<u>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.21</u>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВЫХ ВОЛН МЕТОДОМ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Веневцев И. Д., Маслакова М. С., Соколов М.А.

Цель работы

Изучение явления интерференции света на примере колец Ньютона и определение длины световой волны.

Задачи

- 1. Измерить радиусы колец Ньютона для различных длин волн.
- 2. Вычислить длины волн и их погрешности.
- 3. Сравнить полученные длины волн с указанными на установке.

Введение

Интерференцией света называется пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн. Наблюдение устойчивой интерференционной картины возможно лишь в том случае, если интерферирующие световые волны когерентны. В интерференционных опытах получение когерентных световых волн достигается путем разделения излучения, исходящего из одного источника, на несколько пучков. Эти пучки, попадая в область перекрытия, дают устойчивую интерференционную картину, если разность их хода не превышает *длину когерентности* (для используемых в работе светодиодов это десятки микрометров).

Поместим плосковыпуклую линзу 1 с большим радиусом кривизны на плоскопараллельную пластинку 2 (см. рис. 1). Благодаря воздушной прослойке, находящейся между пластинкой и линзой, происходит разделение падающего пучка света на два когерентных. Пусть на линзу 1, перпендикулярно ее плоской поверхности, направлен пучок параллельных лучей монохроматического света, длина волны которого равна λ . Выберем произвольный луч (1) из пучка. Вначале этот луч, не изменяя своего направления, проходит границу раздела воздухстекло. Затем преломляется на границе раздела стекло-воздух и, отражаясь от поверхности пластинки 2, возвращается в линзу в точке K. Второй луч (2)

проходит только одну границу раздела воздух-стекло, и отражается от второй границы в этой же точке K. Очевидно, что до точки K эти лучи пройдут разные оптические пути. Детальный расчет показывает, что интенсивность обоих лучей сопоставима, что и позволяет наблюдать интерференцию. При достаточно большом радиусе кривизны поверхности линзы можно не учитывать отклонение лучей от первоначального направления на границах раздела и считать, что лучи (1') и (2') распространяются вдоль одной прямой. Тогда разность хода будет определяться исключительно толщиной воздушной прослойки, находящейся непосредственно за точкой K.

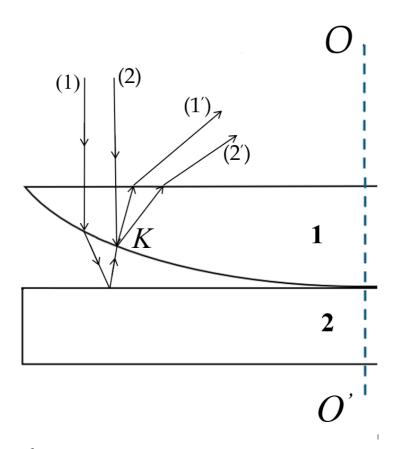


Рис.1. Ход интерферирующих лучей

Интерференционную картину можно увидеть на поверхности линзы, если сфокусировать на нее какое-либо оптическое устройство (например, микроскоп). Эта картина, из-за симметрии линзы относительно оси ОО', представляет собой систему концентрических колец, в центре которой находится темное пятно (см. рис. 2). (В другом варианте этого опыта, когда интерференция наблюдается в проходящем сквозь пластину свете, центральное пятно оказывается светлым.)

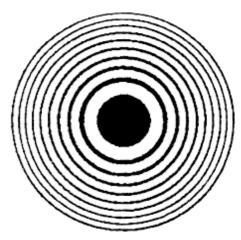


Рис. 2. Черно-белая фотография колец Ньютона в отраженном свете

Впервые цветные кольца в тонких слоях наблюдал Роберт Гук. Исаак Ньютон исследовал зависимость цвета колец от толщины слоя. Придерживаясь корпускулярной точки зрения о природе света, как о потоке частиц, Ньютон не смог объяснить наблюдаемого им явления, как, впрочем, и современники Ньютона – приверженцы волновой теории. Сделал это в начале XIX века английский физик Томас Юнг, опираясь на введенный им в волновой оптике принцип интерференции. Примечательно, современная что теория электромагнитного взаимодействия (квантовая электродинамика) является корпускулярной волновой синтезом И теории на основе квантовых представлений.

