

Лабораторная работа №10

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА В ТОЛСТОЙ СТЕКЛЯННОЙ ПЛАСТИНЕ. ПОЛОСЫ РАВНОГО НАКЛОНА.

Цель работы: получить интерференционную картину при отражении лазерного света от толстой плоскопараллельной стеклянной пластины. Проверить теоретическую зависимость радиусов интерференционных колец от номера кольца и расстояния между пластиной и экраном. Определить толщину стеклянной пластины и порядок интерференции в центральной точке.

Полосы равного наклона

Падающий на прозрачную пластину или пленку свет отражается от передней и задней поверхности. Наложение отраженных волн, в случае, если они когерентны, порождает интерференционную картину.

Когерентными называются волны, разность фаз которых не изменяется со временем. Только монохроматические волны могут быть когерентными. Монохроматическое излучение от таких источников света как лампа накаливания или Солнце получают с помощью светофильтра. Однако длина когерентности (расстояние, при прохождении которого две волны утрачивают когерентность) таких волн невелика. Наблюдение интерференции от таких источников возможно лишь на тонких пластинах или пленках.

При освещении плоскопараллельной пластины монохроматическим светом результат интерференции отраженных волн в различных точках плоскости наблюдения зависит только от угла падения света на пластину. Интерференционная картина имеет вид чередующихся темных и светлых полос. Каждая полоса сформирована пучком равно наклоненных к пластине лучей. Поэтому интерференционная картина носит название *полос равного наклона*.

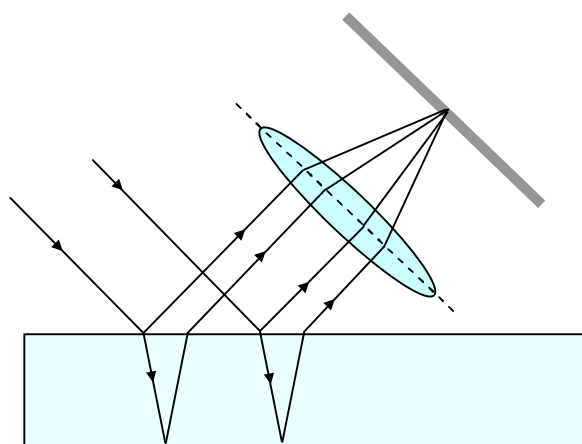


Рисунок 1

Пусть на пластину падает плоская световая волна (рисунок 1). Лучи света, отраженные от верхней и нижней граней пластины, параллельны. Оптическая разность хода этих лучей определяется углом падения. Для наблюдения интерференции на экране используется собирающая линза. Говорят, что полосы равного наклона локализованы в бесконечности.

Многokратные отражения в стеклянной пластине можно не

учитывать, поскольку даже при двукратном отражении света от задней плоскости стеклянной пластины его интенсивность падает в сто раз. Такая интерференция называется двухлучевой.

Использование точечного источника света незначительно изменит картину. Точечный источник монохроматического света излучает сферические волны. Падая на плоскопараллельную стеклянную пластину, такая волна образует две отраженные волны, распространяющиеся в сторону источника. Эти лучи не параллельны, а следовательно, пересекаются. Устойчивая интерференция наблюдается в каждой точке пространства. Интерференция локализована всюду и ее наблюдение возможно без собирающей линзы.

Если плоскость наблюдения параллельна пластине, то интерференционная картина имеет вид системы концентрических темных и светлых колец, что следует из соображений симметрии.

Рассмотрим ход лучей (рисунок 2). Точечный источник монохроматического света S находится на расстоянии L от стеклянной плоскопараллельной пластины толщиной H . Там же находится экран, плоскость которого параллельна плоскости пластины.

