

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 4
Определение радиуса
кривизны линзы
с помощью
колец Ньютона

Ярославль
2013

Оглавление

1. Вопросы для подготовки к работе	3
2. Краткая теория	3
3. Описание установки	7
4. Порядок выполнения работы	7
Задание 1.	7
Задание 2.	7
Задание 3.	8
5. Контрольные вопросы	12

Лабораторная работа № 4

Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона

Цель работы: наблюдение интерференционных колец Ньютона и экспериментальное определение радиуса кривизны линзы.

Приборы и принадлежности: линза длиннофокусная, плоско-параллельная стеклянная пластинка, измерительный микроскоп, полупрозрачная пластинка (стекло, закрепленное в штативе), ртутная лампа.

Литература:

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т.2.
3. Руководство к лабораторным занятиям по физике. под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973.

1. Вопросы для подготовки к работе

1. Что такое кольца Ньютона? Условия возникновения колец.
2. Условия максимальной и минимальной интенсивности света при наблюдении колец в отраженном и проходящем свете.
3. Взаимосвязь между радиусом кольца r и радиусом кривизны линзы R .
4. Установка для получения и наблюдения колец Ньютона в отраженном свете.
5. Рабочая формула и измерение входящих в нее величин.

2. Краткая теория

Классическим примером интерференционных полос равной толщины являются кольца Ньютона. Они наблюдаются при отражении света от соприкасающихся друг с другом плоскопараллельной толстой стеклянной пластинки и плоско-выпуклой линзы с большим радиусом кривизны (рис. 2.1). (В принципе система может состоять и

из двух линз с большим радиусом кривизны, причём не обязательно плоско-выпуклых). Роль тонкой плёнки, от поверхности которой отражаются когерентные волны, играет воздушный зазор между пластинкой и линзой (или воздушный зазор между двумя линзами). Вследствие большой толщины пластинки и линзы и невысокой степени когерентности источника света не возникает интерференционной картины за счёт отражений от других поверхностей. При нормальном падении света полосы равной толщины имеет вид концентрических окружностей, при наклонном падении — эллипсов.

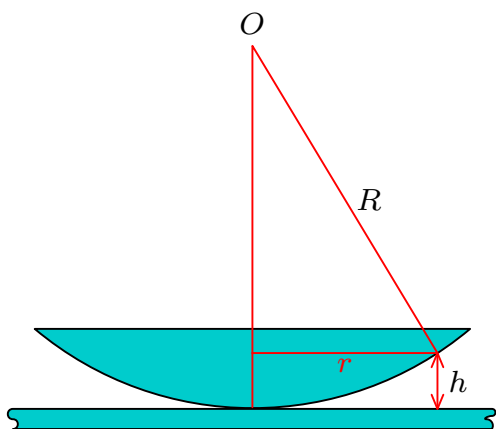


Рис. 2.1

Рассмотрим схему возникновения и локализации колец Ньютона при наклонном падении света (рис. 2.2 а, б). Пусть ab — небольшая часть нижней поверхности линзы, а cd — верхняя поверхность стеклянной пластинки.

Рассмотрим луч света, падающий на поверхность воздушной прослойки. На поверхности ab в точке A происходит частичное отражение и преломление луча. Таким образом, падающий луч разделился на два когерентных луча 2 и 1.

Второй луч на поверхности cd в точке B претерпевает аналогичный процесс разделения. Здесь нас интересует только отражённый

