

Определение радиуса кривизны поверхности линзы методом колец Ньютона.

Цель работы.

Цель работы – определить радиус кривизны выпуклой сферической поверхности (одной из поверхностей стеклянной линзы) методом колец Ньютона.

Метод колец Ньютона является распространенным и простейшим средством оценки радиусов кривизны оптических поверхностей в лабораторной практике. При этом более точные методы и устройства в большинстве своем основаны на тех же самых идеях, что и рассматриваемый метод.

Кольца Ньютона.

Если на выпуклую поверхность линзы положить плоскопараллельную пластинку, то между линзой и пластинкой окажется тонкий слой воздуха. Если на эту систему падает пучок монохроматического света, то световые волны, отраженные от верхней и нижней границ слоя, будут интерферировать.

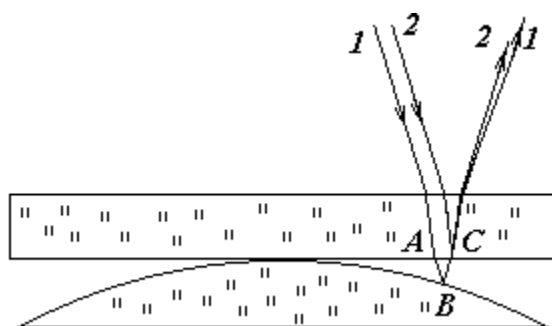


Рис.1

На **Рис.1** показаны два интерферирующих луча. Луч 1 проходит воздушную прослойку AB , отражается в точке B от поверхности линзы и в точке C интерферирует с лучом 2, который отражается от поверхности пластинки. Результат интерференции зависит от оптической разности хода этих лучей. Если толщина воздушного слоя равна δ , то оптический путь одного из лучей будет длиннее на 2δ ; кроме того, при отражении света от более плотной среды фаза волны меняется на π , что соответствует добавочной разности хода $\lambda/2$, где λ – длина волны излучения. Следовательно, оптическая разность хода интерферирующих лучей будет

$$\Delta = 2\delta + \lambda/2 \quad (1)$$

Так как разность хода зависит от толщины воздушного слоя δ , то в разных точках пластинки мы обнаружим различный результат интерференции: либо увеличение, либо уменьшение амплитуды световых колебаний – будут наблюдаться интерференционные **полосы равной толщины**. Для всех точек, расположенных на одной окружности с центром в точке соприкосновения плоской поверхности пластинки со сферической поверхностью линзы, толщина воздушного слоя δ одинакова, поэтому интерференционная картина имеет вид чередующихся темных и светлых концентрических колец. Эти кольца и называются **кольцами Ньютона**.

Светлое кольцо образуется, когда разность хода лучей равна целому числу длин волн:

$$\Delta = m\lambda \quad (2)$$

а темное – полуцелому:

$$\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (3)$$

Здесь m – **порядок интерференции** – целое число, указывающее, сколько длин волн укладывается в разности хода Δ . Для центра интерференционной картины $\delta = 0$, следовательно, $\Delta = \lambda/2$ и $m = 0$ – т.е., в центре образуется темное пятно. Первая пара светлого и темного колец соответствует $m = 1$, вторая – $m = 2$, и т.д. Таким образом, число m в рассматриваемом случае обозначает также номер кольца, считая от центра картины.

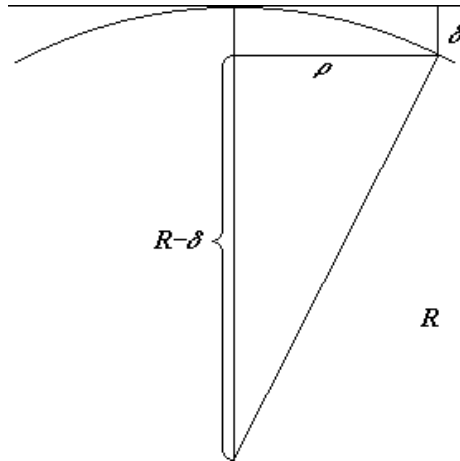


Рис.2

Найдем связь между толщиной воздушного слоя δ , радиусом кольца ρ и радиусом кривизны поверхности линзы R . Из **Рис.2** видно, что

$$(R - \delta)^2 + \rho^2 = R^2.$$

Раскрывая скобки и пренебрегая малой величиной δ^2 , получим:

$$\delta = \frac{\rho^2}{2R}. \quad (4)$$

Теперь подставим (4) в (1) и при помощи выражений (2) и (3) найдем радиусы темных и светлых колец, соответственно:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{темн}} &= \sqrt{m\lambda R}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \\ \rho_{\text{светл}} &= \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda R}, \quad m = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (5)$$

где m – номер кольца.

Таким образом, измерив радиусы колец Ньютона можно определить радиус кривизны поверхности линзы R .

