

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТЕКЛЯННОЙ ПЛАСТИНЕ

Ф.С.Насрединов, Т.А.Хрущева, К.Ф.Штельмах

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение интерференционных полос равного наклона

ЗАДАЧИ

1. Получить на экране картину интерференции при отражении света от плоскопараллельной стеклянной пластины
2. Экспериментально определить зависимость радиусов темных колец картины от порядка интерференции и расстояния до экрана наблюдения
3. Определить толщину плоскопараллельной пластины, ее показатель преломления или длину волны излучения (по указанию преподавателя)
4. Определить значение порядка интерференции в центре полученной картины и минимальную длину когерентности световой волны, необходимую для наблюдения интерференции в используемой оптической схеме

ВВЕДЕНИЕ

Содержанием работы является изучение связи характеристик получаемой *интерференционной картины* с параметрами схемы интерференции. Устойчивая картина интерференции обнаруживается при наложении друг на друга по крайней мере двух *когерентных монохроматических волн*, оптическая разность хода которых в точке наблюдения меньше *длины когерентности* световой волны. Известны различные оптические схемы, позволяющие получать эти волны путем деления светового пучка на пространственно разведенные части, рассматриваемые как отдельные световые пучки от дополнительных мнимых источников света. В этой работе изучается интерференционная картина, возникающая при освещении единым световым пучком толстой плоскопараллельной стеклянной пластины. В этом случае интерферирующие световые пучки формируются при отражении света от граней пластины.

Рассмотрим отражение и преломление световой волны, падающей на поверхность

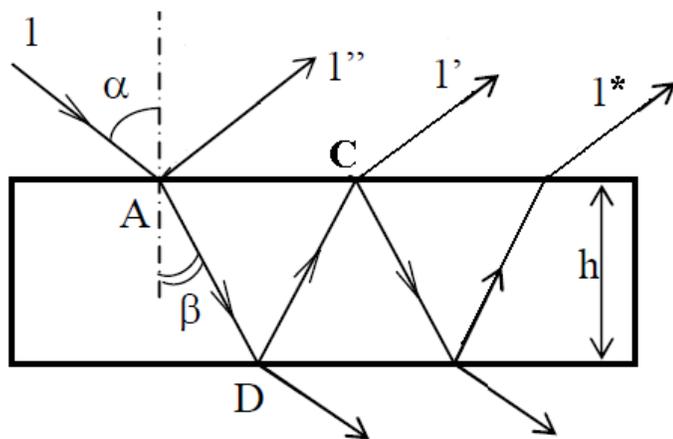


Рис. 1

пластины толщиной h (Рис. 1). Часть падающей волны отражается от передней грани пластины (луч $1''$ на рисунке). Другая часть волны проходит сквозь пластину (луч AD) и, выйдя из нее, продолжает распространение в прежнем направлении. Прошедшая внутрь пластины световая волна частично отражается от задней грани и падает изнутри на переднюю грань (луч DC), где она также разделяется на преломившуюся $1'$ и отразившуюся части. Поскольку

грани пластины параллельны, направления распространения волны $1'$ и волны $1''$ совпадают.

В работе используется вариант построения оптической схемы, где пластина освещается расходящимся световым пучком от точечного источника. Ось пучка перпендикулярна граням пластины. Экран для наблюдения интерференции отраженных пучков установлен параллельно пластине на большом расстоянии от нее ($L \gg h$) и имеет отверстие, в центре которого находится точечный источник S (рис.2).

В этом случае каждый луч, падающий на пластину, будет иметь свой наклон, а в каждую точку экрана будет попадать один луч, отраженный от передней грани пластины и один, отраженный от задней грани. Интенсивности света в обоих лучах примерно равны, т.к. коэффициенты отражения от обеих граней малы (около 4% для распространенных сортов стекла при малых углах падения) и равны. Световые волны, соответствующие этим лучам,

