



КОЛЬЦА НЬЮТОНА

Лабораторная работа № 5.6

МОСКВА 2005

Цель работы: ознакомление с явлением интерференции в тонких пленках (полосы равной толщины) на примере колец Ньютона и с методикой интерференционных измерений кривизны стеклянной поверхности.

В работе используются: измерительный микроскоп с опак-иллюминатором; плосковыпуклая линза; пластинка из черного стекла; ртутная лампа ПРК-4; щель; линзы; призма прямого зрения; объектная шкала.

В нашей установке кольца Ньютона образуются при интерференции световых волн, отраженных от границ тонкой воздушной прослойки, заключенной между выпуклой поверхностью линзы и плоской стеклянной пластинкой (рис. 1). Наблюдение ведется в отраженном свете.

Рассчитаем размеры колец Ньютона. Пусть сверху на линзу падает монохроматический параллельный пучок лучей. При вычислении разности хода можно пренебречь небольшими наклонами лучей, проходящих в тонком воздушном зазоре. Геометрическая разность хода между интерферирующими лучами равна, очевидно, $2d$, где d — толщина воздушного зазора в данном месте.

Выразим зависимость d от расстояния r до радиуса, проходящего через точку соприкосновения линзы и пластинки. Из рис. 1 имеем

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2,$$

где R — радиус кривизны выпуклой поверхности линзы. Принимая во внимание, что $2R \gg d$, получим

$$d = \frac{r^2}{2R}. \quad (1)$$

При вычислении полной разности хода нужно учесть изменение фазы световой волны при отражении от границ стекло—воздух и воздух—стекло. Как известно, для светового (электрического) вектора отражение от оптически более плотной среды происходит с изменением фазы на π . Свет, отраженный от границы стекло—воздух, по сравнению со светом, отраженным от границы воздух—стекло, приобретает, таким образом,

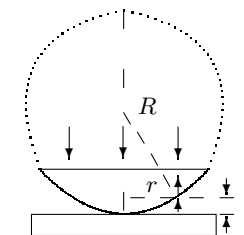


Рис. 1. К расчёту колец Ньютона

дополнительный фазовый сдвиг на π , что соответствует разности хода $\lambda/2$. Полная разность хода Δ равна

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

Линии постоянной разности хода представляют собой концентрические кольца с центром в точке соприкосновения. При заданном значении длины волны λ разность хода Δ определяется толщиной воздушного зазора; интерференционные полосы являются, таким образом, линиями равной толщины.

Известно, что линии равной толщины для точечного источника света не имеют области локализации: их можно наблюдать в любом месте пространства, где пересекаются лучи, отражённые от двух поверхностей. Для протяжённого источника линии равной толщины локализованы на поверхности клина (в нашем случае на поверхности воздушной прослойки). Это означает, что при освещении системы не вполне параллельным пучком света (что практически всегда имеет место) интерференционные полосы оказываются наиболее четкими при фокусировке на верхнюю поверхность воздушного клина.

Запишем условие минимума освещенности в интерференционной картине:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Принимая во внимание (2), получим для радиусов r_m темных колец

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}. \quad (4)$$

Аналогичным образом для радиусов r'_m светлых колец найдем

$$r'_m = \sqrt{(2m - 1)R\lambda/2}. \quad (5)$$

Измеряя радиусы светлых или темных колец, с помощью (4) и (5) можно определить λ , если известен радиус R кривизны линзы, или, наоборот, по известному значению λ найти R .

Экспериментальная установка. Опыт выполняется с помощью измерительного микроскопа. На столике микроскопа помещается держатель с полированной пластинкой из черного стекла (рис. 2). На пластинке лежит исследуемая линза.

Между окуляром и объективом микроскопа расположен опак-иллюминатор — специальное устройство, служащее для освещения объекта

при работе в отраженном свете. Внутри опак-иллюминатора находится полупрозрачная стеклянная пластинка P , наклоненная под углом 45° к оптической оси микроскопа. Свет от расположенного сбоку источника частично отражается от этой пластинки, проходит через объектив микроскопа и попадает на исследуемый объект. Пластинка может поворачиваться вокруг горизонтальной оси x .

Столик микроскопа может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи специальных винтов — препаратодержателей.

При измерениях окуляр перемещают перпендикулярно оптической оси с помощью микрометрического винта M .