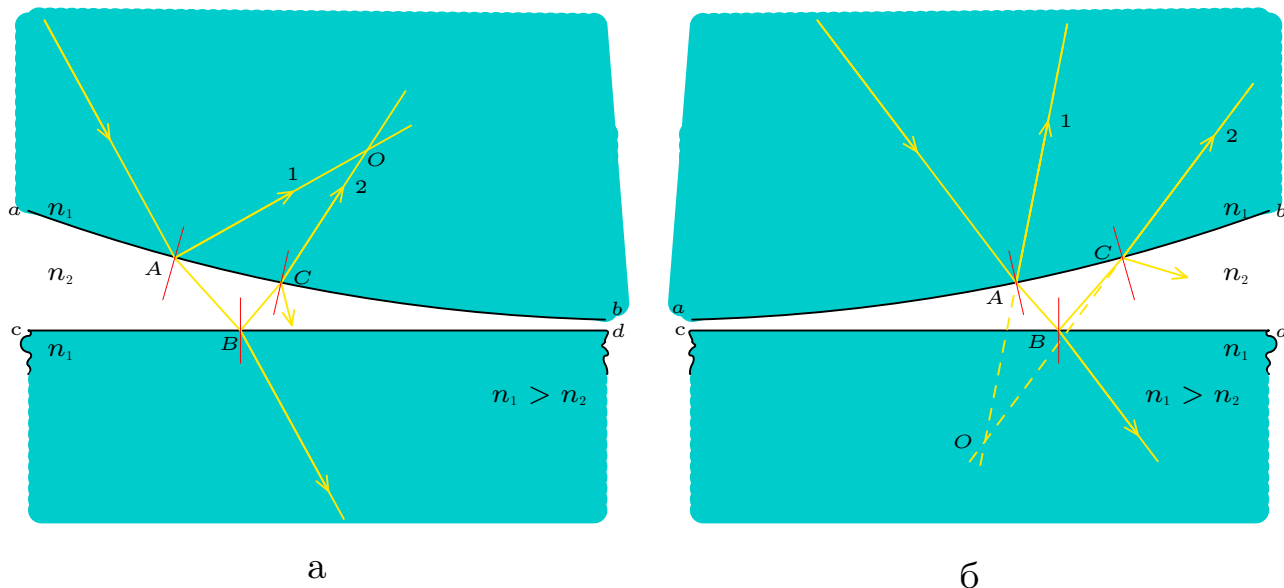


Рис. 2.2

Второй луч на поверхности cd в точке B претерпевает аналогичный процесс разделения. Здесь нас интересует только отражённый

луч. Ситуация повторяется и в точке C , но здесь для нас важен преломлённый луч. В результате первый луч и часть второго встречаются над воздушной прослойкой (рис. 2.2 а), в точке O , которая лежит на поверхности локализации интерференционной картины. В ситуации, показанной на рис. 2.2 б, полосы равной толщины локализуются под воздушной прослойкой.

При наклонном освещении системы “линза - пластинка” встречаются обе ситуации, поэтому понятно, что поверхность локализации интерференционной картины будет пересекать воздушную прослойку, т.е. будет несимметрична относительно оси системы OO' (рис. 2.1), которая является и осью наблюдения. Кроме того, расчёт разности хода лучей 1 и 2 в случае наклонного падения представляет собой довольно громоздкую геометрическую задачу.

Эти трудности можно обойти, если рассмотреть лучи, падающие нормально к поверхности плоскопараллельной пластинки (Следует обратить внимание на то, что на плоскую поверхность линзы в этом случае должен падать не строго параллельный пучок света, а слабо расходящийся.) В этом случае поверхность локализации совпадает с нижней (сферической) поверхностью линзы, т.е. является симметричной оси наблюдения и разность хода вычисляется очень просто (см. ниже).

Найдём радиусы колец Ньютона, получающиеся при падении света нормально к верхней (плоской) поверхности линзы (а не к поверхности пластинки!), т.к. это существенно проще практически сделать. При вычислении разности хода мы должны пренебречь в этом случае небольшими неизбежными наклонами лучей, проходящих в воздушном зазоре. (Т.е. падение лучей к поверхности плоскопараллельной пластинки будет несколько не перпендикулярным, но эксперимент при этом облегчается существенно.)