Выведем формулу, позволяющую по известным радиусам колец Ньютона вычислить длину волны света. При выводе удобно вместо понятия разности фаз воспользоваться понятием оптической разности хода. Разности фаз 2π соответствует оптическая разность хода равная длине волны λ . Оптическая разность хода зависит от показателя преломления среды, но если показатель преломления среды близок к 1 (в нашем случае для воздуха п≈1.00029), оптическая разность хода практически равна геометрической, и может быть рассчитана как разность путей, пройденных светом от источника волн до точки их интерференции. Темные кольца в отраженном свете, при перпендикулярном монохроматического тех падении света, возникают местах. интерферирующие волны имеют противоположную фазу, то есть оптическая разность хода Δ лучей (1) и (2), отраженных от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, составляет нечетное число полуволн $\lambda/2$.

$$\Delta = (2m - 1)\frac{\lambda}{2}; \quad m \in \mathbb{N}$$
 (1)

Необходимо учесть, что при отражении от среды с большей оптической

плотностью (большим показателем преломления) происходит изменение фазы на противоположную, что эквивалентно дополнительному сдвигу на $\lambda/2$. Тогда для темного кольца с номером k эта же оптическая разность хода равна (см. рис. 1 и 3):

$$\Delta = 2h_m - \frac{\lambda}{2},\tag{2}$$

где h_m — толщина воздушной прослойки в месте расположения этого кольца. Отметим, что расстояния h, пройденные лучом (1) в воздушной прослойке от линзы до пластинки и обратно, считаются равными, поскольку при нормальном падении пучка на линзу большого радиуса кривизны можно пренебречь преломлением лучей. Это объясняет появление в соотношении (2) слагаемого $2h_m$.

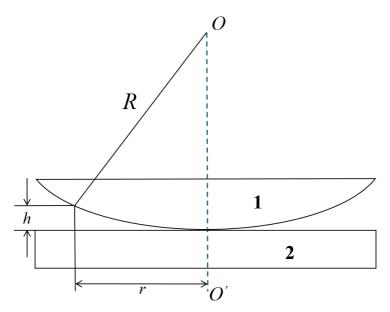


Рис. 3. Геометрия воздушной прослойки

Сравнивая соотношения (1) и (2), получаем условие образования темного кольца с номером m:

$$h_m = m\frac{\lambda}{2} \tag{3}$$

Толщина воздушной прослойки h_m выражается через радиус m – го темного кольца r_m и радиус кривизны линзы R с помощью теоремы Пифагора (см. Рис. 3):

$$R^2 = (R - h_m)^2 + r_m^2$$

Раскрывая скобки и учитывая малость толщины воздушной прослойки по сравнению с радиусом кривизны линзы $R >> h_m$, приходим к соотношению

$$h_m = \frac{r_m^2}{2R} \tag{4}$$

Исключая h_m из (3) и (4), получаем искомую формулу, связывающую длину волны интерферирующего света и радиус темного кольца r_m с номером m:

$$r_m^2 = m\lambda R \tag{5}$$

В реальности обеспечить контакт линзы и пластинки в одной точке практически невозможно. При наличии в месте соприкосновения линзы с пластинкой пылинок контакта не будет вовсе, а если линзу прижимать к пластинке, то из-за деформации стекла в месте их соприкосновения контакт происходит не в одной точке, а в круговой области. Это приводит к изменению толщины воздушной прослойки. Как следствие, меняется вид соотношения (5):

$$r_m^2 = m\lambda R + 2Rh_c, (6)$$

где h_c - некоторая постоянная величина, соответствующая изменению толщины прослойки. В настоящей лабораторной работе длина волны интерферирующего света будет определяться из линейной зависимости r_m^2 от m, непосредственно следующей из формулы (6), для которой угловым коэффициентом является произведение $\gamma = \lambda R$ радиуса закругления линзы и длины волны падающего света.

Экспериментальная установка

Схема установки представлена на Рис. 4. Источник света 3 представляет собой барабан с закрепленными на нем светодиодами. Пучок света от источника 3 падает на полупрозрачную пластинку 4, которая направляет его на систему линза 1 — пластинка 2. Полученная интерференционная картина наблюдается в измерительном микроскопе 5. Винты 6 и 7 позволяют перемешать столик в горизонтальной плоскости. В качестве источников используются светодиоды красный, желтый, зеленый и синий.

