

506. ПОЛОСЫ РАВНОГО НАКЛОНА

Цель работы:

Изучить интерференционную картину «полосы равного наклона».

Решаемые задачи:

- собрать и отьюстировать оптическую установку для наблюдения интерференционных полос равного наклона;
- определить порядок интерференции в центральной точке;
- определить длину волны излучения лазерного источника.

Оптические элементы и аппаратура:

- лазер;
- короткофокусная линза;
- экран с отверстием;
- плоскопараллельная пластинка;
- линейка или измерительная рулетка.

Явление интерференции заключается в том, что при наложении световых пучков результирующая интенсивность не равна сумме интенсивностей отдельных пучков: в одних местах она больше, а в других - меньше. Возникает интерференционная картина - чередование светлых и темных полос. Необходимым условием возникновения интерференционной картины является когерентность волн, т.е. сохранение неизменной разности фаз за время, достаточное для наблюдения.

Методы создания когерентных волн можно разделить на два вида: метод деления волнового фронта и метод деления амплитуды. В данной работе рассматривается один из способов реализации метода деления амплитуды с помощью плоскопараллельной пластинки.

Свет от удаленного источника S падает на плоскопараллельную пластинку с показателем преломления n . Толщина пластиинки d .

При отражении света от пластины возникают две когерентные волны 1 и 2.

Оптическая разность хода между лучами равна (Рис. 1):

$$\Delta = 2 \cdot AB \cdot n - AD = \frac{2d}{\cos r} n - 2 \cdot d \cdot \operatorname{tg} r \cdot \sin i = 2 \cdot d \cdot n \cdot \cos r$$

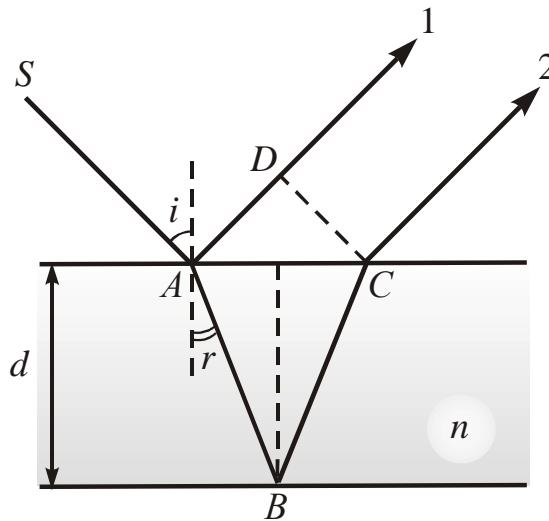


Рис. 1. К расчёту разности хода лучей 1 и 2

Учтём, что при отражении волны от оптически более плотной среды её фаза в соответствии с формулами Френеля скачком меняется на π . По этой причине между лучами 1 и 2 возникает дополнительная разность фаз. Её можно учесть, добавив к Δ половину длины волны в вакууме. В результате получим:

$$\Delta' = 2 \cdot d \cdot n \cdot \cos r + \frac{\lambda}{2} = 2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}.$$

Условие минимума интенсивности примет вид:

$$2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} = m\lambda.$$

Из этой формулы видно, что при данных λ , d и n каждому наклону i соответствует своя интерференционная полоса. Поэтому такие полосы интерференции называются полосами равного наклона. Они имеют вид концентрических колец.

Схема наблюдения полос равного наклона показана на Рис. 2.

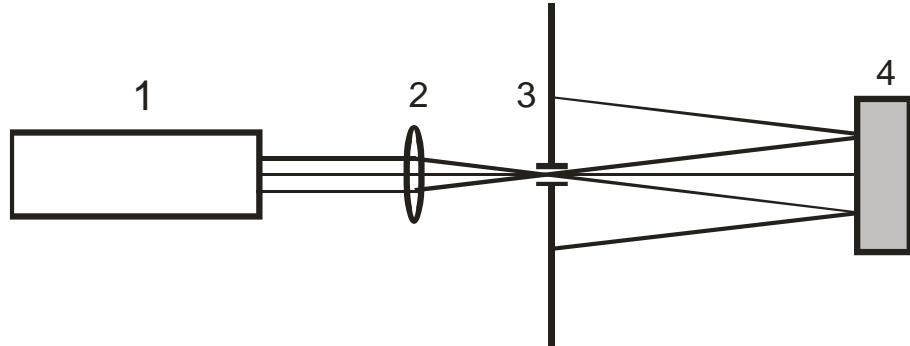


Рис. 2. Фото установки и схема наблюдения полос равного наклона.

