

Министерство высшего и среднего специального
образования БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра физики № 1

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе "Определение радиуса
кривизны линзы с помощью колец Ньютона"
по курсу "Физика"

М и н с к 1 9 8 5

В методических указаниях излагаются основные закономерности и понятия, связанные с интерференцией света. Описана методика определения радиуса кривизны линзы из наблюдения колец Ньютона в отраженном свете.

Составили:

В.А.Самойлюкович, М.С.Тижович

Рецензенты:

Л.Л.Гольман, Т.И.Стрелкова

Цель работы: 1. Изучить явление интерференции света.

2. Определить радиус кривизны линзы.

Приборы и принадлежности: микроскоп, линза, плоскопараллельная пластинка.

I. Интерференция света

Для световых волн при не слишком больших интенсивностях применим принцип суперпозиции: результирующая напряженность электрического (магнитного) поля при наложении нескольких световых волн равна векторной сумме напряженностей электрических (магнитных) полей каждой из волн в отдельности.

Рассмотрим простейший случай наложения световых волн одинаковой частоты ω в точке O от двух источников. Пусть в точках S_1 и S_2 возбуждаются гармонические колебания, описываемые уравнениями

$$E_1 = E_{10} \cos(\omega t + \alpha_1);$$

$$E_2 = E_{20} \cos(\omega t + \alpha_2),$$

где E_{10} , E_{20} , α_1 , α_2 — амплитуды и начальные фазы колебаний. Если векторы напряженностей электрических полей волн E_1 и E_2 перпендикулярны к плоскости рисунка (рис. 1), то в точке O про-

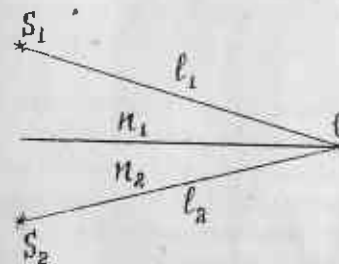


Рис. 1

исходит сложение двух колебаний одинаковой частоты и направленных вдоль одной и той же прямой

$$E_1 = E_{10} \cos\left[\omega\left(t - \frac{l_1}{v_1}\right) + \alpha_1\right]; \quad (I)$$

$$E_2 = E_{20} \cos\left[\omega\left(t - \frac{l_2}{v_2}\right) + \alpha_2\right],$$

где $v_1 = c/n_1$ и $v_2 = c/n_2$ — фазовые скорости света в средах с показателями преломления n_1 и n_2 ; c — скорость света в вакууме; l_1 и l_2 — геометрические длины путей света, т.е. расстояния, пройденные светом от источников до точки O .

Квадрат амплитуды результирующего колебания в точке O определяется выражением

$$E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos \delta, \quad (2)$$

где разность фаз колебаний

$$\delta = \omega \left(\frac{l_1}{v_1} - \frac{l_2}{v_2} \right) + (\alpha_2 - \alpha_1). \quad (3)$$

Так как интенсивность света I пропорциональна квадрату амплитуды колебаний вектора напряженности электрического поля, то

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (4)$$

Последнее слагаемое в (4) называют интерференционным членом.

Рассмотрим два возможных случая.

1. Разность фаз δ за время наблюдения Δt хаотически изменяется, принимая с одинаковой вероятностью любые значения от 0 до 2π . Следовательно, в этом случае среднее за время Δt значение $\cos \delta$ равно нулю, интерференционный член $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta = 0$, результирующая интенсивность

$$I = I_1 + I_2. \quad (5)$$

Такие волны некогерентны. Интенсивность света, наблюдаемая при наложении некогерентных волн, равна сумме интенсивностей, создаваемых в данной точке каждой из волн в отдельности, — интерференция отсутствует.

2. Разность фаз δ остается постоянной за время наблюдения Δt . Такие волны называются когерентными. Строго когерентными могут быть только идеально монохроматические волны одинаковой частоты. В случае когерентных волн $\cos \delta$ имеет постоянное во времени, но свое для каждой точки пространства значение. Результирующая интенсивность в данной точке пространства зависит от разности фаз интерферирующих волн.

$$I \neq I_1 + I_2. \quad (6)$$

В тех точках пространства, для которых $\cos \delta > 0$, I будет пре-

вышать $I_1 + I_2$; в точках, для которых $\cos \delta < 0$, I будет меньше $I_1 + I_2$.

Интерференция света — перераспределение световой энергии в пространстве при наложении когерентных волн. В результате такого перераспределения в одних точках пространства происходит усиление интенсивности света, в других — ослабление.