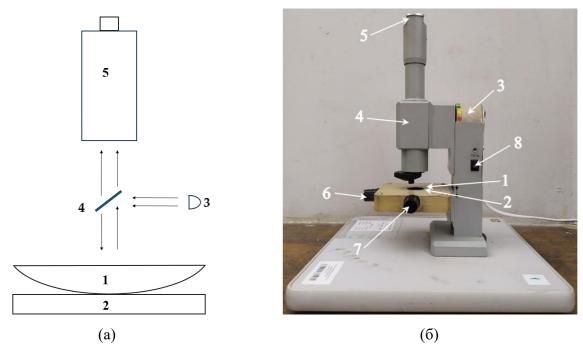


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки: а) схема, б) фотография

Порядок выполнения работы

- 1. Включите установку выключателем 8 и убедитесь, что в объектив видна система колец. Если колец не видно, обратитесь к преподавателю.
- 2. Вращая винты 6 и 7 (рис. 3), сдвигающие линзу 1 и пластинку 2 во взаимно перпендикулярных направлениях, переместите измерительную линейку, видимую в окуляр микроскопа 5, так, чтобы она проходила через центр темного пятна.
- 3. Поворотом барабана источника 3 установите один из светодиодов (красный, желтый, зеленый или синий).

Внимание! Вращать барабан со светодиодами необходимо очень осторожно и медленно!

- 4. Измерьте по линейке положения левого внешнего края 1-го кольца $x_{1\pi}$ и его правого внутреннего края $x_{1\pi}$ и занесите в таблицу измерений согласно схеме, изображенной на рис. 5.
- 5. Повторяйте измерения предыдущего пункта для колец с номерами m=2, 3, ... до тех пор, пока они полностью попадают в поле зрения микроскопа или пока качество изображения позволяет сделать измерения. Результаты занесите в Таблицу 1.

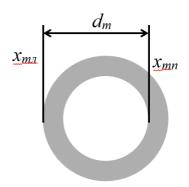


Рис. 5. Измерение диаметра кольца

- 6. Произведите измерения по пп. 3-5 положений колец для оставшихся светодиодов. Результаты измерений для каждого светодиода занесите в отдельную таблицу, аналогичную Таблице 1.
 - 7. Выключите питание установки выключателем 8.

Таблица 1. Результаты измерений (цвет светодиода – ...)

m	$\mathcal{X}_{m\pi},$	$\mathcal{X}_{m\Pi},$	r_m , MM	$(r_m)^2$,
	дел	дел		MM
1				
2				

Обработка результатов

1. Для всех колец найдите их радиус по формуле

$$r_m = \frac{x_{m\Pi} - x_{m\Pi}}{2} \cdot c$$

где c — цена деления шкалы микроскопа c = 0.27 мм/дел. Результаты занесите в таблицу.

- 2. Вычислите квадраты радиусов колец r_m^2 и результаты также занесите в таблицу 1.
- 3. По данным таблицы постройте график зависимости квадрата радиуса колец r_m^2 от их номера m.
- 4. Методом парных точек найдите средний коэффициент наклона прямой $<\gamma>$ и его погрешность $\Delta\gamma$. При расчете погрешности примите

доверительную вероятность равной $\alpha = 0.68$ (если не будет специального указания преподавателя).

5. Учитывая связь коэффициента γ с длиной волны интерферирующего света

$$\gamma = R\lambda$$
,

следующую из формулы (6), вычислите λ и ее погрешность $\Delta\lambda$ (значение радиуса кривизны линзы R указано на установке). Результат приведите в нанометрах.

- 6. Повторите вычисления для остальных светодиодов.
- 7. Сравните полученные длины волн с указанными на установке.

Контрольные вопросы

- 1. В чем заключается явление интерференции света?
- 2. Для каких волн может быть зарегистрировано явление интерференции?
- 3. В чем заключаются условия максимума и минимума при интерференции?
- 4. Как образуются когерентные волны при наблюдении колец Ньютона?
 - 5. Выведите формулу (5).

Литература

- 1. Сивухин Д.В., Общий курс физики, т. 4, Оптика, М., ФИЗМАТЛИТ, 2005.
 - 2. Ландсберг Г.С., Оптика, М., ФИЗМАТЛИТ, 2002.
- 3. Лебедева В.В., Экспериментальная оптика, М., Изд-во Моск. ун-та, 1994.
- 4. Иванов В. К. Физика. Электромагнитные волны : учеб. Пособие / В. К. Иванов. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. 208 с.
- 5. Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: методические указания / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Кафедра экспериментальной физики; составители: Б. Д. Агапьев, В. В. Козловский. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2012.