ ; рекомендуемое значение  $L=360 \text{ мм}$ .

Длина волны лазера  $\lambda = 650 \text{ нм}$ ;

1. Включите лазер.
2. Убедитесь в наличии на экране интерференционной картины (колец Ньютона), аналогичной рис. 3. При необходимости выполните настройку с помощью преподавателя.
3. Измерьте линейкой расстояние  $L$  между линзой и экраном.
4. При помощи шкалы экрана измерьте правые  $x_{мп}$  и левые  $x_{мл}$  координаты первых пяти колец. Результаты занесите в Таблицу 2.

Таблица 2

Номер кольца $m$		1	2	3	4	5
Координаты колец Ньютона, мм	Справа $x_{мп}$					
	Слева $x_{мл}$					
Диаметр кольца на экране $D_m$ , мм						
Радиус кольца $r_m = \frac{D_m}{2\alpha}$ , мм						
$\frac{r_m^2}{\lambda}$ , мм						

### 4. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте диаметры тёмных колец по формуле  $D_m = x_{мп} - x_{мл}$ . Полученные значения занесите в Таблицу 2.

2. Рассчитайте коэффициент увеличения по формуле  $\alpha = KL$ , где  $K=2,21 \text{ мм}^{-1}$ .

3. Рассчитайте радиусы темных колец по формуле  $r_m = \frac{Dm}{2\alpha}$ . Полученные значения занесите в Таблицу 2.

4. Вычислите отношения  $\frac{r_m^2}{\lambda}$ . Полученные значения занесите в Таблицу 2.

5. Постройте график зависимости  $\frac{r_m^2}{\lambda} = f(m)$ .

5. Проведите линейную аппроксимацию экспериментальных точек на графике.

6. Используя значения коэффициента наклона прямой, определите радиус кривизны линзы  $R$ . Определите погрешность  $\Delta R$ .

7. Запишите окончательный результат в стандартном виде.

## 5. Контрольные вопросы

1. Приведите оптическую схему наблюдения колец Ньютона. Покажите разность хода. Напишите условия минимумов и максимумов интерференции.
2. Приведите оптическую схему наблюдения колец Ньютона. Выведите выражение для радиусов темных колец.
3. Приведите оптическую схему наблюдения колец Ньютона.
4. Что такое интерференция света? Условия наблюдения интерференции. Какие источники излучения называют когерентными?
5. Какие источники света называют монохроматическими?
6. Как изменятся радиусы темных колец, если воздушный промежуток между линзой и стеклянной пластиной заполнить прозрачной жидкостью с коэффициентом преломления  $n > n_{\text{ст}}$ ?
7. Как будут изменяться радиусы темных колец при смещении линзы относительно подложки вверх, т.е. при увеличении зазора?

## Примечание

<sup>1</sup> При отражении нормально падающей волны **вектор Пойнтинга** (вектор плотности потока энергии)  $\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$  меняется на противоположный ( $-\vec{S}$ ). Это возможно, когда на противоположный меняется любой из сомножителей векторного произведения. Из граничных условий (непрерывности на границе раздела сред тангенциальных составляющих  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ ) легко получить, что при отражении от **оптически более плотной** среды на противоположный меняется вектор  $\vec{E}$ , а при отражении от оптически менее плотной – вектор  $\vec{H}$ . Факт отражения волны в противофазе можно формально учесть добавляя к оптической разности хода (или вычитая из неё)  $\lambda/2$ .

**Литература для изучения:**

1. §§ 119, 120, 122 в И.В.Савельев. Курс общей физики: учебное пособие. В 3-х тт. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 6 изд., стер. – СПб.: издательство «Лань», 2006, - 496 с.
2. § 10 в М.К.Губкин, А.В.Кириченко, В.С.Спивак, Ю.Б.Шеркунов. Курс общей физики. Оптика. Атомная физика: конспект лекций: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2008, - 192 с.