

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ  
С ПОМОЩЬЮ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КОЛЕЦ  
НЬЮТОНА**

**Методические указания  
для выполнения лабораторной работы**

Томск  
Издательский Дом Томского государственного университета  
2016

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО методической комиссией  
физического факультета

Протокол № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Председатель комиссии



В. М. Вымятнин

В работе рассматривается интерференция световых волн.  
Дается описание способа определения длины световой волны с  
помощью интерференционных колец Ньютона.

Методические указания рассчитаны на студентов  
нефизических специальностей очной и заочной форм обучения.

Составители: доц. **Н.А. Александров**  
**Н.И. Иванова**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

**Цель работы:** изучение явления интерференции в тонких пленках и определение длины световой волны по интерференционным кольцам Ньютона.

### ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Свет с точки зрения классической электродинамики представляет собой поперечные электромагнитные волны. В электромагнитной волне колеблются два вектора: вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ . Вектор  $\vec{E}$  часто называют световым вектором, т. к. именно им в основном определяется действие света на вещество (фотохимическое, фотоэлектрическое и др.).

Плоскую световую волну можно представить в виде

$$E = E_0 \cos(\omega t - kr + \varphi), \quad (1)$$

где  $E_0$  - амплитуда колебаний светового вектора;

$r$  - расстояние от источника, отсчитываемое вдоль распространения волны;

$\omega = 2\pi\nu$  - циклическая частота колебаний;

$k = 2\pi / \lambda$  - волновое число;

$\varphi$  - начальная фаза колебаний,  $\nu$  и  $\lambda$  - частота и длина волны.

Интенсивностью света в данной точке называют среднее по времени значение светового потока через единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны. Её величина пропорциональна усредненному по времени квадрату амплитуды  $I \sim \langle E_0^2 \rangle$

Волны одинаковой частоты, разность фаз которых постоянна во времени и поляризованные в одной плоскости, называются **когерентными**.

**Интерференцией** волн называют наложение в пространстве двух или нескольких когерентных волн, в результате которого в зависимости от соотношения между фазами этих волн происходит усиление или ослабление результирующей волны.

Пусть интерферируют две когерентные волны

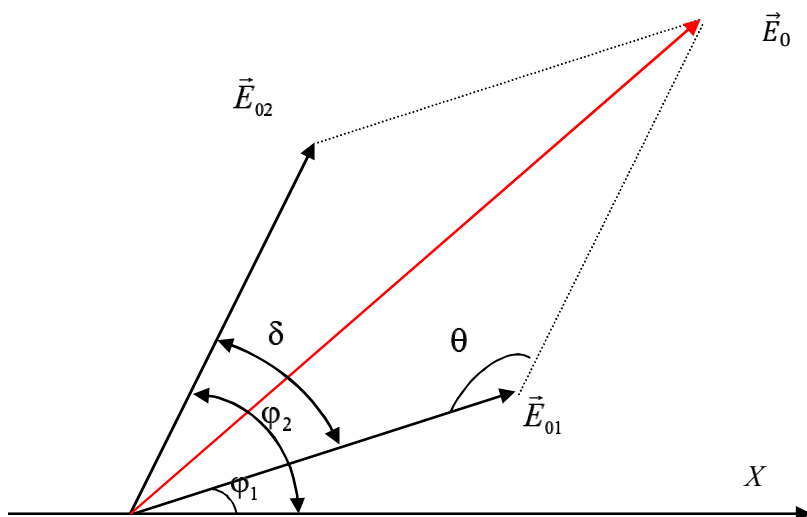


Рис. 1

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \cos(\omega t - kr_1 + \varphi_{01}) \\ E_2 &= E_{02} \cos(\omega t - kr_2 + \varphi_{02}) \end{aligned} \quad (2)$$

где  $r_1, r_2$  - расстояния от источников волн до рассматриваемой точки пространства;  $\varphi_{01}, \varphi_{02}$  - начальные фазы.