Задача работы и описание лабораторной установки

В работе определяется радиус кривизны выпуклой поверхности стеклянной линзы. Для получения интерференционной картины на линзу накладывается плоскопараллельная стеклянная пластинка. Всё устройство освещается монохроматическим светом зеленой линии ртути; длина волны $\lambda = 546,1$ нм. Радиусы колец Ньютона, наблюдаемых в отраженном свете, определяются с помощью отсчетного микроскопа.

Схема лабораторной установки в упрощенном виде показана на **Рис.3**. Исследуемая линза **11** и наложенная на нее пластинка **10** вставлены в оправу и поджаты винтами. Свет от

ртутной лампы **9** проходит через светофильтр **8**, выделяющий монохроматическое излучение зеленой линии ртути, падает на пластину **7**, расположенную под углом около 45° по отношению к пластинке **10**. Часть этого излучения, которая отражается (вниз) от пластины **7** и затем падает на поверхности **A** (линзы) и **B** (пластины), после отражения от них проходит (вверх) сквозь пластину **7** и попадает в объектив отсчетного микроскопа **1**. Окуляр микроскопа фокусируется на визирный крест нитей **2**, позволяющий фиксировать наведение микроскопа на изображение нужной интерференционной полосы. Тубус микроскопа укреплен на подвижной каретке **3**, имеющей отсчетное приспособление **4** со шкалой **6** для измерения поперечных перемещений микроскопа. Для плавного перемещения и точного отсчета положения микроскопа служит микрометрический винт с барабаном **5**.

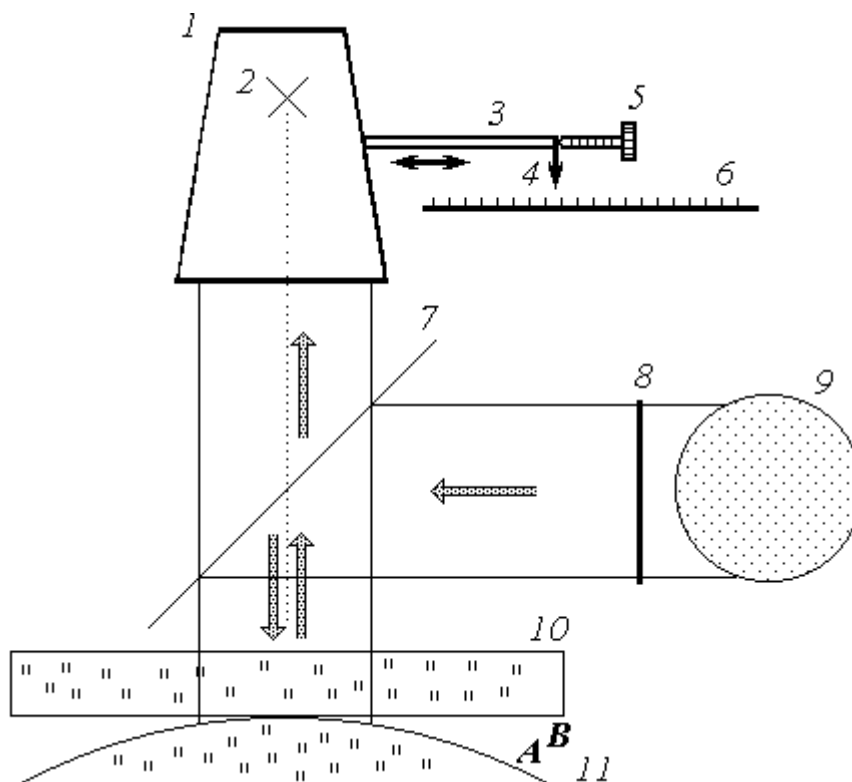


Рис.3.

Уточнение модели экспериментального материала.

При наблюдении колец Ньютона нужно учесть, что при совмещении двух поверхностей не исключена хотя и небольшая по величине, но вполне соизмеримая с длиной волны деформация обеих поверхностей в некоторой окрестности точки касания. Кроме того, каждая из поверхностей может иметь небольшие, но трудно устранимые загрязнения, нарушающие плотный контакт между ними. Тогда в простейшем случае толщина воздушной прослойки на расстоянии ρ от центра симметрии интерференционной картины будет $\delta + d$, где величина δ по-прежнему определяется формулой (4), а d – поправка. Для разности хода вместо выражения (1) получим

$$\Delta = 2(\delta + d) + \frac{\lambda}{2}$$

Подставляя сюда выражение для δ по (4) и применяя условия (2) и (3) получим для радиусов темных и светлых колец выражения

$$\rho_{\text{темн}} = \sqrt{m\lambda R - 2dR},$$

$$\rho_{\text{светл}} = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda R - 2dR}. \quad (6)$$

В этих формулах порядок интерференции m уже не совпадает с номером кольца и нам неизвестен, так как неизвестно d . При этом в центре интерференционной картины может наблюдаться как темное, так и светлое пятно, или же какой-то промежуточный случай.

Введем номер кольца $n = m - m_0$ (m_0 нам неизвестно) и перепишем выражения (6) в виде:

$$\rho_n^2 = n\lambda R + B, \quad (7)$$

где ρ_n – радиус кольца номер n , B – неизвестная постоянная. Уравнение (7) описывает как систему светлых, так и систему темных колец, но значение B для каждой из систем колец – свое.