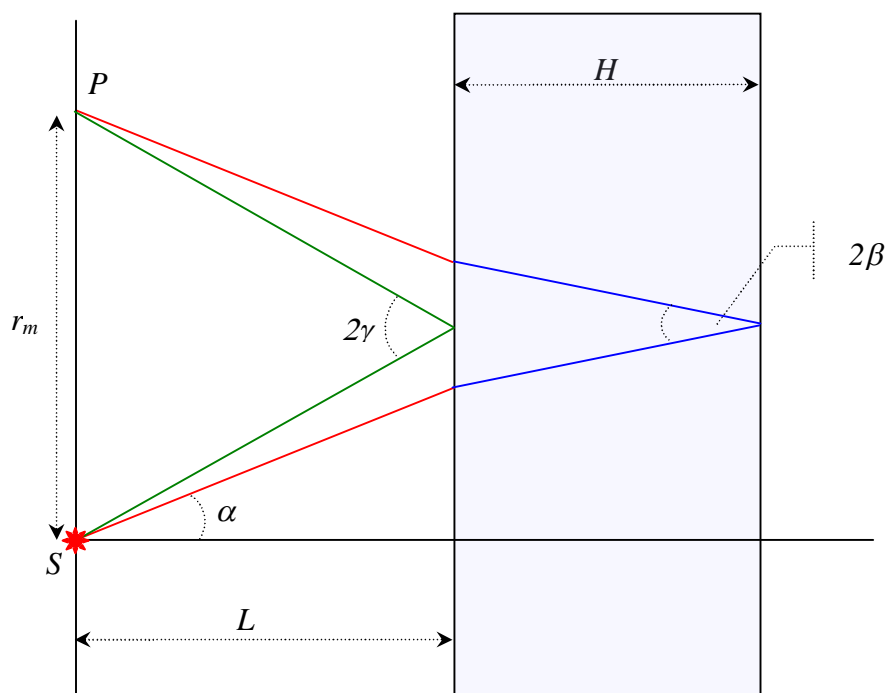


Рисунок 2

Один луч, падая на пластину под углом α , преломляется. Отразившись от задней плоскости пластины и вновь преломившись на передней, он попадает в точку P , расположенную на экране. Другой луч падает на пластину под углом γ и, отражаясь от нее, так же достигает точки P .

Простые геометрические построения позволяют записать оптическую длину пути этих лучей

$$L_1 = 2 \left(\frac{L}{\cos \alpha} + \frac{Hn}{\cos \beta} \right), \quad L_2 = \frac{2L}{\cos \gamma} + \frac{\lambda}{2}.$$

Слагаемое $\lambda/2$ возникает вследствие изменения фазы волны при отражении от оптически более плотной среды. Тогда оптическая разность хода волн имеет вид

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2L \left(\frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \gamma} \right) + \frac{2Hn}{\cos \beta} - \frac{\lambda}{2}.$$

Поскольку $r_m \ll L$, то углы падения, преломления и отражения малы, а для малых углов $\alpha \ll 1$ справедливо

$$\frac{1}{\cos \alpha} \approx \frac{1}{1 - \alpha^2/2} \approx 1 + \alpha^2/2.$$

Тогда, для оптической разности хода волн получаем

$$\Delta = 2Hn + Hn\beta^2 - L(\gamma^2 - \alpha^2) - \lambda/2.$$

Запишем расстояние от источника до точки P

$$r_m = 2L \operatorname{tg} \alpha + 2H \operatorname{tg} \beta.$$

Воспользовавшись законом Снеллиуса $\sin \alpha = n \sin \beta$ и малостью углов $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$, получаем, что $r_m \approx 2\beta(Ln + H)$.

С другой стороны, $r_m = 2L \operatorname{tg} \gamma$, но тогда $L\gamma = L\alpha + H\beta$. Возводя последнее выражение в квадрат, получаем

$$L^2(\gamma^2 - \alpha^2) = 2LH\alpha\beta + H^2\beta^2 \approx \beta^2 H(2Ln + H).$$

Подставляя в выражение для оптической разности хода, получаем

$$\Delta = 2Hn - \beta^2(Ln + H)H/L - \lambda/2 = 2Hn - r_m^2 H / (4L(Ln + H)) - \lambda/2.$$

Для интерференционного минимума (темного кольца радиуса r_m), оптическая разность хода волн составит $\Delta = m\lambda + \lambda/2$, где m – порядок интерференционного максимума.

Тогда, радиус темного кольца уменьшается с ростом интерференционного порядка

$$r_m^2 = 4L(Ln + H)(2Hn - m\lambda) / H.$$

Для заданных значений длины волны излучения, толщины пластины и показателя преломления существует максимальное значение интерференционного порядка, обозначим его как p , при котором $r_p \geq 0$. Если в центре экрана находится интерференционный минимум (темное пятно), то $2Hn = p\lambda$. Если на удвоенной оптической толщине пластины не укладывается целое число длин

волн, то в центре наблюдается светлое пятно, а минимум имеет вид кольца самого малого радиуса. Оптическая разность хода до следующего темного кольца будет меньше на длину волны (с увеличением угла оптическая разность хода уменьшается).

