

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 33.03

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗАЛОМЛЕННЯ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНОЇ СКЛЯНОЇ ПЛАСТИНКИ

Завдання 1. Дослідити проходження лазерного променя через плоскопаралельну пластинку.

Мета роботи. У роботі вивчається проходження світла через плоскопаралельну пластину і визначається величина коефіцієнта заломлення скла.

Обладнання: оптична лава, набір рейтерів, напівпровідниковий лазер, касета для скляних пластин, скляні пластини, екран, лінійка, аркуш паперу, олівець, магнітні шайби.

Методика виконання. При визначенні коефіцієнта заломлення скла і для побудови схеми досліду використовується особливість проходження променя світла через плоскопаралельну пластину (рис. 1).

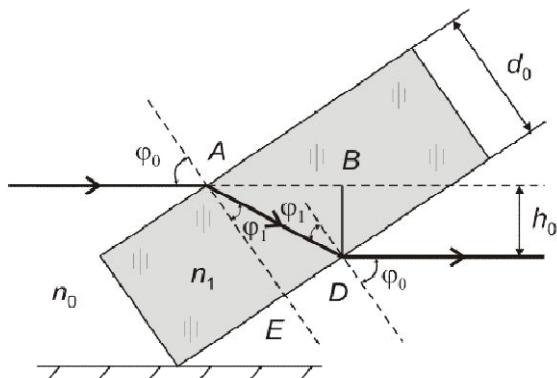


Рис. 1. Схема проходження лазерного променя через плоскопаралельну пластину

Промінь лазера падає під кутом φ_0 на плоскопаралельну пластину зі скла. Коефіцієнт заломлення повітря n_0 , коефіцієнт заломлення пластинки - n_1 . В пластинці промінь лазера відхиляється і поширюється під кутом φ_1 . Кут заломлення променя φ_1 залежить від коефіцієнта заломлення - n_1 .

Відповідно до закону заломлення Снелліуса заломлений промінь лежить в площині падіння, причому відношення синуса кута падіння φ_0 до синуса кута заломлення

φ_1 для розглянутих середовищ залежить тільки від довжини світлової хвилі, але не залежить від кута падіння, тобто

$$\frac{\sin \varphi_0}{\sin \varphi_1} = n_{10} \quad (1)$$

Стала величина n_{10} називається *відносним показником* або *коефіцієнтом заломлення* другого середовища відносно першого. Показник заломлення середовища щодо вакууму називають *абсолютним показником* (коефіцієнтом) заломлення цього середовища. Його будемо позначати через n з відповідним індексом. Відносний показник заломлення n_{10} виражається через абсолютні показники n_0 і n_1 співвідношенням:

$$n_{10} = \frac{n_1}{n_0} \quad (2)$$

З урахуванням (2) закон заломлення можна записати в симетричній формі:

$$n_0 \sin \varphi_0 = n_1 \sin \varphi_1 \quad (3)$$

Чим більший коефіцієнт заломлення, тим менший кут заломлення.

На виході з плоско-паралельної пластини промінь лазера знову йде паралельно до початкового напрямку, але зі зсувом на величину h_0 (див. рис. 1). З рисунку видно, що чим більша товщина пластини d_0 , тим більший паралельний зсув лазерного променя h_0 . Величина зміщення залежить від кута заломлення і товщини пластини.

Знаючи величину паралельного зсуву променя, можна знайти коефіцієнт заломлення n_1 для пластини. Для цього повернемося до рис. 1.

Розглянемо трикутники ACE , ADE і ABD . Паралельне зміщення променя BD на величину h_0 можна знайти як:

$$BD = h_0 = d_0 [\operatorname{tg} \varphi_0 - \operatorname{tg} \varphi_1] \sin(90^\circ - \varphi_0) \quad (4)$$

Враховуючи співвідношення (3), можна записати для коефіцієнта заломлення n_1 пластини:

$$n_1 = \frac{n_0 \sin \varphi_0}{\sin \varphi_1} = \frac{n_0 \sin \varphi_0}{\sin \left[\arctg \left(\operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{h_0}{d_0 \sin(90^\circ - \varphi_0)} \right) \right]} \quad (5)$$

Знаючи взаємозв'язок кута падіння φ_0 , кута заломлення φ_1 , величину кута заломлення φ_0 , коефіцієнта заломлення повітря n_0 і товщини пластини d_0 , можна знайти коефіцієнт заломлення n_1 для пластини.