Для сложения колебаний воспользуемся методом векторной диаграммы. Как видно из рис.1, согласно теореме косинусов,

амплитуда результирующего колебания будет равна

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 - 2E_{01}E_{02} \cos \theta.$$

Угол  $\theta = \pi - \delta$ , где  $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$  - разность фаз складываемых колебаний. Тогда амплитуда результирующего колебания в данной точке пространства определится выражением:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \delta, \text{ а интенсивность будет равна}$$
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (3)$$

Если  $\delta = 2m\pi$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , то  $\cos \delta = +1$ , тогда интенсивность **максимальна**  $I_{\max} = \left(\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2}\right)^2$ ,

если  $\delta = (2m + 1)\pi$ , то  $\cos \delta = -1$  интенсивность **минимальна**

$$I_{\min} = \left(\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2}\right)^2.$$

Таким образом, при наложении двух монохроматических волн происходит устойчивое во времени перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других минимумы интенсивности.

Из (3) видно, что результат интерференции определяется разностью фаз  $\delta$  интерферирующих волн в точке наблюдения. Как следует из (2), при равенстве начальных фаз, разность фаз волн равна:

$$\delta = \omega t - kr_1 + \varphi_{01} - \omega t + kr_2 - \varphi_{02} = k(r_2 - r_1)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta, \quad (4)$$

где  $\Delta = r_2 - r_1$  - разность хода волн при условии, что показатель преломления среды  $n = 1$ .

При  $n \neq 1$ : величина, равная произведению показателя преломления на геометрическую разность хода, называется оптической разностью хода  $\Delta = n(r_2 - r_1)$ .

Учитывая (4), получим следующее условие **максимума** интерференции:

$$\Delta = m\lambda = 2m \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

Следовательно, *интерференционные максимумы будут наблюдаться при разности хода, равной целому числу длин волн, то есть четному числу полуволн.*

Условие интерференционного **минимума** примет вид:

$$\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

Значит, *интерференционные минимумы будут наблюдаться при разности хода, равной полуцелому числу длин волн, то есть нечетному числу длин полуволн.*

Для получения когерентных волн необходимы когерентные источники. Но независимые когерентные источники практически получить невозможно в силу особенностей излучения волн светящимися телами. Любой источник света состоит из огромного числа атомов и молекул, которые излучают энергию хаотически. Практическое получение когерентных волн оказывается возможным, если волну, излучаемую отдельным источником света разделить на две и направить их в точку сложения по различным направлениям с пройденными расстояниями  $r_1$  и  $r_2$ . Эти волны,

налагаясь друг на друга, могут интерферировать. Принцип получения когерентных волн разделением волны на две или несколько частей может быть осуществлен различными методами: метод Юнга, метод зеркал Френеля, метод биопризмы Френеля, метод тонких пленок и др.

## ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

Рассмотрим интерференцию от тонкой плоскопараллельной пластинки толщиной  $b$ , изготовленной из материала с показателем преломления  $n$  (рис.2). Пусть на эту пластинку из воздуха ( $n_{\text{возд}} \approx 1$ ) падает луч света под углом  $i$  к перпендикуляру в точку  $A$ . Частично свет отражается от верхней поверхности пластинки, частично же проходит до нижней поверхности в точку  $B$  и, отразившись от неё, выходит из пластинки в точке  $C$ . Таким образом, в направлении  $CO$  идут две когерентные волны 1 и 2, которые могут интерферировать. Несложные расчеты позволяют найти оптическую разность хода этих лучей (см. рис.2):

$$\Delta = (AB + BC)n - \left( AD + \frac{\lambda}{2} \right)$$

где  $\lambda$  - длина волны света; величина  $\frac{\lambda}{2}$  представляет собой дополнительную разность хода, возникающую при отражении луча 1 от оптически более плотной среды (пластинка)

$$AB = \frac{b}{\cos \beta}; AD = AC \sin \alpha; AC = 2b \cdot \operatorname{tg} \beta$$

$$\Delta = \frac{2bn}{\cos \beta} - 2b \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \alpha - \frac{\lambda}{2}$$

Из закона преломления  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n; \sin \alpha = n \sin \beta$

$$\Delta = \frac{2bn}{\cos \beta} - \frac{2bn \sin^2 \beta}{\cos \beta} - \frac{\lambda}{2} = \frac{2bn(1 - \sin^2 \beta)}{\cos \beta} - \frac{\lambda}{2}$$

Или окончательно получим выражение для разности хода через углы преломления и падения

$$\Delta = 2bn \cdot \cos \beta - \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}, \quad (8)$$