Интерференционная картина при наложении монохроматических волн состоит из чередующихся минимумов и максимумов интенсивности. В случае интерференции белого света полосы окрашены (масляные пленки на воде, мыльные пузырьки и т.д.).

В силу поперечности световых волн наиболее отчетливая интерференционная картина при прочих одинаковых условиях получается, если колебания векторов \vec{E} напряженности электрического поля совершаются вдоль одного и того же направления.

Интерференционная картина не наблюдается ни при каких условиях, если векторы \vec{E} накладываются волн взаимно перпендикулярны.

Найдем условие максимума и минимума интенсивности при интерференции двух световых волн. Для когерентных волн $\alpha_2 - \alpha_1$ постоянна, и, следовательно, интенсивность света в разных точках зависит только от первого слагаемого в (3). Если начальные фазы обеих волн одинаковы ($\alpha_1 = \alpha_2$), то

$$\delta = \omega \left(\frac{l_1}{v_1} - \frac{l_2}{v_2} \right) = \frac{2\pi}{T} \left(\frac{l_1 n_1}{c} - \frac{l_2 n_2}{c} \right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (l_1 n_1 - l_2 n_2), \quad (7)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

где λ_0 — длина волны света в вакууме; $\Delta = l_1 n_1 - l_2 n_2$ — оптическая разность хода лучей; $L = nL$ — оптическая длина пути луча в однородной среде; $l_1 - l_2$ — геометрическая разность хода лучей.

При определении оптической разности хода лучей следует помнить, что если имеет место отражение света от среды с большим показателем преломления (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления (оптически менее плотную), происходит изменение фазы на π , т.е. возникает добавочная разность хода в $\frac{\lambda_0}{2}$ (потеря полу волны).

Из (7) видно, что оптическая разность хода двух волн Δ бу-

лет иметь место даже в том случае, когда начальные фазы обеих волн были одинаковы.

Из (4) следует:

1. Результирующая интенсивность I при наложении двух когерентных волн максимальна

$$I = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2, \quad (8)$$

если

$$\delta = 2\pi m; \quad (9)$$

$$\Delta = m\lambda_0,$$

где m - порядок интерференционного максимума, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

2. Результирующая интенсивность минимальна

$$I = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2, \quad (10)$$

если

$$\delta = (2m + 1)\pi; \quad (11)$$

$$\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda_0}{2},$$

где m - порядок интерференционного минимума, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Особенно отчетливо интерференционная картина проявляется в том случае, когда $I_1 = I_2$. В максимумах $I = 4I_1$ (волны придут в одинаковой фазе и усилят друг друга), в минимумах $I = 0$ (волны придут в противофазе и погасят друг друга).

Источники света принято называть когерентными или некогерентными в зависимости от свойств испускаемого ими излучения. В основном все источники света, за исключением лазерных, некогерентны. Свет, испускаемый некогерентным источником, представляет собой наложение (суперпозицию) колебаний, испускаемых отдельными атомами. Возбужденные атомы испускают свет независимо друг от друга в виде отдельных кратковременных пучков волн. Начальные фазы соответствующих им пучков волн никак не связаны между собой. Даже для одного и того же атома значения начальных фаз разных пучков хаотически изме-

няются от одного акта испускания этого атома к другому.

Когерентные световые волны можно получить, разделив (путем отражения или преломления) волну, излучаемую одним (даже некогерентным) источником, на две части.

В любом случае, однако, для когерентности существуют свои временные и пространственные границы, обусловленные монохроматичностью и неточностью источника, который всегда имеет некоторую спектральную ширину $\Delta\nu$ и конечные геометрические размеры, определяющие соответственно временную и пространственную когерентности.

Максимальное значение промежутка времени, при котором когерентность еще сохраняется, называется временем когерентности света $\tau_{\text{ког}}$, а соответствующая оптическая длина пути - длиной когерентности $l_{\text{ког}}$. Можно показать, что

$$\tau_{\text{ког}} \sim \frac{1}{\Delta\nu} = \frac{2\pi}{\Delta\nu}, \quad (12)$$

где $\Delta\nu$ - ширина спектрального интервала в шкале частот.

$$l_{\text{ког}} = \nu \tau_{\text{ког}} = \frac{c}{\nu} \tau_{\text{ког}} = \frac{c}{\nu \Delta\nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (13)$$

Длины когерентности для газовых лазеров непрерывного действия порядка $10^2 - 10^3$ м, для Солнца - 10^{-6} м, для света атомных спектральных линий - 1 м.