Для спостереження паралельного зміщення променя лазера на плоскопаралельній пластинці використовується установка, схема якої подана на рис. 2.

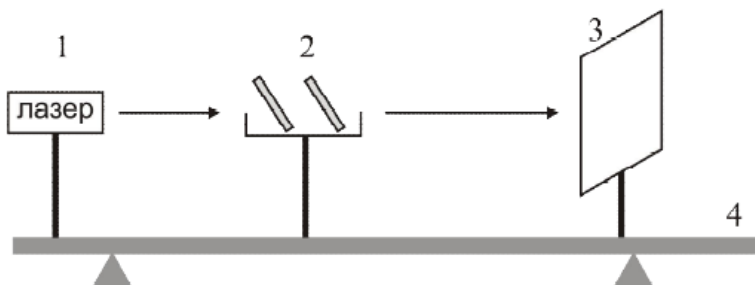


Рис. 2. 1 - Лазер; 2 - Пластини, 3 - Екран, 4 – Оптична лави

Схема збирається на оптичній лаві. Лазер 1 закріплюється гвинтом. Далі розміщується касета з пластинами 2. На екран 3 закріплюють чистий аркуш паперу з допомогою магнітних шайб. Вмикається лазер і робиться відмітка олівцем положення променя лазера на екрані. Кожен раз, коли встановлюється пластини, положення променя зміщується. Нове положення променя відзначають на екрані олівцем. Після проведення досліду папір знімають і лінійкою вимірюють відстані між відмітками і визначають зміщення променя. Кут, під яким стоять пластини, визначають за допомогою транспортира. Товщину пластини вимірюють лінійкою (або штангенциркулем). Величина коефіцієнта заломлення повітря n_0 знаходиться за довідковою літературою.

Вимірювання проводять кілька разів, визначаються середні значення і помилки. За розрахунковою формулою

визначають коефіцієнт заломлення n_1 пластини із кварцового скла. Ці значення порівнюють з табличними даними.

Після проведення досліду касету розвертають на 180° і проводять експеримент з оберненим ходом променів. Результати порівнюються.

Изучение интерференции лазерного света в толстой стеклянной пластинке. Полосы равного наклона. Определение толщины плоскопараллельной стеклянной пластины по интерференционным кольцам. Определение длины волны лазерного света.

«Интерференция. Бипризма Френеля». Мы продолжим изучение интерференционных явлений на примере интерференции света в толстой стеклянной пластинке при освещении ее расходящейся сферической монохроматической волной. В плоскости наблюдения происходит наложение волн отразившихся от передней и от задней поверхности пластинки. При наложении сферических волн в плоскости наблюдения возникает интерференционная картина в виде системы интерференционных колец – полос равного наклона (в отличие от колец Ньютона – колец равной толщины) [1, 2, 3]. Возможность возникновения интерференционной картины связано с большой когерентностью лазерного излучения. Интерференционная картина возникает, когда длина когерентности света больше разности хода интерферирующих волн [2, 4].

Если плоскопараллельная стеклянная пластинка освещена точечным источником S квазимонохроматического света, то в любую точку наблюдения P , находящуюся с той же стороны, что и источник S , приходят две волны: одна – отразившаяся от передней поверхности пластины, и другая, отразившаяся от задней ее поверхности. Интерферируя, эти волны образуют не локализованную интерференционную картину. Из соображений симметрии понятно, что в плоскостях, параллельных пластине, интерференционные полосы имеют вид колец. Различимость этих полос уменьшается при увеличении размеров источника в направлении перпендикулярном к плоскости пластины.

В случае точечного монохроматического источника света [2] каждая точка пространства характеризуется вполне определенной разностью хода приходящих в нее отраженных волн. Поэтому для монохроматического когерентного источника света устойчивая интерференция должна наблюдаться в каждой точке пространства. Про соответствующие полосы интерференции говорят, что они не локализованы (или локализованы всюду).

Мы ограничились интерференцией только двух волн, пренебрегая при этом многократными отражениями. Это приближение справедливо, когда коэффициент отражения невелик [2]. Например, для стекла ($n = 1.51$) интенсивности волн, возникающих при однократном отражении от одной и другой плоскости почти одинаковы, а последующие перестраивания уменьшают интенсивность в сто и более раз. Поэтому последующие отражения можно не принимать во внимание. Приведенные далее соотношения описывают интерференцию в толстой стеклянной пластинке как двухлучевую интерференцию.