Источником света служит ртутная лампа (типа ПРК-4), находящаяся в защитном кожухе. Для монохроматизации света (для выделения одной или нескольких спектральных линий, используемых для освещения) применяется призменный монохроматор (рис. 3), состоящий из конденсора K , щели S , объектива O и призмы прямого зрения Π . Все эти устройства с помощью рейтеров располагаются на оптической скамье.

Оптическая схема позволяет получить в плоскости входного окна опак-иллюминатора достаточно хорошо разделённые линии спектра ртутной лампы.

Рекомендуется сначала настроить микроскоп на кольца Ньютона в белом свете (свете ртутной лампы), затем при помощи монохроматора выделить из ртутного спектра яркую зелёную линию и провести измерения диаметров колец в монохроматическом свете.

Настройка микроскопа. Включив ртутную лампу, располагают перед окном лампы конденсор, а остальные элементы схемы временно убирают с оптической скамьи. Осветив входное окно опак-иллюминатора, располагают исследуемую линзу на столике микроскопа.

Глядя на линзу сбоку невооружённым глазом, поворачивают опак-иллюминатор вокруг вертикальной оси, а полупрозрачную пластинку

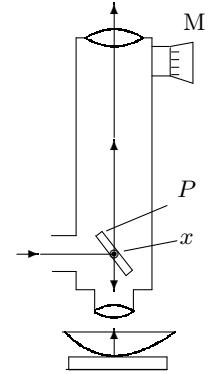


Рис. 2. Освещение линзы с помощью опак-иллюминатора

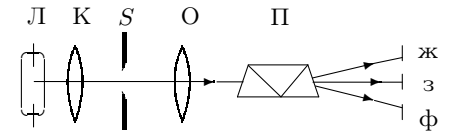


Рис. 3. Схема устройства монохроматора

P — вокруг горизонтальной оси (рис. 2), пока на оправе линзы (или листе бумаги, положенном на линзу) не появится яркое световое пятно. Перемещением тубуса микроскопа вдоль вертикальной оси фокусируют пятно на оправу линзы; при помощи препаратоводителей подводят точку соприкосновения линзы к оптической оси микроскопа.

Глядя в окуляр, вращением пластинки P подводят световое пятно к центру поля зрения. Слегка перемещая тубус микроскопа, добиваются появления чётких колец Ньютона в поле зрения микроскопа. Крест нитей должен проходить через середину тёмного пятна.

Настройка монохроматора. С помощью конденсора освещают щель S светом лампы L . Располагают объектив O на расстоянии от щели, близком к фокусному, и размещают в промежутке между объективом и микроскопом призму прямого зрения. При этом в плоскости опак-иллюминатора появляются достаточно хорошо разделённые линии спектра ртутной лампы. Переход от одной линии к другой осуществляется путём перемещения микроскопа, яркость линий меняется при перемещении конденсора поперёк оптической оси при помощи специального винта. При измерении диаметров колец удобно использовать яркую зелёную линию ртути.

Передвигая микроскоп как целое и поворачивая его вокруг вертикальной оси, добиваются наибольшей освещённости поля зрения. Перемещение объектива O вдоль оптической оси также влияет на освещённость поля зрения.

Определение радиуса кривизны линзы. Для определения радиуса кривизны линзы измеряют диаметры колец: устанавливают перекрестие на середину какого-либо достаточно удалённого от центра, но ещё отчётливо видимого тёмного кольца, и снимают отсчёт по окулярной шкале: целые деления отсчитываются слева от риски, проходящей через окулярную шкалу, десятые и сотые доли деления — по окулярному микрометрическому винту M .

Перемещая перекрестие, последовательно устанавливают его на середины тёмных колец и записывают соответствующие показания окулярной шкалы и микрометра. После прохождения через центральное пятно продолжают измерения, записывая возрастающие номера колец и координаты их диаметров. Для устранения ошибок, возникающих из-за люфта в винте, перекрестие всегда следует подводить к кольцу с одной стороны. Цену одного деления окулярной шкалы определяют, сравнивая её с изображением эталонной (объектной) шкалы. По разности отсчётов определяют диаметры, а затем и радиусы тёмных колец. Аналогичные серия измерений выполняется для светлых колец Ньютона.

При обработке результатов измерений удобно пользоваться графическим методом. Проще всего построить графики зависимости r_m^2 и $(r'_m)^2$ от номера m кольца. Согласно теории эти графики должны представлять собой прямые линии, первая из которых проходит через начало координат. Зная длину волны λ , по наклону прямых можно рассчитать радиус R кривизны линзы. По тому, насколько близко экспериментальные точки группируются вдоль прямой, можно судить о качестве аппаратуры и величине ошибок.