Наличие или отсутствие когерентности зависит не только от характеристик самих волн, но и от промежутка времени Δt регистрации интенсивности. Одна и та же пара волн может быть когерентной при одном времени Δt и некогерентной при другом. В любом случае две волны когерентны при $\Delta t < \tau_{\text{ког}}$, некогерентны при $\Delta t > \tau_{\text{ког}}$ и частично когерентны при $\Delta t \sim \tau_{\text{ког}}$, где Δt - время наблюдения.

2. Интерференционные полосы равной толщины - кольца Ньютона

При освещении тонких прозрачных пленок расщепление световой волны на два когерентных пучка происходит вследствие отражения света передней и задней поверхностями пленки. Если выпуклая поверхность линзы малой кривизны соприкасается с плоскопараллельной

хорошо отполированной стеклянной пластинкой, то образующаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от точки соприкосновения к краям. Пучок параллельных лучей падает сверху на линзу (рис. 2). Луч, доходящий до точки A , частично отражается, а частично проходит в воздушный клин (практически вертикально из-за малой кривизны линзы). Отражаясь в точке B от пластинки, он возвращается обратно и интерферирует с лучом, отраженным в точке A . Оптическая разность хода обоих интерферирующих отраженных лучей будет

$$\Delta = 2AB + \frac{\lambda}{2} = 2hn + \frac{\lambda}{2}, \quad (14)$$

где показатель преломления воздуха n равен единице. При отражении в точке B теряется половина длины волны, так как отражение происходит от оптически более плотной среды. В точке A отражение происходит от оптически менее плотной среды, поэтому фаза не меняется.

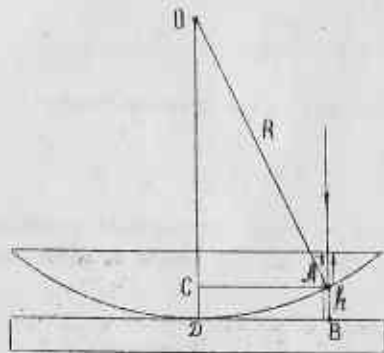


Рис. 2

Минимум освещенности будет в тех местах, где оптическая разность хода равна нечетному числу длин полуволн

$$2h + \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad h = m \frac{\lambda}{2}, \quad (15)$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

При переходе от одного темного кольца к соседнему разность хода изменится на λ , а толщина воздушной прослойки — на $\frac{\lambda}{2}$. При переходе от m -го кольца к $(m+1)$ -ому толщина воздушной прослойки возрастает на $(m+1) \frac{\lambda}{2}$. Максимум освещенности будет в тех местах, для которых оптическая разность хода равна четному числу длин полуволн

$$2h + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad h = (2m+1) \frac{\lambda}{4}. \quad (16)$$

В нашем случае моста с одинаковой толщиной h воздушной прослойки образуют concentric окружности с центром в точке соприкосновения линзы и пластинки, поэтому интерференционные полосы имеют форму колец и представляют собой интерференционные полосы равной толщины. Ньютон установил связь между радиусом колец и радиусом кривизны линзы.

При освещении линзы монохроматическим светом в отраженном свете в месте соприкосновения поверхности линзы и пластинки наблюдается круглое черное пятно, так как в этом месте геометрическая разность хода равна нулю (h очень мало), и лишь теряется половина при отражении от плоской стеклянной поверхности. Это центральное пятно окружено рядом concentric светлых и черных колец убывающей ширины и интенсивности (рис. 3). В проходящем свете наблюдается дополнительная картина: в центре — светлое круглое пятно, вокруг него — ряд чередующихся черных и светлых колец, причем все светлые кольца наблюдаются в проходящем свете как раз в тех местах, где в отраженном наблюдались черные, и наоборот.

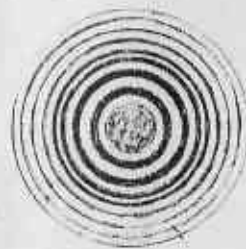


Рис. 3

Если освещать линзу белым светом, то центральное темное пятно в отраженном свете будет окружено кольцами чередующихся цветов от фиолетового до красного. При этом для удаленных от центра колец наблюдается наложение максимумов разного порядка для различных длин волн: максимумы высших порядков для меньших длин волн накладываются на максимумы низших порядков для больших длин волн. В проходящем свете наблюдается обратная картина: центральное пятно светлое, а затем — кольца, имеющие оттенки, дополнительные к оттенкам отраженной картины.