Оптическая разность хода Δ в этом случае равна удвоенной толщине воздушного зазора (см. рис. 2.1; предполагается, что $n_2 = 1$). Как следует из рис. 2.1,

$$r^2 = R^2 - (R - h)^2 = 2Rh - h^2, \quad (2.1)$$

где R — радиус кривизны выпуклой поверхности линзы,
 r — радиус окружности, всем точкам которой соответствует одинаковый зазор h .

Принимая во внимание, что $2R \gg h$, получим

$$h \approx \frac{r^2}{2R}. \quad (2.2)$$

Известно, что свет, отражённый от границы стекло-воздух по сравнению со светом, отражённым от границы воздух-стекло приобретает дополнительный фазовый сдвиг на π , что соответствует разности хода $\frac{\lambda}{2}$. Полная разность хода, таким образом, равна:

$$\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}. \quad (2.3)$$

Запишем условие минимума освещённости в интерференционной картине

$$\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}; \quad m = 0; 1; 2; \dots \quad (2.4)$$

Принимая во внимание (2.3), получим для радиусов тёмных колец

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}. \quad (2.5)$$

Аналогичным образом для радиусов светлых колец найдём

$$r'_m = \sqrt{(2m - 1)\frac{R\lambda}{2}}. \quad (2.6)$$

Измеряя радиусы светлых или тёмных колец, с помощью (2.5) или (2.6) можно определить R , если известна λ .

3. Описание установки

Установка для получения колец Ньютона и определения их радиусов (рис. 3.1) состоит из микроскопа M , на столик которого кладётся плоская стеклянная пластинка Π , а на неё помещается линза L . Для обеспечения неподвижности пластинка и линза зафиксированы в специальной обойме. Система “линза - пластинка” освещается

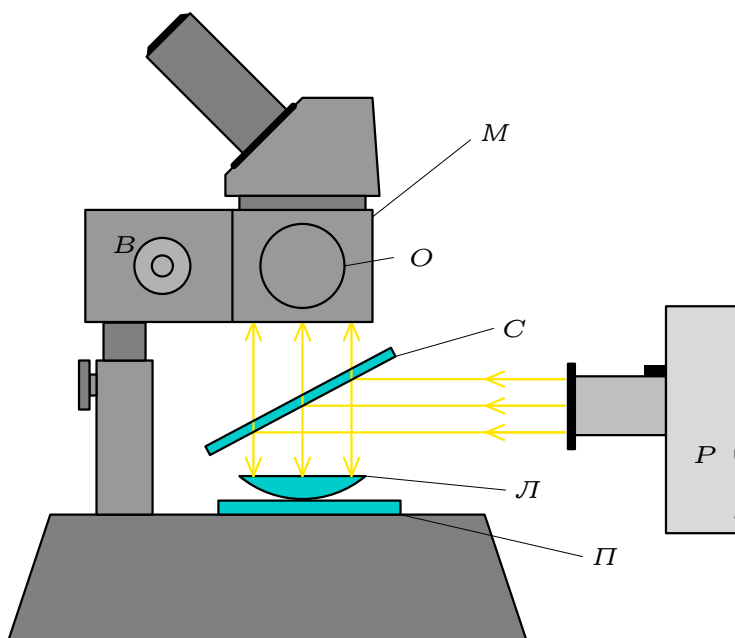


Рис. 3.1

светом ртутно-кварцевой лампы P с помощью полупрозрачной пластинки C (стеклянная пластинка, укреплённая в штативе). Свет от источника P , отражаясь от пластинки C , попадает на линзу L , интерферирует в воздушном клине, образованном в месте соприкосновения линзы и пластинки, и попадает в объектив микроскопа M , с помощью которого наблюдаются кольца Ньютона. Диаметр кольца измеряется окулярным микрометром (шкала в окуляре). На резкость микроскоп наводится винтом B , а разное увеличение можно получить, переключая разные объективы барабаном O . На лимбе барабана O нанесены значения увеличений объективов.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Ознакомиться с описанием и собрать оптическую схему установки.