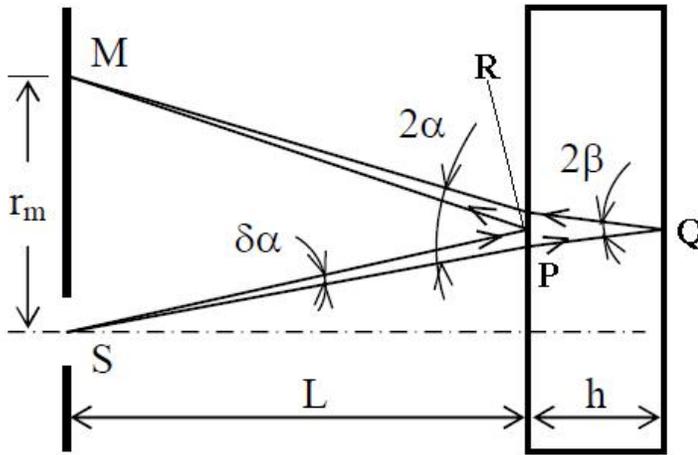


Рис.2

будут интерферировать. Свет, попавший в ту же точку в результате многократных отражений внутри пластины, не учитывается – например, интенсивность луча 1* (см. рис.1) приблизительно в 600 раз меньше.

Для описания интерференционной картины необходимо определить, какие лучи сходятся в каждой точке экрана и какова *оптическая разность хода* между ними. На рис. 2 показан ход двух интерферирующих лучей, приходящих в точку

наблюдения М. Для того, чтобы лучи сошлись в одной точке, должно выполняться условие:

$$h \operatorname{tg} \beta = L(\operatorname{tg}(\alpha + \delta\alpha) - \operatorname{tg} \alpha) \quad (1)$$

Простые тригонометрические преобразования с учетом закона преломления света приводят к следующему выражению для разности углов падения этих лучей:

$$\delta\alpha = (h/nL)(\sin\alpha \cos^2\alpha / \cos\beta) \quad (2)$$

где n – показатель преломления стекла. Из-за условия $L \gg h$ значение $\delta\alpha$ мало ($\ll 1$).

Оптическая разность хода между этими лучами:

$$\Delta = 2(nPQ + SP - SR) - \lambda/2 = 2(nh/\cos\beta + L/\cos\alpha - L/\cos(\alpha + \delta\alpha)) - \lambda/2 \quad (3)$$

Множитель n в первом слагаемом означает, что длина световой волны меньше, а скорость изменения ее фазы вдоль луча больше для стекла, чем для воздуха. Последнее слагаемое $\lambda/2$ учитывает изменение фазы волны при отражении от среды с более высоким показателем преломления (“потеря полуволны”).

Преобразования соотношения (3) и подстановка в него значения $\delta\alpha$ из (2) дают следующее выражение для оптической разности хода:

$$\Delta = 2h(n/\cos\beta - \operatorname{tg}\beta \sin\alpha) - \lambda/2 \quad (4)$$

Из полученного соотношения видно, во-первых, что разность хода зависит только от угла

α (угол преломления β связан с углом падения α законом Снеллиуса $\sin\alpha = n \sin\beta$). Следовательно, она будет одинаковой для всех точек экрана с одинаковым α , т.е. для окружностей с центром в точке S. Это означает, что интерференционная картина должна состоять из концентрических колец, примерный вид которых показан на рис.3.

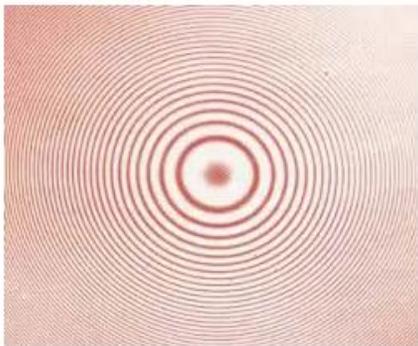


Рис.3

Во-вторых, из соотношения (2) видно, что $\delta\alpha \ll \alpha$, т.е. интерферирующие лучи имеют практически равные углы падения на пластину, равные наклоны. Поэтому наблюдаемые на интерференционной картине полосы называются *полосами равного наклона*.

Угол падения α , с его помощью угол преломления β , а

также оптическая разность хода Δ могут быть выражены через расстояние r от источника S до точки наблюдения: $\alpha = \arctg(r/2L)$. Полученное таким образом выражение для Δ довольно громоздко, но оно существенно упрощается для малых углов $\beta < \alpha \ll 1$. При использовании приближенных выражений для функций малых углов ($\alpha \approx r/2L$, $\cos \alpha \approx 1 - \alpha^2/2$, $\beta \approx \alpha/n$, $\cos \beta \approx 1 - \alpha^2/2n^2$) соотношение (4) сводится к:

$$\Delta = \Delta_0 - h(\alpha^2/n) - \lambda/2 = \Delta_0 - (h/n)(r^2/4L^2) - \lambda/2 \quad (5)$$

где $\Delta_0 = 2nh$.