1- лазер, 2 - короткофокусная линза, 3 - белый экран с отверстием, 4 - плоскопараллельная стеклянная пластина. Линза 2 и экран 3 собраны в один блок.

Лазер 1 и короткофокусная линза 2 формируют расходящийся пучок света, который, пройдя отверстие в экране 3, падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку 4. Волны, отраженные поверхностями пластинки, создают на экране интерференционные полосы равного наклона. Поскольку волна, созданная лазером, обладает большой длиной когерентности, то в данной оптической схеме возможно использование стеклянной пластины значительной толщины, создающей большую разность хода интерферирующих лучей и получение большого числа колец.

Связем радиус колец r_m с интерференционным порядком интерференции m .

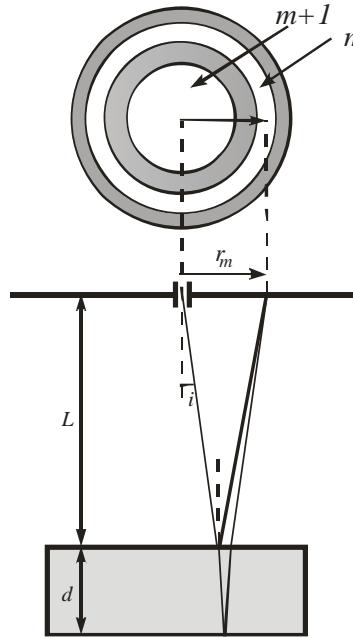


Рис. 3. К выводу рабочей формулы

Поскольку угол падения i света на пластинку мал, то можно записать $\sin i \approx \operatorname{tg} i = \frac{r_m}{2L}$, где r_m – радиус кольца соответствующего углу падения i (Рис. 3). Условие минимума интенсивности примет вид:

$$2d\sqrt{n^2 - \frac{r_m^2}{4L^2}} = m\lambda.$$

Если в этой формуле воспользоваться малостью второго слагаемого под корнем и разложить корень в ряд, получим окончательную рабочую формулу:

$$m\lambda = 2dn\left(1 - \frac{r_m^2}{8n^2L^2}\right). \quad (1)$$

Из этой формулы видно, что кольцо большего радиуса соответствует меньшему порядку интерференции m . Максимальный порядок интерференции m_{\max} (он располагается вблизи центра интерференционной картины при $r_m = 0$) равен:

$$m_{\max} \approx \frac{2dn}{\lambda}. \quad (2)$$

Поскольку точное значение наблюдаемых нами порядков интерференции m неизвестны, поступим так. Обозначим m_0 порядок интерференции ближайшего к центру картины кольца. Тогда номера следующих колец большего радиуса будут

соответствовать порядкам $(m_0 - 1)$, $(m_0 - 2)$, $(m_0 - 3)$, ... $(m_0 - k)$. Соответственно их радиусы обозначим r_1 , r_2 , r_3 ... r_k . Тогда уравнение (1) примет вид:

$$(m_0 - k)\lambda = 2dn \left(1 - \frac{r_k^2}{8n^2 L^2} \right).$$

Это уравнение можно переписать так:

$$k = m_0 - \frac{2dn}{\lambda} + \frac{d}{4nL^2\lambda} \cdot r_k^2 \quad (3)$$

Введём обозначения:

$$Y = k, \quad X = r_k^2, \quad a = m_0 - \frac{2dn}{\lambda}, \quad b = \frac{d}{4nL^2\lambda}.$$

Тогда уравнение (3) примет вид:

$$Y = a + bX, \quad (4)$$

где a и b - постоянные величины.

Графиком этой зависимости будет прямая линия с тангенсом угла наклона b .

Если толщина пластиинки и её показатель преломления известны, то, измерив L и b , можно определить длину волны света λ .

Порядок выполнения работы

При работе с лазером помните, что прямое или отражённое лазерное излучение ни в коем случае не должно попадать в глаза.