Пронумеруем темные кольца в порядке возрастания их радиусов. Если $k \geq 0$ – номер темного кольца, то его интерференционный порядок $m = p - k$.

Учитывая, что $H \ll L$, получаем линейную зависимость квадрата радиуса темного кольца от его номера

$$r_k^2 = r_0^2 + 4k\lambda nL^2/H, \quad r_0^2 = 4L^2n(2Hn - p\lambda)/H, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Если $\beta = \Delta r_k^2 / \Delta k$ - угловой коэффициент этой прямой, то $\beta = 4\lambda nL^2/H$.

Заметим, что разность квадратов радиусов соседних колец не зависит от их порядковых номеров

$$f_k = r_{k+1}^2 - r_k^2 = 4n\lambda L^2/H$$

Интерференционная картина на толстых прозрачных пластинах возможна лишь в случае, когда длина когерентности больше разности хода интерферирующих волн. Этому условию отвечает лазерный свет.

Описание лабораторной установки

Принадлежности: полупроводниковый лазер, толстая стеклянная пластина, направляющая, набор рейтеров (зажимов), короткофокусная линза с вмонтированным в оправу экраном с отверстием для луча лазера, защитный экран, магниты для крепления бумаги, линейка. С помощью рейтеров лазер, линза и экраны могут устанавливаться в положениях 1-7 на направляющей (рисунок 3).

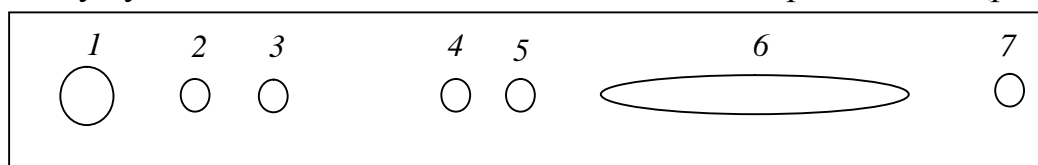


Рисунок 3

Мощностью лазера 6 мВт, длина волны излучения 650 нм ($650 \cdot 10^{-9}$ м), что соответствует красному свету. Толщина пластины 19,5 мм, коэффициент преломления 1,51.

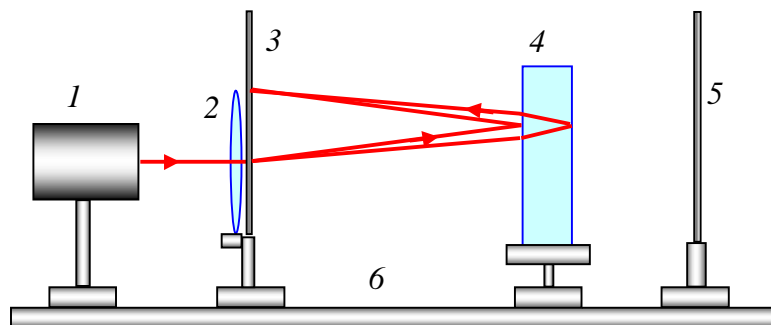
Внимание! Лазерное излучение опасно при попадании в глаза.

Внимание! Необходимо крайне осторожно работать со стеклянной пластиной. Ее поверхности имеют глубокую шлифовку и полировку отражающих поверхностей, а также высокую степень параллельности отражающих поверхностей.

Методика измерений

Установка собирается на направляющей в соответствии с рисунком 4. Лазерный луч, проходя через короткофокусную линзу, собирается в ее фокусе.

После фокуса формируется расходящийся пучок света. Фокус линзы выступает как точечный источник света. Проходя через отверстие в экране наблюдения, расходящийся пучок света падает на толстую стеклянную пластину. Отражения от граней пластины формируют на экране наблюдения интерференционную картину чередующихся темных и светлых колец (рисунок 5).



1 – лазер; 2 – короткофокусная линза; 3 – экран наблюдения; 4 – толстая стеклянная пластина; 5 – защитный экран; 6 – направляющая

Рисунок 4

Излучение, прошедшее через пластину, задерживается защитным экраном.



Рисунок 5

Для измерения параметров интерференционной картины на экране наблюдения магнитами закрепляется белый лист бумаги. На листе бумаги чертятся два взаимно перпендикулярных отрезка. В точке пересечения отрезков вырезается небольшое отверстие диаметром ~ 4 мм. Вырезанное отверстие и отверстие в экране наблюдения совмещаются.