Из (7) видно, что квадрат радиуса кольца связан с его номером линейной зависимостью. Определив радиусы нескольких колец, можно вычислить коэффициент λR и, зная длину волны λ , найти R .

Измерения и обработка результатов.

В реальной установке измерения радиусов колец не вполне надежны, поскольку трудно контролировать наведение микроскопа точно на центр системы колец. Поэтому вместо радиусов колец проводят измерения длин хорд (**Рис.4**).

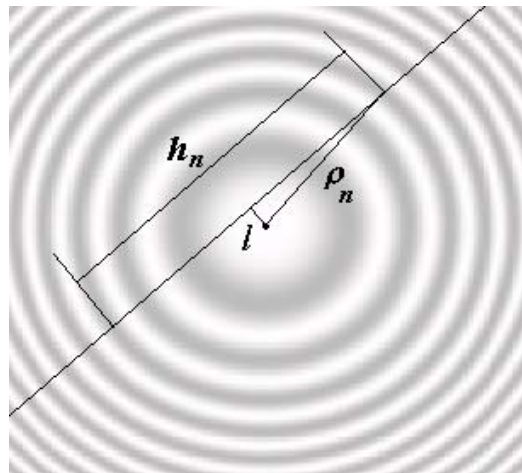


Рис.4.

Согласно теореме Пифагора,

$$\rho_n^2 = \left(\frac{h_n}{2}\right)^2 + l^2, \quad (8)$$

где h_n – длина хорды, вырезаемой кольцом с номером n на прямой, проходящей на (неизвестном) расстоянии l от центра системы колец (см. **Рис.4**).

Подставляя (8) в (7), получим окончательное выражение, содержащие величины, доступные измерению:

$$\boxed{h_n^2 = 4n\lambda R + b}, \quad (9)$$

где b – неизвестная постоянная величина.

Таким образом, измерение радиусов колец можно заменить измерением длин хорд вдоль прямой линии, пересекающей систему колец.

При измерении длины хорды, чтобы устранить ошибки, связанные с люфтом микрометрического винта, нужно фиксировать концы хорды, подводя микроскоп всегда в одном направлении.

Лучше всего проводить измерения так. Отведите микроскоп на край наблюдаемой системы колец. Постепенно перемещая тубус микроскопа через систему колец, делайте отсчеты последовательно для каждого кольца: $\mu_N, \mu_{N-1}, \dots, \mu_1, \mu'_1, \dots, \mu'_{N-1}, \mu'_N$. Затем вычислите длины хорд: $h_n = \mu_n - \mu'_n$.

Измерения, как обычно, продельывают несколько раз при прямом и обратном движении микроскопа. Хотя формула (9) верна как для системы темных, так и светлых колец, при измерениях лучше пользоваться темными кольцами, так как для них наведение микроскопа получается точнее.

Если винты, зажимающие линзу и пластинку, зажаты слишком сильно, возникшие напряжения приведут к тому, что поверхности деформируются, и форма кольца исказится. Кроме того, точность наведения микроскопа на середину полосы может меняться в зависимости от того, под каким углом мы пересекаем полосу. Чтобы рандомизировать ошибки, связанные с этими (и другими) причинами, нужно провести несколько серий измерений, всякий раз меняя положение системы линза – пластинка, смещая и поворачивая систему.

При обработке результатов для каждой серии измерений строим график зависимости квадрата длины хорды от номера n . Находим значение радиуса кривизны для каждой серии, затем значения усредняем.

Дополнительное задание. Обработку результатов можно провести с использованием метода наименьших квадратов. В этом случае расчеты рационально проводить на ЭВМ.

Преобразуем формулу (9) к виду

$$y = ax + b.$$

Для каждой серии измерений i методом наименьших квадратов вычисляем значения постоянных a_i и b_i и находим значение радиуса кривизны R_i .

Обратите внимание: так как y связано с h нелинейной зависимостью, $y = h^2$, то при равнооточных измерениях h дисперсия величины y меняется от кольца к кольцу, т.е. измерения получаются неравнооточными. Значит при применении метода наименьших квадратов нужно учитывать веса измерений.

Полученный ряд значений R_i обрабатывают как результаты нескольких серий измерений (см. В.А.Соловьев и В.Е.Яхонтова. Руководство к лабораторным работам по физике §6.5 «сопоставление результатов измерений, проведенных разными методами», стр.250 – 253. Или В.А.Соловьев и В.Е. Яхонтова. Элементарные методы обработки результатов измерений, § 8, стр.37 – 39).

После того как все расчеты на ЭВМ проведены, постройте график, нанеся на него все экспериментальные точки (все серии на одном графике). Для этого по оси абсцисс отложите номер кольца n , а по оси ординат $y_{ni} - b_i$. По экспериментальным точкам проведите (на глаз!) прямую. Она должна пройти через начало координат. По наклону прямой определите радиус R и его погрешность. Сравните с результатом, полученным вычислением.