При освещении пластинки монохроматическим светом и

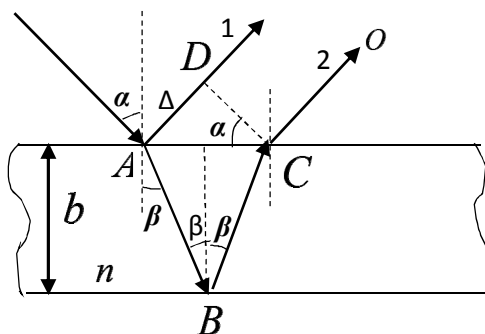


Рис. 2

наблюдении отраженного света, пластинка будет **светлой**, если

$$\Delta = m\lambda = 2m \frac{\lambda}{2}, \text{ и } \mathbf{темной}, \text{ если } \Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Так как согласно (8) величина  $\Delta$  зависит от  $\alpha, n, b$ , то возможны различные случаи.

Если на пластину направляется пучок лучей с различными углами падения ( $\alpha \neq const.$ ), т. е. не параллельный, а расходящийся пучок, то максимум (или минимум) освещенности будет наблюдаться для определенных углов падения. В этом



случае наблюдаемая интерференционная картина получила название **линий равного наклона**.

Если параллельный пучок лучей направляется на пластину переменной толщин ( $b \neq const.$ ), например, в виде клина, то на её поверхности будут наблюдаться полосы, отвечающие участкам определенной толщины. Эту интерференционную картину называют **полосами равной толщины**.

## КОЛЬЦА НЬЮТОНА

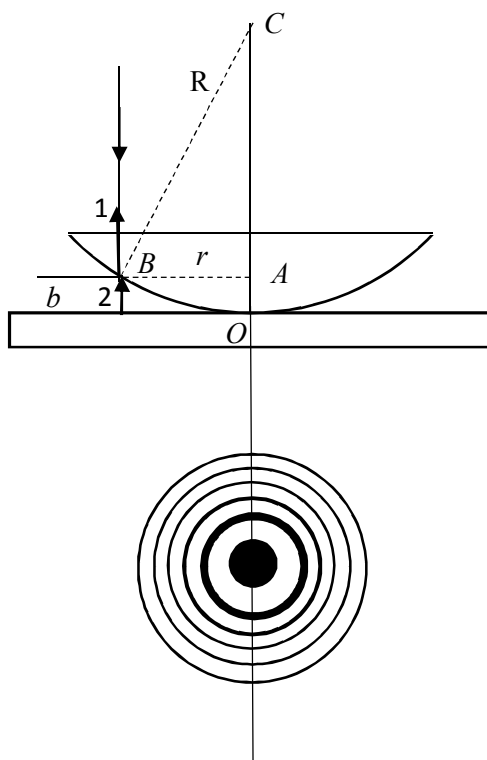
Классическим примером интерференционных полос равной толщин являются кольца Ньютона.

Для их наблюдения используют плоско-выпуклую линзу большого радиуса кривизны  $R$ , которая соприкасается с плоской поверхностью хорошо отполированной стеклянной пластинки. Между линзой и пластинкой образуется воздушный кольцевой клин с очень малым углом при вершине (рис. 3).

Перпендикулярно падающая на линзу световая монохроматическая волна частично отражается от верхней поверхности воздушного слоя (луч 1), а частично преломляется. Преломленная волна, достигнув нижней поверхности воздушного слоя, также частично отражается (луч 2), а частично преломляется. Интерференция наблюдается как в отраженном (лучи 1 и 2), так и в проходящем свете. В данной работе наблюдения проводятся в отраженном свете. Интерференционная картина представляется в виде темного центрального пятна, окруженного рядом concentрических темных и светлых колец. Наличие центрального темного пятна объясняется тем, что в месте касания линзы с пластинкой остается очень тонкая воздушная прослойка, с толщиной много меньше длины волны. Поэтому разность хода между лучами, возникающими в этой точке, определяется лишь потерей полуволны при отражении от пластинки. В результате

разность хода равна  $\Delta = \lambda/2$  и в центре интерференционной картины в отраженном свете наблюдается темное пятно.

Рассчитаем размеры колец Ньютона. Интерференция проходит в тонком воздушном слое, поэтому геометрическая



Кольца Ньютона в отраженном свете

Рис. 3

разность хода интерферирующих лучей равна

$$\Delta = 2b,$$

где  $b$  - толщина воздушного зазора в данном месте.