В эксперименте изучается интерференция лазерного света. Как ясно из схемы опыта (рис. 1), луч с помощью линзы L собирается в фокусную точку S . Это точечный источник монохроматического излучения. Свет от точки S пройдя через небольшое отверстие в экране, распространяется в виде сферической волны и падает на пластину P . Стеклянная пластинка P расположена перпендикулярно к

лучу лазера. Экран наблюдения Э находится в фокальной плоскости линзы Л, на расстоянии L от пластины. Плоскость экрана параллельна плоскости пластины П.

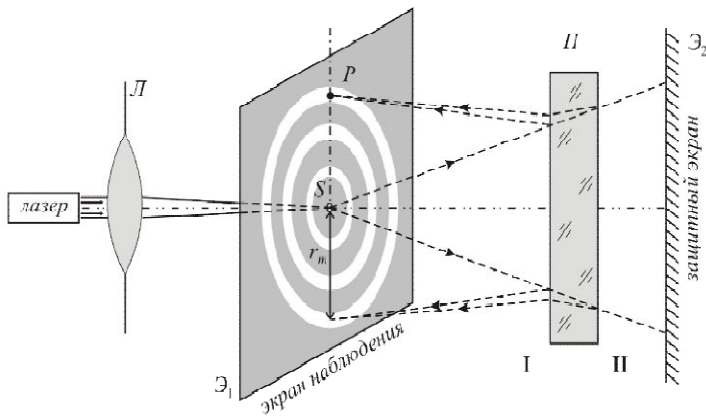


Рис. 1. Схема опыта.

Итак, на экран падают две сферические волны, возникающие при отражении от передней и задней поверхности пластины. Разница между радиусами ΔR этих двух сферических волн в точке наблюдения P определяется толщиной пластины h и коэффициентом преломления материала n . Интерференционная картина имеет вид концентрических темных и светлых колец (см. рис. 2).

Для описания картины интерференции определим радиусы колец в картине. Ход лучей при отражении от толстой стеклянной пластины показан на рис. 3.

Разность хода волн 1 и 2 (см. рис. 3) приходящих к m -му кольцу (в точку r_m на рисунке) равна (см. [2]):

$$\Delta = 2hm \cos \beta. \quad (10.1)$$

Можно полагать, что эти волны излучаются минимальными точками S' и S'' – изображениями источника S в передней и задней поверхностях пластины.

При условии $\Delta = m\lambda$ кольцо порядка m оказывается темным, так как к геометрической разности хода Δ необходимо добавить еще $\lambda/2$ и учесть, таким образом, изменение фазы волны 1 на π при отражении от передней поверхности пластины.

Полагаем, что L велико: $L \gg h$, угол падения α – мал, $\delta\alpha \ll \alpha$.



Рис. 2. Интерференционная картина наблюдаемая, при интерференции от толстой пластины.

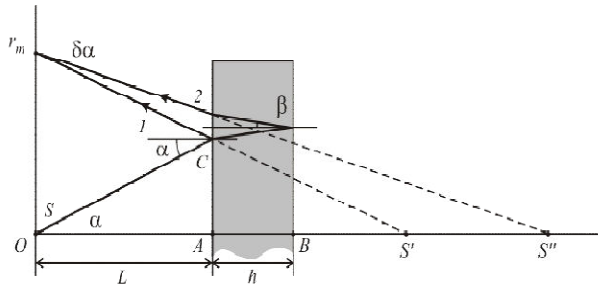


Рис. 3. Геометрия опыта.

Будем полагать для простоты, что центральной точке O также соответствует условие минимума, т.е. разность хода $\Delta_0 = 2hm - m_0\lambda$ (т.е. точке O на экране наблюдения соответствует порядок интерференции m_0). Тогда m -му темному кольцу радиуса r_m отвечает порядок интерференции $m_0 - m$ и разность хода $\Delta = (m_0 - m)\lambda$. Как видно из рис.3

$$r_m = 2L \operatorname{tg} \alpha \approx 2L\alpha \approx 2Ln\beta \quad (10.2)$$

(β – угол преломления в пластинке, связанный с углом падения α законом преломления $n = \sin \alpha / \sin \beta \approx \alpha / \beta$).

