

Изучение интерференции света на кольцах Ньютона

Маслов Артём

Казаков Данила

Б01-104

25.03.2023

Аннотация

В работе исследуется интерференционная картина колец Ньютона. Определяется радиус кривизны плосковыпуклой линзы методом измерения радиусов колец интерференционной картины. Определяется по наблюдению биений разность длин волн жёлтой и зелёной линий ртути.

Теория

Основные положения волновой теории света

Электромагнитная волна согласно уравнениям Максвелла описывается уравнением:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

где $v = \frac{c}{n}$ – скорость распространения электромагнитной волны в среде.

Волна называется монохроматической, если она описывается уравнением гармонических колебаний и её спектр состоит из одной гармоники на частоте ω . Плоская монохроматическая волна описывается уравнением:

$$E(\mathbf{r}, t) = a \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

Сферической волной называется волна, которая описывается уравнением:

$$E(r, t) = \frac{a}{r} \cos \omega t - kr$$

Если перейти к описанию электромагнитных волн в комплексной форме:

$$E(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$$

и подставить полученное соотношение в уравнение (1)), то получится уравнение Гельмгольца

для комплексных амплитуд:

$$\nabla^2 f + k^2 f = 0$$

Интерференция двух монохроматических волн

Амплитуда результирующих колебаний в точке наблюдения при интерференции монохроматических волн складывается по правилу суперпозиции. Тогда интенсивность результирующих колебаний определяется соотношением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$$

где I_1 и I_2 – интенсивности интерферирующих волн, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – разность фаз между ними.

Если складываются волны одинаковой интенсивности $I_1 = I_2 = I_0$, то интерференционная картина описывается выражением:

$$I = 2I_0 (1 + \cos \Delta\varphi)$$

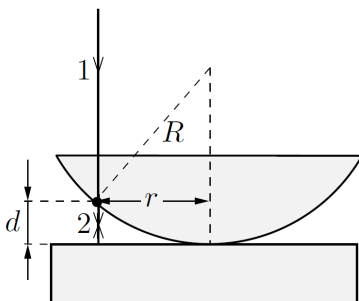
При интерферировании волн от одного источника разность фаз определяется разностью проходимых лучами оптических путей $\Delta\varphi = k(\Delta)$, где $\Delta = n_2 l_2 - n_1 l_1$ – оптическая разность хода. Тогда результирующая интенсивность в точке наблюдения определяется выражением:

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos \frac{\omega}{c} \Delta \right)$$

Контрастность интерференционной картины характеризуется физической величиной, называемой видностью V . По определению

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Кольца Ньютона



Рассмотрим интерференционную схему колец Ньютона. Над плоской пластинкой размещают плосковыпуклую линзу с радиусом кривизны R , выпуклой стороной к пластинке. Свет распространяется от удалённого источника параллельным пучком перпендикулярно плоской поверхности линзы. Первый луч преломляется на сферической поверхности линзы, отражается от пластинки и затем отражается от линзы. Второй луч преломляется на сферической поверхности линзы и интерферирует с первым лучом на пластинке. В приближении малой кривизны поверхности линзы можно пренебречь отклонением лучей от перпендикулярного распространения

поверхности пластинки. Тогда разность фаз складывается из двойного прохождения первым лучом воздушной прослойки между пластинкой и линзой толщиной d и набега фазы π при

отражении от линзы – оптически более плотной среды:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

Условие наблюдения интерференционного минимума задаётся выражением:

$$\Delta = m\lambda + \frac{\lambda}{2}$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$

Радиусы тёмных колец вычисляются по формуле:

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}$$

Радиусы светлых колец определяются выражением:

$$r'_m = \sqrt{(m - \frac{1}{2})\lambda R}$$

Описание экспериментальной установки

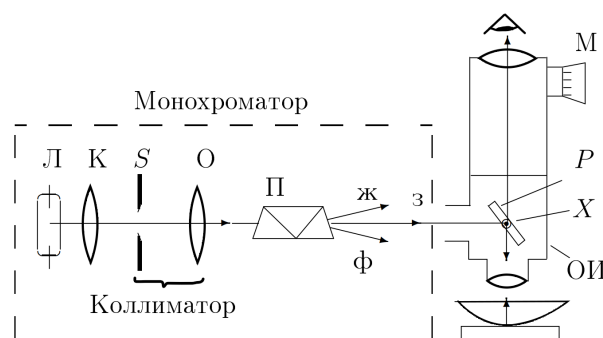


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Белый свет от ртутной лампы попадает на призмный монохроматор, состоящий из конденсора(К), коллиматора(щели S и объектива О), и призмы прямого зрения(П). После монохроматора свет попадает на расположенный между объективом и окуляром микроскопа опак-иллюминатор(ОИ), внутри которого находится полупрозрачная стеклянная пластинка(Р), наклоненная под углом 45° к оптической оси микроскопа. Свет частично отражается от пластинки и попадает на исследуемую линзу.

Оборудование

1. Измерительный микроскоп с опак-иллюминатором.
2. Плосковыпуклая линза.
3. Пластика из чёрного стекла.

4. Ртутная лампа ДРШ.
5. Плосковыпуклые линзы.
6. Призма прямого зрения.

Результаты измерений

Градуйровка микрометрического винта

Проведём калибровку градуировочной шкалы. Цена деления градуировочной шкалы $d_{\text{ш}} = 0,01$ мм.