Найдем толщину воздушной прослойки, соответствующей тому или иному темному кольцу. Из (6) следует

$$b_m = m \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

Определим радиусы темных колец Ньютона. Из рис.3 следует

$$R^2 = (R - b)^2 + r^2 \approx R^2 - 2Rb + b^2 + r^2,$$

где  $R$  - радиус кривизны линзы,  $r$  - радиус некоторого темного кольца. Учитывая, что  $b$  - величина малая, в полученном выражении величиной  $b^2$  можно пренебречь, тогда

$$b = \frac{r^2}{2R} \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), получим

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} \quad (11)$$

В данной работе необходимо измерить радиусы колец и, зная радиус кривизны линзы, определить длину волны.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На фотографии 1 показан вид экспериментальной установки.



Фотография 1

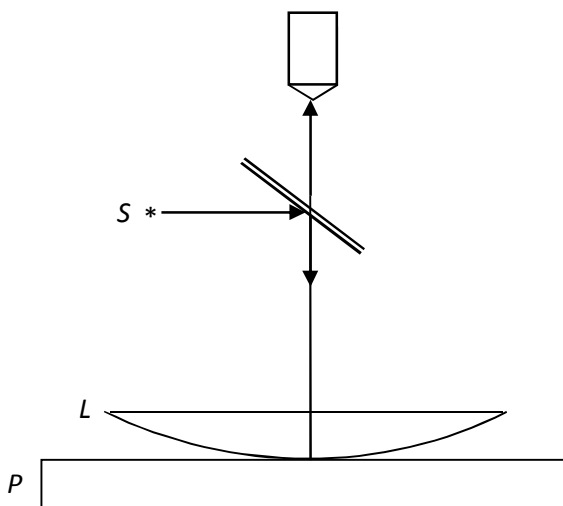


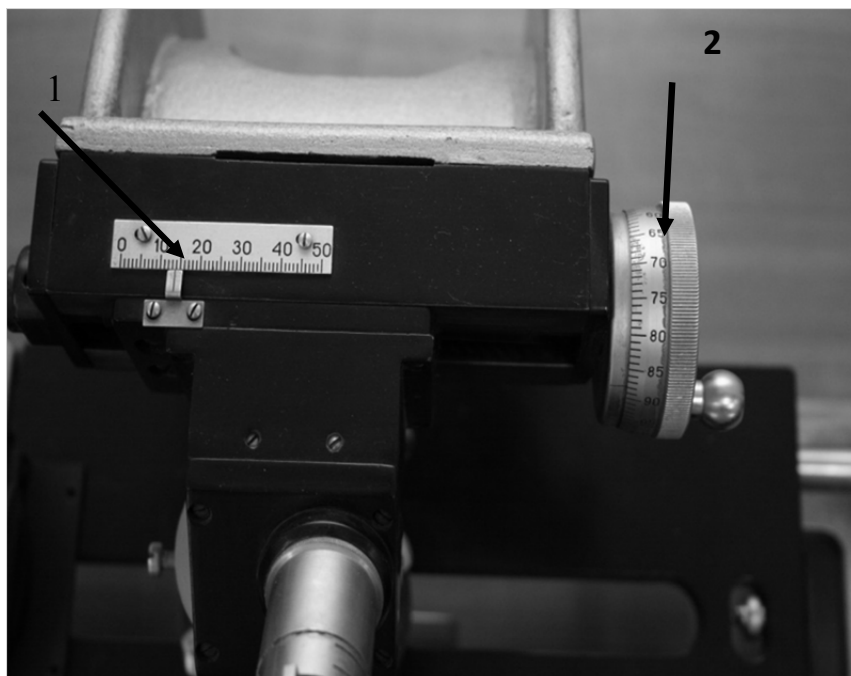
Рис. 4

На рис. 4 приведена схема экспериментальной установки для наблюдения интерференционных колец Ньютона.

Под тубусом вертикально расположенного отсчетного микроскопа находится стеклянная пластинка  $P$ , на которую положена выпуклой стороной линза  $L$ . Над линзой помещена под углом  $45^\circ$  к горизонтальной поверхности полупрозрачная пластинка. Свет от источника  $S$ , отразившись от наклонной пластинки, падает перпендикулярно на линзу и пластинку  $P$ . Отражившись частично от воздушной прослойки, образующейся между линзой  $L$  и пластинкой  $P$ , частично от самой пластинки  $P$ , световые волны, пройдя через наклонную пластинку, попадают в микроскоп и оттуда в глаз наблюдателя.