Деформация линзы и стеклянной пластинки в месте их соприкосновения может приводить при малых m к отступлению от (4) и (5). Меньше всего искажены деформацией кольца с большими номерами. При наличии искажений прямая, проведённая через точки, соответствующие не слишком малым m , не пройдёт через начало координат.

Наблюдение «биений». При освещении системы светом, содержащим две спектральные компоненты, наблюдается характерная картина биений: чёткость интерференционных колец периодически изменяется. Это объясняется наложением двух систем интерференционных колец, возникающих для разных длин волн λ_1 и λ_2 . Четкие кольца в результирующей картине образуются при наложении светлых колец на светлые и темных на темные. Размытые кольца получаются при наложении светлых колец одной картины на темные кольца другой.

Нетрудно рассчитать период возникающих биений. Пусть в промежутке между двумя центрами соседних четких участков укладывается Δm колец для спектральной линии с длиной волны λ_1 . Тогда в этом промежутке должно располагаться $(\Delta m + 1)$ колец для спектральной линии с длиной волны λ_2 (при $\lambda_2 < \lambda_1$). Получение окончательной формулы для Δm мы предоставляем читателю.

Для освещения входного окна опак-иллюминатора сразу двумя спектральными линиями (например, желтой и зеленой) можно расфокусировать монохроматор, смещая объектив O и призму.

Если смешать две линии не удаётся, то, убрав призму прямого зрения, можно объективом O сфокусировать на окно опак-иллюминатора белый свет ртутной лампы. Результаты измерений не изменятся, так как остальные линии в спектре ртутной лампы заметно слабее жёлтой и зелёной.

Калибровка окулярной шкалы. Для определения цены деления окулярной шкалы сверху на линзу кладут калиброванную объектную шкалу. Плавно поднимая тубус, находят изображение миллиметровой шкалы и совмещают его с окулярной шкалой.

Объектная шкала размером 1 мм разбита на 100 делений. Используя всё поле зрения микроскопа, отмечают, какие из самых дальних штрихов

объектной шкалы лучше всего совпадают со штрихами окулярной шкалы. Можно использовать для калибровки окулярный микрометр, совмещающая перекрестие с началом и концом объектной шкалы.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается, измерив диаметры колец Ньютона, определить радиус кривизны линзы; исследовать картину биений и рассчитать разность длин волн между жёлтой и зелёной спектральными линиями ртути.

При выполнении работы руководствуйтесь техническим описанием (ТО), расположенным на установке.

1. Включите ртутную лампу и настройте микроскоп на кольца Ньютона в белом свете.
2. Настройте монохроматор, фокусируя на входном окне опак-иллюминатора изображение зелёной линии ртути.
3. Вращая окулярный микрометрический винт, убедитесь, что перекрестие проходит через центр тёмного пятна и что поле зрения освещено симметрично слева и справа от центра.

Определите координаты диаметров тёмных и светлых колец (удобно координаты диаметров соответствующих колец записывать друг под другом).

4. Оцените диаметр пятна соприкосновения линзы со стеклянной пластинкой.
5. Проведите наблюдение биений для жёлтой и зелёной линий; на месте оцените разность длин волн и сопоставьте результат с табличным.
6. Прокалибруйте окулярную шкалу, используя эталонную объектную шкалу.

Обработка результатов

1. Рассчитайте цену деления окулярной шкалы и оцените погрешность результата.
2. Рассчитайте радиусы тёмных и светлых колец и постройте графики зависимости r_m^2 и $(r'_m)^2$ от номера кольца m .

По наклону прямых (с учётом калибровки) рассчитайте радиус R кривизны линзы и оцените погрешности эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Почему в центре колец Ньютона в отражённом свете расположено тёмное пятно?
2. Как расположены кольца Ньютона в проходящем свете?
3. Почему ширина колец убывает с увеличением порядка?
4. Почему при расчёте интерференционной картины не учитывают отражение от передней (плоской) поверхности линзы?
5. Выведите формулу, связывающую период биений, выраженный в числе колец, с длинами волн спектральных линий.
- 6* Почему интерференционные кольца больших номеров кажутся размытыми?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г.С. Оптика. — М.: Наука, 1976. Гл. IV; VI, § 26.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. IV. Оптика. — М.: Наука, 1980. Гл. III.
- 3* Дитчбёрн Р. Физическая оптика. — М.: Наука, 1965. Гл. V.
- 4* Захарьевский А.Н. Интерферометры. — М.: Оборонгиз, 1952. § 7.