Задание 2. Настроить установку, для чего:

- а) включить ртутно-кварцевую лампу и вывести её на рабочий режим согласно инструкции;

-
- б) винтом O установить минимальное увеличение микроскопа, а вращением рифлёного кольца на окуляре — максимальную резкость шкалы окулярного микрометра;
- в) изменяя угол наклона стеклянной пластинки C и передвигая её, добиться появления в центре поля зрения отражения ртутно-кварцевой лампы (плоскопараллельная пластинка и линза в это время должны находиться на столике микроскопа, примерно соосно с объективом);
- г) отфокусировать микроскоп с помощью винта B , примерно на поверхность плоскопараллельной пластинки. (Здесь не нужна очень высокая точность фокусировки, т.к. при минимальном увеличении микроскоп имеет значительную глубину резкости.);
- д) найти в поле зрения радужно окрашенные кольца Ньютона (при минимальном увеличении микроскопа кольца будут очень маленькими, примерно два угловых градуса, поэтому смотреть нужно очень внимательно!). Если кольца не обнаруживаются, то попробуйте слегка перемещать по столику микроскопа обойму с линзой и пластинкой, т.к. возможно, что кольца Ньютона находятся вне поля зрения микроскопа;
- е) получив изображение колец, передвиньте их в центр поля зрения на пересечение нитей окулярного микрометра и окончательно сфокусируйте;
- ж) винтом O установите такое увеличение микроскопа, чтобы в поле зрения находилось около 30 колец. При изменении увеличения каждый раз требуется подфокусировка из изображения колец винтом B .

Задание 3. Определить радиус кривизны линзы.

Для измерений следует использовать жёлтые, зеленые или фиолетовые кольца (по указанию преподавателя). При этом наблюдать кольца нужно соответственно через оранжевый, зелёный или фиолетовый светофильтры. Соответствующие линии в спектре ртути имеют длины волн:

$$\lambda_{\text{ж}} = 5780 \text{ \AA}$$

4. Порядок выполнения работы

$$\lambda_3 = 5461 \text{ \AA}$$

$$\lambda_\Phi = 4358 \text{ \AA}$$

С помощью окулярного микрометра следует измерить диаметры не менее чем пятнадцати тёмных колец. Диаметр каждого кольца измеряется не менее чем в трёх различных направлениях. Измерения удобно делать “по направлениям”, т.е. сначала измеряются диаметры всех колец в одном направлении (тёмное пятно в центре считать за нулевое кольцо), затем поворачиваем окуляр (меняем направление) и повторяем процедуру. Если решено ограничиться тремя направлениями, то их следует выбирать примерно под углом 120° по отношению друг к другу. Для экономии времени не надо измерять диаметр сразу. Дело пойдет быстрее, если снимать только отсчёты соответствующих колец, по разные стороны от центра шкалы микрометра (центр шкалы находится на отсчёте 90). Затем по отсчётам вычисляют диаметр и радиус кольца в соответствующем направлении.

Пример:

m	Направление	Отсчет		Диаметр (дел)	r_i (дел)	r_i (мм)
		1	2			
8	0°	51	139	88	44	
	120°	49	140	91	45,5	и т.д.
	240°	50	140	90	45	
	и т. д.					

Первоначально радиусы колец вычисляются в делениях шкалы микрометра, а затем переводятся в миллиметры с учётом того, что цена деления окулярного микрометра зависит от увеличения объектива:

Увеличение объектива	1^x	2^x	4^x	7^x
Цена деления $\left(\frac{\text{мм}}{\text{дел}}\right)$	0,10	0,05	0,025	0,0143

По результатам измерений колец Ньютона в различных направлениях нужно найти средний квадрат радиуса каждого кольца и среднюю квадратичную ошибку по формуле

$$\Delta(r^2) = t_{\alpha n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta(r^2)_i]^2}{n(n-1)}}.$$