Мы получаем $\Delta_0 = \Delta - 2hm(1 - \cos \beta) = m\lambda$ или $hm\beta^2 = m\lambda$, здесь использовано соотношение $1 - \cos \beta = \frac{1}{2}\beta^2$. Используя (10.2), находим $\beta^2 = r_m^2 / 4L^2 n^2$. Окончательно, для радиуса m -го темного кольца имеем

$$r_m = 2L \sqrt{\frac{nm\lambda}{h}}. \quad (10.3)$$

Цель работы.

В работе изучается интерференция красного лазерного света полупроводникового или гелий-неонового лазера. Интерференционная картина получается при помощи толстой плоскопараллельной стеклянной пластины. Картина представляет собой систему концентрических колец. Это полосы равного наклона. Плоскопараллельность пластины при изготовлении достигается с точностью до нескольких угловых секунд. Для различных значений расстояния L от пластины до плоскости наблюдения, определяется положение темных колец в интерференционной картине, т.е. величина r_m при m от 1 до 25. По полученным результатам проверяется зависимость (10.3) $r_m = r_m(m, L)$. Далее определяется величина толщины стеклянной пластины, если известна длина излучения лазера, либо определяется длина излучения лазера при заданной толщине пластины.

Принадлежности.

Полупроводниковый лазер, излучающий в видимом диапазоне длин волн, $\lambda = 650 \text{ нм}$ (красный) и мощностью излучения 1 мВт, 5 мВт или газовый гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 630 \text{ нм}$; направляющая: набор рейтеров; короткофокусная линза с вмонтированным в оправу экраном с отверстием для выхода луча лазера; плоскопараллельная стеклянная пластина на подставке толщиной $h = 19,5 \text{ мм}$ и коэффициентом преломления $n = 1,51$; магниты для крепления бумаги на экране наблюдения; немагнитный экран защиты; карандаш; линейка.

Методика проведения.

Схема проведения дана на рис. 1. Излучение лазера собирается в точку S с помощью линзы L и далее расходящимся пучком пройдя через отверстие в экране наблюдения $\mathcal{E}_1$ падает на плоскопараллельную пластину Π . Лазерный свет отраженный от передней и задней поверхности пластины Π возвращается и попадает на экран наблюдения $\mathcal{E}_1$. На экране $\mathcal{E}_1$ возникает интерференционная картина в виде концентрических чередующихся темных и светлых колец. Пройшедшее пластину лазерное излучение попадает на защитный экран $\mathcal{E}_2$.

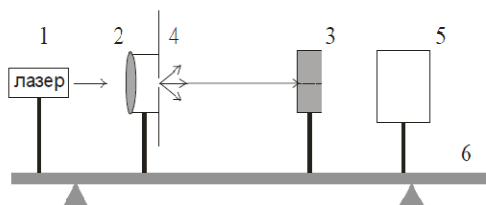


Рис. 4. Схема опыта. 1 – Лазер. 2 – короткофокусная линза. 3 – стеклянная пластина.

4 – экран наблюдения. 5 – защитный экран. 6 – направляющая скамья.

При выполнении эксперимента на экран наблюдения закрепляется белая бумага. Для фиксированного значения L по любому из радиусов в интерференционной картине карандашом делается отметка положения всех видимых интерференционных минимумов. Таких зарисовок делается несколько. Далее рисунок снимается и с помощью линейки определяется среднее значение для каждого r_m . По результатам строится график зависимости $r_m = r_m(\sqrt{m})$. Чистый лист бумаги вновь закрепляется на экране Э₁. Далее делается зарисовка положения минимумов или одного из них для различных значений L . Рисунок вновь снимается и после измерений строится график зависимости $r_m = r_m(L)$. Проверяется соотношение (10.3). По тангенсу наклона в графиках зависимостей $r_m = r_m(\sqrt{m})$ и $r_m = r_m(L)$ определяется значение толщины стеклянной пластины h . После определения h на построенных графиках наносятся расчетные значения по (10.3). Длина волны считается заданной. Если задать значение толщины пластины, то используя полученные результаты можно определить длину волны.

Опыты по интерференции лазерного света в толстой стеклянной пластинке выполняются на установке, схема которой дана на рис. 4. Схема опыта собирается на небольшой направляющей (см. рис. 5).

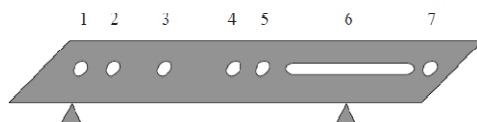


Рис. 5. Направляющая оптическая скамья.