№	1	2
Делений градуировочной шкалы $n_{\text{ш}}$	80	39
Делений микрометрического винта $n_{\text{в}}$	8,19	4,00
Цена деления микрометрического винта $d_{\text{в}}$, мкм	$97,7 \pm 0,6$	$97,5 \pm 1,3$

$$d_{\text{в}} = \frac{d_{\text{ш}} \cdot n_{\text{ш}}}{n_{\text{в}}}$$

Погрешность определения цены деления микрометрического винта оценивалась по формуле:

$$\varepsilon_{d_{\text{в}}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{n_{\text{ш}}}}{n_{\text{ш}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{n_{\text{в}}}}{n_{\text{в}}}\right)^2}$$

где $\sigma_{n_{\text{ш}}} = 0,5$ – половина деления градуировочной шкалы, $\sigma_{n_{\text{в}}} = 0,005$ – половина деления микрометрического винта. Измерения производились с помощью микроскопа, поэтому точность результатов определяется, насколько точно человеческий глаз способен определить совпадение делений градуировочной и эталонной шкалы. Для оценки возьмём половину деления, так как система – механическая, возможен люфт микрометрического винта, деления имеют конечную толщину, а экспериментатор субъективно воспринимает совпадение делений.

За итоговое значение цены деления микрометрического винта возьмём первое измерение, так как у него меньше погрешность измерения: $d_{\text{в}} = 97,7 \pm 0,6$ мкм.

Определение радиуса кривизны линзы

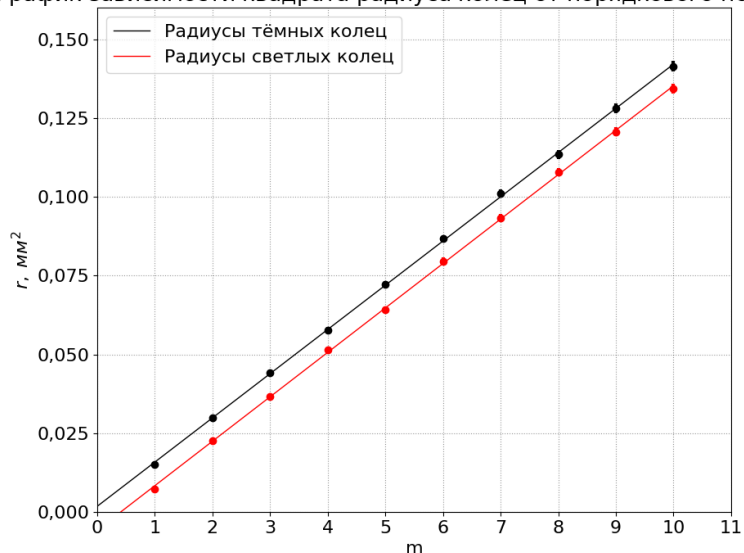
Так как граница между светлым и тёмным кольцом была видна достаточно четко, а середину кольца на глаз определить сложно, то было принято решение измерять координаты границ колец. Координата середины кольца определяется как среднее арифметическое между координатами границ. Для получения радиуса кольца необходимо из координаты середины кольца вычесть координату центра кольца. Измерения проводились в две стороны: влево от центра и вправо от центра, итоговый радиус кольца оценивается как среднее арифметическое между радиусами левых центров колец и правых центров.

Результаты измерений радиусов колец:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_{\text{светлые, МКМ}}$	85	150	191	227	253	282	305	328	347	367
$r_{\text{тёмные, МКМ}}$	123	173	210	240	269	295	318	337	358	376

Построим график зависимости квадрата радиуса от номера кольца.

График зависимости квадрата радиуса колец от порядкового номера



Проведём через экспериментальные точки прямые $y = ax + b$ с помощью метода наименьших квадратов:

$a_c, \text{ мм}$	$0,0141 \pm 0,0001$
$b_c, \text{ мм}$	$-0,0057 \pm 0,0005$
$a_t, \text{ мм}$	$0,0140 \pm 0,0001$
$b_t, \text{ мм}$	$0,0018 \pm 0,0004$

Длина волны зелёной линии ртути $\lambda = 546,1 \text{ нм}$.

Оценим радиус кривизны линзы:

$$R_c = 25,8 \pm 0,1 \text{ мм}.$$

$$R_t = 25,7 \pm 0,1 \text{ мм}.$$

Значения радиусов кривизны совпадают в пределах погрешности, поэтому в качестве итогового значения возьмём радиус тёмных колец.

$$R = 25,8 \pm 0,1 \text{ мм}$$

Наблюдение биений

В результате интерференции двух спектральных линий ртутной лампы зелёной $\lambda_2 = 546,1 \text{ нм}$ и жёлто-оранжевой $\lambda_1 = 578,2 \text{ нм}$ наблюдались биения.

В результате наблюдений было установлено, что количество светлых колец в промежутке между центрами четких систем равно $\Delta m = 17$.

Оценим разность между спектральными линиями $\Delta\lambda = \frac{\lambda}{\Delta m} = 32,1 \text{ нм}$.

Обсуждение результатов и выводы

В работе наблюдались кольца Ньютона.

Был определён радиус кривизны линзы $R = 25,8 \pm 0,1$ мм.

По наблюдению биений была определена разность длин волн желто-оранжевой и зелёной спектральных линий $\Delta\lambda = 32,1$ нм. Табличное значение длины волны жёлто-оранжевой спектральной линии $\lambda_1 = 578,2$ нм.

Табличное значение длины волны зелёной спектральной линии $\lambda_2 = 546,1$ нм.

Табличная разность длин волн $\Delta\lambda = 32,1$ нм.