Следует обратить внимание на то, что оптическая разность хода имеет максимум $\Delta_0 - \lambda/2$ при нормальном падении лучей ($\alpha = 0$, $r = 0$) и монотонно убывает с ростом r . При некоторых значениях r она равна полуцелому числу длин волн света - $\Delta = (m - 1/2)\lambda$. Здесь целое число m – *порядок интерференции*. Это соответствует *интерференционному минимуму интенсивности* световой волны (близкому к 0, т.к. интенсивности света в обоих лучах одинаковы) и радиусу середины темного кольца: $r_T = 2L((\Delta_0 - m\lambda)n/h)^{1/2}$. Если ввести обозначение $\Delta_0 = 2nh = m_0\lambda$, где m_0 – большое положительное и не обязательно целое число, то это выражение приобретает вид:

$$r_T = 2L((m_0 - m)\lambda n/h)^{1/2} \quad (6)$$

Целая часть $[m_0 - m]$ это номер темного кольца k_T , отсчитанный от центра интерференционной картины.

При тех значениях r , при которых $\Delta = m\lambda$, наблюдается *интерференционный максимум интенсивности* (середина светлого кольца). Радиус этого светлого кольца:

$$r_c = 2L((m_0 \pm \lambda/2 - m)\lambda n/h)^{1/2} \quad (7)$$

Здесь $k_c = [m_0 \pm \lambda/2 - m]$ – номер светлого кольца, отсчитанный от центра интерференционной картины. Знак «+» следует ставить, если ближайшим к краю отверстия в экране является темное кольцо, и «-», если светлое.

Зависимости (6) и (7) линейны по L , и из углового коэффициента этих зависимостей:

$$\gamma = 2(k\lambda n/h)^{1/2} \quad (8)$$

при фиксированном значении k (где $k - k_T$ или k_c) можно определить любую из величин λ , n или h , если известны две другие.

Эти зависимости пропорциональны корню квадратному из номера кольца. Линейными являются зависимости r_T^2 или r_c^2 от номера темного или светлого кольца, а из углового коэффициента этих зависимостей:

$$\gamma^* = 4L^2\lambda n/h \quad (9)$$

также можно определить одну из величин λ , n или h .

УСТАНОВКА

Схема установки и ход световых лучей в ней показаны на Рис. 4. В состав установки входят: полупроводниковый лазер с коллимирующей оптической системой 1, короткофокусная оптическая система 2 с экраном наблюдения 3, стеклянная плоскопараллельная пластина 4 и защитный экран 5. Эти узлы установки закреплены в

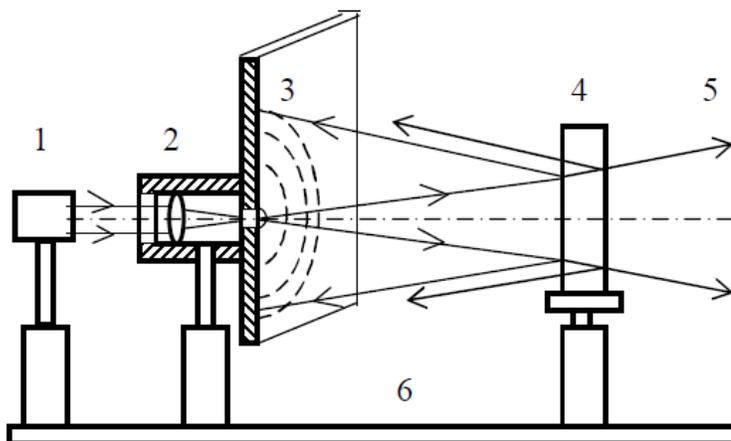


Рис.4

магнитных рейтерах, установленных на металлическое основание 6. Коллимирующая система обеспечивает получение параллельного пучка лучей от источника света. Этот пучок падает на сферическую линзу 2, на оправе которой закреплен экран наблюдения таким образом, что фокальная плоскость линзы совмещена с плоскостью