Задание

1. Соберите схему согласно рис. 4. Для этого лазер в оправе и на рейтере ставится в положение 1 рис. 5. Защитный экран 5 помещается на рейтере в положение 7 направляющей. Далее короткофокусная линза 2 с экраном наблюдения 4 ставится в положение 2 направляющей. В листе чистой бумаги размером с экран наблюдения по центру листа вырезают небольшое отверстие диаметром 4-5 мм. Далее этот лист с помощью магнитных шайб располагают на экране наблюдения. Стеклянная пластина 3 в оправе на рейтере помещается в крайнее (дальнее от лазера) положение паза 6 направляющей. Все составляющие установки на схеме закрепляются фиксирующими гайками. При настройке и выполнении работы для перемещения рейтеров гайки ослабляются. **Внимание!** Необходимо крайне осторожно работать со стеклянной пластиной. Поверхности ее имеют глубокую шлифовку и полировку отражающих поверхностей, а также высокую степень параллельности отражающих поверхностей. Стеклянная пластина 3

располагается так, чтобы ее отражающие поверхности были в плоскости перпендикулярной к направляющей.

- После того, как схема собрана, пригласите преподавателя, покажите собранную схему преподавателю и в его присутствии включите лазер. **Внимание!** Лазерное излучение опасно при попадании в глаза, длин волн $\lambda = 650 \text{ нм}$, (красный) и мощностью излучения 1 или 5 мВт.
- После включения лазера отъюстируйте установку. Все элементы схемы выставите соосно. Линзу 2 установите так, чтобы луч лазера проходил через отверстие в экране наблюдения и попадал в то же место, что и луч лазера без линзы. Необходимо, чтобы отраженный от линзы луч лазера не попадал назад в излучатель. При попадании отраженного луча лазера на излучатель резко падает мощность лазера. Линзу 2 по высоте установите так, чтобы расширенный лазерный пучок симметрично охватывал всю стеклянную пластину 3. Пластина 3 установите так, чтобы в отраженном свете в центре экрана 4 возникла система интерферирующих колец. Центр картины (темное пятно) должен совпадать или быть близок к отверстию в экране наблюдения 4.
- В наблюдаемой картине по интерференции по любому из радиусов картины нанесите карандашом отметки положения интерференционных минимумов. Такие зарисовки сделайте 3 – 5 раз. Снимите бумагу с зарисовками с экрана и для каждой из зарисовок измерьте линейкой и запишите полученные значения m и r_m . Результаты занесите в таблицу. Усредните значения для величины r_m по каждому m . Определите ошибки.
- Измерьте линейкой расстояние L . Для данного L постройте график зависимости r_m от $\sqrt{m}$ при $L = \text{const}$.
- Нанесите на график расчетное соотношение (10.3). Сравните экспериментальную и расчетную зависимость. Оцените точность совпадения результатов.
- Закрепите лист бумаги чистой стороной на экране. Установите пластину на рейтере в крайнее положение паза 6. Сделайте отметку карандашом для любого выбранного Вами минимума m интерференционной картины. Измените расстояние L . Для этого сдвиньте пластину и уменьшите на 8–10 см расстояние L , передвинув рейтер по пазу к лазеру. Вновь сделайте отметку карандашом выбранного Вами m -го минимума интерференционной картины. Снова приблизьте пластину на 8–10 см и т. д. Снимите серию измерений r_m от L передвигая рейтер по пазу 6. Результаты занесите в таблицу.
- Проведите 3 – 4 серии измерений $r_m = r_m(L)$ при $m = \text{const}$ для различных m . Результаты занесите в таблицу. Найдите средние значения и оцените ошибки.
- По результатам измерений постройте график зависимости $r_m(L \cdot \sqrt{m})$. Нанесите на график расчетную зависимость по формуле (10.3). Сравните экспериментальные результаты с расчетными. Оцените точность совпадения результатов.

10. Зная величину длины волны излучения лазера λ и используя полученные графические результаты, по величине угла в графических построениях определите толщину стеклянной пластины h . Определите ошибку эксперимента и сравните с той толщиной, которая указана в данных опытах.
11. Зная величину толщины пластины, указанную в опыте, используя полученные графические результаты, определите длину волны излучения лазера λ , ошибку эксперимента и сравните результаты с данными приведенными в работе.
12. В работе необходимо выполнение либо п. 10, либо п. 11 по решению преподавателя.

Література:

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.IV. Оптика. – М.: Наука, 1980. гл.1. § 2
2. Бутиков Е.И. Оптика – М.: Высшая школа, 1986.