Результаты измерений и вычислений удобно занести в таблицу следующей формы:

m	Направление	Отсчет		Диаметр (дел)	r_i (дел)	r_i (мм)	$(r^2)_i$ (мм ²)	$\overline{(r^2)}_m$ (мм ²)	$\Delta(r^2)_i$	$\Delta(r^2)_m$
		1	2							
1	0°									
	120°									
	240°									
2	0°									
	120°									
	240°									
⋮										

Используя полученные данные, построить график зависимости

$$\overline{(r^2)} = f(m).$$

Согласно теории (см. соотношение (2.5)) этот график должен представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат. Наклон прямой определяется радиусом кривизны линзы и длиной волны λ . Определяя тангенс угла наклона прямой, находят R .

$$R = \frac{1}{\lambda} \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.7)$$

4. Порядок выполнения работы

Точки на график следует наносить с учётом ошибок $\Delta(r^2)$ (т.е. это будут уже не точки, а вертикальные отрезки длиной $2\Delta(r^2)$; см. рис. 4.1).

Потому, насколько близко экспериментальные точки группируются вдоль прямой, можно судить о качестве аппаратуры. Прямая проводится так, чтобы она наилучшим образом совпадала с экспериментальными точками. Другими словами,

примерно одинаковое количество точек должно находиться как выше, так и ниже прямой и группироваться к ней максимально близко.

Деформация линзы и стеклянной пластинки в месте их соприкосновения может приводить при малых m к отступлению от формулы (2.5). К точкам, полученным для малых m , следует поэтому относиться с осторожностью. Меньше всего искажены деформацией кольца с большими номерами. При проведении прямой на них следует поэтому обращать основное внимание. Ясно, что при наличии таких искажений прямая, проведённая через экспериментальные точки, соответствующие не слишком малым значениям номера m , не пройдёт через начало координат. При неполном неплотном контакте между линзой и пластинкой (например, попала пыль) прямая дополнительно сдвинется от начала координат. Такой сдвиг прямой относительно начала координат не приводит к изменению её наклона, а следовательно, и к изменению значения радиуса кривизны линзы R .

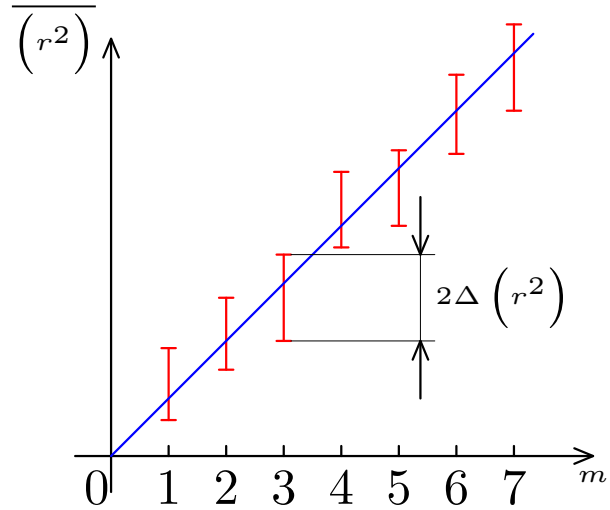


Рис. 4.1

5. Контрольные вопросы

1. От чего зависит количество наблюдаемых колец?
2. Почему наблюдаемые кольца имеют радужную окраску? В каком случае мы будем наблюдать темные и светлые кольца?
3. Почему по мере удаления от центра кольца располагаются ближе друг к другу?
4. Что произойдет с кольцами Ньютона, если промежуток между линзой и пластинкой заполнить жидкостью с $n_{\text{жид}} > n_{\text{возд.}}$?
5. Можно ли при наблюдении колец Ньютона в отраженном свете получить в центре не темное, а светлое кольцо? Если да, то сформулируйте условия, которые для этого необходимы.