этого экрана. Экран наблюдения имеет отверстие для прохождения светового пучка. Сфокусированный линзой световой пучок можно рассматривать как точечный источник световой волны со сферическим волновым фронтом. Этот пучок падает на плоскопараллельную пластину, установленную перпендикулярно оси пучка. Основная часть пучка проходит через пластину и задерживается защитным экраном. Световые пучки, отраженные в обратном направлении от передней и задней граней пластины, попадают на экран наблюдения, образуя на нем интерференционную картину концентрических темных и светлых колец. Следует отметить, что симметрия интерференционной картины определяется симметрией хода лучей в установке. В данном случае это осевая симметрия пучка лазера и сферической линзы. При использовании, например, цилиндрической линзы пучок лазера был бы развернут в линию, а интерференционная картина имела бы вид светлых и темных пятен, которые можно рассматривать как «вырезанную» вдоль диаметра часть концентрических колец. На поверхность экрана нанесена миллиметровая шкала для измерения размеров интерференционной картины. Расстояния между кольцами интерференционной картины составляют несколько миллиметров, поэтому для ее наблюдения и замеров используется лупа.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Убедитесь в том, что выходное окно лазера 1 направлено в сторону защитного экрана 5.
2. С разрешения преподавателя или лаборанта включите источник излучения.

ВНИМАНИЕ! При работе с лазером не допускать попадания в глаза как прямого пучка света от источника излучения, так и световых бликов, отраженных от различных предметов. Нельзя вносить в пучок предметы, имеющие отражающие поверхности.

3. Убедитесь в том, что луч лазера параллелен плоскости основания. Для этого разверните экран 3 отверстием в сторону лазера, установите его высоту в рейтере таким образом, чтобы луч лазера попал на экран рядом с отверстием напротив его центра. Меняя расстояния от экрана до лазера, следите за тем, чтобы пятно от лазерного луча не смещалось по вертикали относительно отверстия в экране. При необходимости с помощью преподавателя отрегулируйте направление луча.

4. Разверните экран 3 таким образом, чтобы луч лазера попал на центр фокусирующей линзы 2, а световой пучок после фокусирующей системы проходил через отверстие в экране наблюдения. Это достигается поворотом рейтера с экраном вокруг вертикальной оси, а при необходимости и небольшим изменением высоты экрана. Признаком правильной установки фокусирующей системы служит попадание луча, отраженного от передней поверхности линзы обратно в выходное окно лазера.

5. Установите вблизи защитного экрана 5 (на расстоянии около 40 см от экрана 3) плоскопараллельную пластину 4, ориентируя ее грани перпендикулярно оси светового пучка. Высоту пластины в рейтере подберите так, чтобы весь освещалась вся поверхность пластины или ее большая часть. Перемещением и поворотом рейтера с пластиной добиться того, чтобы отверстие в экране 3 оказалось приблизительно в центре пятна, созданного отраженным от нее в обратном направлении световым пучком. В этом случае на экране наблюдения должна появиться система интерференционных колец с центром в отверстии экрана.

ВНИМАНИЕ! В работе используется плоскопараллельная пластинка, имеющая высокое качество обработки рабочих граней. Во избежание загрязнения их поверхностей и появления царапин, не следует касаться рабочих граней пластины руками или посторонними предметами.

6. Измерьте с помощью линейки расстояние от экрана 3 до передней грани пластины 4.

Таблица 3. Угловые коэффициенты зависимостей квадратов радиусов интерференционных колец от номера кольца

		L ₁ , см	L ₂ , см	L ₃ , см	L ₄ , см	L ₅ , см	L ₆ , см
γ^* , мм ²	темные						
	светлые						
$\gamma^*h/4L^2$, 10 ⁻⁷ м	темные						
	светлые						

13. Для всех полученных значений γ^* вычислите величину $\gamma^*h/4L^2$, которая согласно (9) также равна λn . Результаты занести в таблицу 3.

14. Вычислите среднее значение $a = \lambda n$ по всем данным из таблиц 2 и 3, а также ее погрешность как погрешность случайной величины. По указанию преподавателя вычислите либо длину волны лазера λ по заданному им значению показателя преломления n , либо показатель преломления n по заданному значению λ , а также их погрешности. Сравните полученные результаты с типичными значениями длины волны красного полупроводникового лазера или показателя преломления стекол.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему интерференционная картина имеет вид концентрических колец?
2. Зачем в выражение для оптической разности хода интерферирующих волн вводят слагаемое, равное по модулю половине длины волны света ?
3. На какую величину изменяется оптическая разность хода при переходе от одной интерференционной полосы к соседней полосе ?
4. Почему в качестве источника света в работе используется лазер?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. кн.4. Волны. Оптика., М., изд-во “Астрель”, 2002
2. Калитеевский Н.И., Волновая оптика. М., Высшая школа, 1978
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики в 5 т., т.4. Оптика. М.,Физматлит., 2002