Упражнение 1. Сборка экспериментальной установки.

1. Соберите установку в соответствии с Рис. 2.
2. Отьюстируйте экспериментальную установку, выставив все элементы, схемы на одну оптическую ось. Расстояние от экрана до стеклянной пластиинки должно быть не менее 50 см.
3. Отраженный от пластиинки свет направьте на экран. На нём возникнет интерференционная картина в виде концентрических колец.

Упражнение 2. Измерение радиусов интерференционных колец и определение длины волны лазерного излучения.

1. Измерьте расстояние от пластиинки до экрана L . На экране нанесена линия с метками, расстояние между которыми 10 мм.
2. Сфотографируйте на телефон полученную интерференционную картину. Постарайтесь сделать fotosнимок, расположив камеру телефона максимально близко к оптической оси системы. На фотографии должны быть хорошо видны кольца и линия с метками, как показано на Рис. 4.

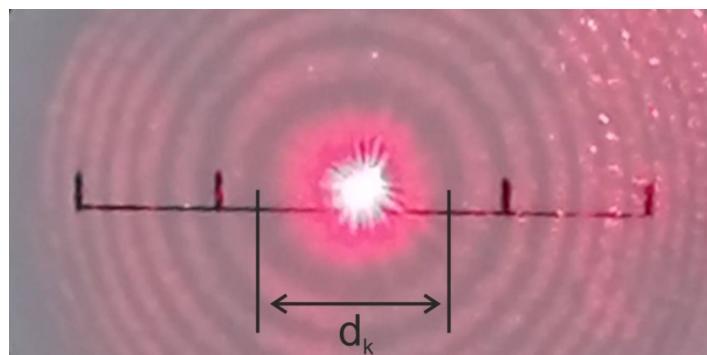


Рис. 4. Примерный вид интерференционной картины

3. По фотографии определите радиусы пяти - шести тёмных колец в мм (удобно определить сначала их диаметры d_k), используя масштабную линию с метками¹. Заполните таблицу:

номер кольца, k	r_k , мм	r_k^2 , мм
1		
2		
...		

4. Постройте график зависимости Y от X ($Y = k$, $X = r_k^2$). Экспериментальные точки должны хорошо аппроксимироваться линейной зависимостью. Программа, позволяющая аппроксимировать экспериментальные данные линейной функцией

¹ Можно загрузить фотографию в редактор Paint и измерять расстояния между точками в пикселях.

методом наименьших квадратов и оценивать доверительный интервал, приведена на сайте: https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F829841697/MNK_ABSD.xlsx



Определите по этому графику постоянную b в формуле (4).

5. Используя связь b и λ ($b = \frac{d}{4nL^2\lambda}$), определите длину волны лазерного излучения. Показатель преломления стеклянной пластиинки $n = 1.51$, её толщина d указана на оправе пластиинки. Запишите ответ в виде $\lambda = \lambda_{\text{ср}} \pm \Delta\lambda$.

Вопросы к обсуждению с преподавателем.

1. Интерференция монохроматического света. Расчет интерференционной картины при двухлучевой интерференции (оптический путь, оптическая разность хода, условия образования максимумов и минимумов, ширина интерференционной полосы).
2. Когерентные источники, способы их получения (метод деления амплитуды и метод деления волнового фронта).
3. Интерференция немонохроматического света. Временная когерентность. Длина когерентности.
4. Интерференция в тонких пленках. Полосы равной толщины и равного наклона. Что означает термин «тонкая пленка»?
5. Объяснить назначение всех оптических элементов, используемых в установке, описать порядок юстировки оптической схемы.
6. Вывести рабочие формулы.
7. В чём смысл аппроксимации экспериментальных точек методом наименьших квадратов?

Рекомендуемая литература.

1. Ландсберг Г.С. Оптика, Изд.6, М., Физматлит, 2006. §§25, 26.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3.М.,Физматлит,2005. §33.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Изд.10, М., Физматлит, 2008. §122.
4. Бутиков Е.И. Оптика. Изд.2, С-Пб., Невский диалект, 2003. §5.1, §5.

Составители:

А.И.Фишман, Д.С.Ирисов

март, 2023 г.