3. Определение радиуса кривизны линзы из наблюдения колец Ньютона в отраженном свете

Найдем зависимость радиуса колец Ньютона от радиуса кривизны линзы. Рассмотрим треугольник AOC (рис. 2). $AO = R$ - радиус кривизны линзы; $AC = BD = r$ - радиус кольца; $AB = h$ - толщина воздушной прослойки.

$$r^2 = R^2 - (R-h)^2 = 2Rh - h^2;$$

так как $h \ll R$, то $h^2 \ll 2Rh$;

$$r^2 = 2Rh. \quad (I7)$$

Подставив (I5) в (I7), получаем выражение для радиуса m -го темного кольца

$$r_m^2 = 2mR \frac{\lambda}{2} = mR\lambda, \quad \text{где } m = 1, 2, 3, \dots \quad (I8)$$

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}.$$

Для n -го темного кольца

$$r_n = \sqrt{nR\lambda}. \quad (I9)$$

Из (I6) и (I7) находим формулу для радиусов светлых колец

$$r_m = \sqrt{(2m-1)R \frac{\lambda}{2}}. \quad (20)$$

Формула (I8) позволяет рассчитать радиус кривизны поверхности линзы, если измерен радиус какого-нибудь темного кольца и известна длина волны света, которым освещается линза на пластинке.

Из (I8) и (I9) следует

$$\frac{r_n^2 - r_m^2}{R} = (n-m)\lambda, \quad (21)$$

откуда радиус кривизны линзы

$$R = \frac{(r_n - r_m)(r_n + r_m)}{(n-m)\lambda}. \quad (22)$$

Если в процессе выполнения лабораторной работы диаметры колец d измеряются в делениях шкалы окулярного микрометра, то

правую часть равенства (22) необходимо умножить на k^2

$$R = \frac{(d_n - d_m)(d_n + d_m)k^2}{4(n-m)\lambda}, \quad (23)$$

где k - цена деления шкалы микрометра. Для уменьшения погрешности результата не следует брать $n-m = 1, 2$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изучить инструкцию на рабочем месте.
2. Измерять диаметры колец Ньютона при освещении линзы монохроматическим светом.
3. Ознакомиться с интерференционной картиной при освещении линзы белым светом.
4. Вычислить радиус кривизны линзы.

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Запишите уравнение гармонических колебаний. Укажите физический смысл величин, входящих в уравнение.
2. Какие волны называются когерентными? монохроматическими?
3. Что называется геометрической и оптической длиной пути, геометрической и оптической разностями хода лучей? Как изменится фаза колебаний при отражении световой волны от среды, оптически более плотной? менее плотной?
4. Что называют интерференцией света? Запишите условия максимумов и минимумов при интерференции волн для разности фаз и оптической разности хода.
5. К какому типу интерференционных полос относятся кольца Ньютона? Как объяснить их форму?
6. Выведите формулу для радиуса колец Ньютона.
7. Какова толщина воздушного слоя, где наблюдается первое, второе, третье, любое черное кольцо?
8. Изменяются ли радиусы колец, если вместо воздуха будет среда с другим показателем преломления?
9. Как объяснить голубение черного пятна в центре картины при наблюдении в отраженном свете?

10. Почему при расчете колец Ньютона принимается во внимание интерференция эоля, отраженных лишь от поверхности воздушной прослойки, и не рассматриваются волны, отраженные от верхней поверхности линзы?

11. Какова причина постепенного исчезновения колец по мере удаления от центрального пятна?

12. Какой вид будет иметь интерференционная картина при освещении линзы белым светом?

Л и т е р а т у р а

1. Савельев И.В. Курс общей физики, т. Ш. - М.: Наука, 1978, § 119-122.
2. Дотлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики, т. Ш. - М.: Высшая школа, 1979, § 5.1-5.3.
3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики, т. Ш. - М.: Наука, 1970, § 10, 11.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976, § 25, 26.

Владимир Александрович САМОИЛЕНКО
Жанна Сергеевна ТИХОВКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе "Определение радиуса
кривизны линзы с помощью колец Ньютона"
по курсу "Физика"

Корректор Т.А.Палилова

Подписано в печать 24.01.85.

Формат 60x84¹/16. Бумага т. № 2. Офс.печ.

Л.д.веч.л. С.7. Уч.-изд.л. 0,55. Тир. 300. Зак. 34. Бесл. т.во.

Издательство и полиграфическое предприятие ВПИ. 220027. Минск, Ленинский пр., 65.