При соответствующей фокусировке в поле зрения хорошо видны кольца Ньютона.

Измерение радиусов колец производится по шкале 1 (см. фото 2), фиксирующей положение микроскопа при горизонтальном его перемещении, цена деления которой 1 мм, и по шкале 2 барабана, закрепленного на микрометрическом винте, при помощи которого осуществляется это перемещение. Цена деления на барабане – 0,01 мм.



Фотография 2

## МЕТОДИКА РАБОТЫ

1. Перекрест нитей в окуляре микроскопа установите сначала на центральное пятно интерференционной картины.
2. Перемещая микроскоп при помощи микрометрического винта в горизонтальном направлении, установите перекрест нитей

на 10-е темное кольцо с какой либо стороны от центра и сделайте первый отсчет по шкале и барабану микроскопа  $x_1$ .

3. Перекрест нитей последовательно наводите на 9-е, 8-е, 7-е и т.д. темные кольца. При этом для каждого кольца делается соответствующий отсчет  $x_1$ .

4. После того как для всех колец с одной стороны от центра отсчеты сделаны, перекрест нитей наводится последовательно на 1-е, 2-е, 3-е и т. Д. до 10-го кольца с другой стороны от центрального темного пятна и делаются отсчеты  $x_2$ .

5. Вычислите диаметр каждого кольца  $D = x_2 - x_1$

6. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу

Т а б л и ц а 1

$m$	$x_1, мм$	$x_2, мм$	$D, мм$	$D^2, мм^2$	$R, мм$	$\lambda, нм$
10					441	
9						
8						
7						
6						
5						
4						
3						
2						
1						

При обработке результатов измерений следует использовать графический метод. Для этого надо построить график зависимости квадрата диаметра кольца  $D^2_m$  от его номера  $m$ . В соответствии с формулой (11) график должен быть прямой линией, проходящей через начало координат. Её наклон определяется радиусом кривизны линзы  $R$  и длиной волны  $\lambda$ . По тому как экспериментальные точки ложатся на прямую, можно судить о качестве аппаратуры и мастерстве экспериментатора.

Метод наименьших квадратов позволяет получить наиболее точное значение угла наклона. Длина волны  $\lambda$  определяется по тангенсу угла наклона к оси абсцисс:

$$tg\alpha = \frac{\sum kD_m^2}{\sum m^2} = 4R\lambda,$$

$$\lambda = \frac{tg\alpha}{4R}. \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta(tg\alpha)}{tg\alpha} + \frac{4\Delta R}{R}; \quad \Delta\lambda = \lambda \left[ \frac{\Delta(tg\alpha)}{tg\alpha} + \frac{4\Delta R}{R} \right]$$

Погрешность определения тангенса определяется по формуле:

$$(\Delta tg\alpha) = \sqrt{\frac{\sum d_m^2}{(m-1) \cdot \sum m^2}}$$

где  $m$  – общее количество точек прямой  $d_m^2 = D_m^2 - tg\alpha \cdot m$

Результат измерений следует представить в виде:

$$\lambda = (\lambda_{измер} \pm \Delta\lambda) нм$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких единицах измеряются длины световых волн?
2. Укажите интервал длин волн видимой части спектра.
3. Что такое «когерентные источники»?
4. Что такое «оптическая длина пути»?
5. Когда при отражении происходит потеря полуволны?
6. Вывести условие максимума и минимума при интерференции света, отраженного от плоскопараллельной пластинки.
7. Получить формулу для радиусов колец Ньютона.
8. Почему в центре при отражении располагается темное пятно?
9. Радиус кольца одного и того же номера для красного и зеленого цвета отличается? Какого больше?
10. Почему кольца Ньютона трудно наблюдать в белом свете?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г. С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1985.
3. Матвеев А. Н. Оптика.– М.: Высшая школа, 1985.

*Издание подготовлено в авторской редакции*

Отпечатано на участке цифровой печати  
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 1903 от «6» мая 2016 г. Тираж 100 экз.