Получив на экране интерференционную картину концентрических колец, необходимо отметить точки пересечения нескольких темных колец с начерченными на бумаге перпендикулярными отрезками. Расстояния между отмеченными точками соответствуют диаметру

кольца. Каждому кольцу соответствуют два значения диаметра.

Возможен альтернативный вариант измерений. Нанесенные перпендикулярные отрезки измеряются. Или на бумагу наносится масштабный отрезок длиной 3-5 см. Полученная интерференционная картина фотографируется. Измерения диаметров колец, с учетом масштаба, можно проводить в любом графическом редакторе, либо распечатав изображение на бумаге формата А4. Результаты измерений позволяют проверить справедливость полученных выше формул.

Задание №1

1. Соберите лабораторную установку на направляющей согласно рис. 4. Лазер, закрепленный в оправе на рейтере, размещается в положение 1. Защитный экран ставится в положение 7. Экран наблюдения с короткофокусной линзой помещается в положение 2. Лист бумаги с предварительно вырезанным отверстием и начерченными взаимно перпендикулярными отрезками закрепляется на экране наблюдения магнитами. Стеклопластина в оправе на рейтере помещается в дальнейшее от лазера положение паза 6 направляющей. Пластина располагается так, чтобы ее отражающие поверхности находились в плоскости, перпендикулярной к направляющей.
2. Включите лазер и отъюстируйте установку. Все элементы схемы выставите соосно. Линзу 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, так как при этом резко падает мощность излучения лазера. Пластину по высоте установите так, чтобы расширенный лазерный пучок симметрично охватывал ее. В отраженном свете в центре экрана наблюдения должна появиться система концентрических колец. Центры колец должны совпадать или располагаться близко к отверстию в экране наблюдения.
3. Измерьте линейкой расстояние от экрана наблюдения до стеклянной пластины. Занесите результат измерения в таблицу.
4. Карандашом отметьте точки пересечения нескольких темных колец с начерченными на бумаге перпендикулярными отрезками. Можно также проделать это на распечатанной фотографии интерференционной картины. На каждое кольцо будет приходиться четыре точки.
5. Измерьте расстояния между соответствующими парами точек. Занесите полученные значения диаметров колец в таблицу. Количество колец должно быть не менее восьми.
6. На миллиметровой бумаге постройте график зависимости квадрата радиуса темного кольца от его номера, $r_k^2 = r_k^2(k)$. Постройте аппроксимирующую прямую. Рассчитайте угловой коэффициент. Полагая известными длину волны лазерного излучения и коэффициент преломления пластины, рассчитайте ее толщину. Сравните с известным значением. Вычислите максимальное значение интерференционного порядка.

Задание №2

1. Выполните пункты 1-3 первого задания.
2. Выполните пункты 4-5, выбирая для измерения любые два соседних кольца.

- Сместите стеклянную пластину на 5-8 см ближе к экрану наблюдения и выполните измерения. Выполните измерения для четырех положений пластины.
- На миллиметровой бумаге постройте график зависимости разности квадратов радиусов соседних темных колец от квадрата расстояния между пластиной и экраном наблюдения. Постройте аппроксимирующую прямую. Рассчитайте угловой коэффициент. Полагая известными длину волны лазерного излучения и коэффициент преломления пластины, рассчитайте ее толщину. Сравните с известным значением.

Таблица измерений

№ опыта	$L, \text{ см}$	№ кольца	$d, \text{ мм}$ ↔	$d, \text{ мм}$ ↕	$r, \text{ мм}$	$r^2, \text{ мм}^2$	$f, \text{ мм}^2$
1		1					
		2					
		...					
		10					
2		k					
		$k+1$					
3		k					
		$k+1$					

Контрольные вопросы

- Каким образом можно получить интерференционную картину от источника естественного света?
- Почему говорят, что полосы равного наклона локализованы в бесконечности?
- Зачем в выражение для оптической разности хода интерферирующих волн вводят слагаемое, равное по модулю половине длины волны света?
- На какую величину изменяется оптическая разность хода при переходе от одной интерференционной полосы к соседней полосе?
- Какой области получаемой интерференционной картины соответствует максимальный порядок интерференции?
- Выведите формулу зависимости радиуса темного кольца от его номера.