

Лабораторная работа

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА. БИПРИЗМА ФРЕНЕЛЯ.

Цель работы: изучить интерференцию света на примере опыта с бипризмой Френеля, определить преломляющий угол бипризмы по отклонению луча лазера и по характеристикам интерференционной картины.

Принадлежности: полупроводниковый лазер, кювета, одна из стенок которой представляет собой бипризму Френеля, короткофокусная линза, экран для наблюдения, линейка.

Теория.

Интерференция.

Период оптических колебаний – величина столь малая, что ни человеческий глаз, ни фотоприборы не регистрируют мгновенные значения электрического и магнитного поля. Наблюдаемая нами величина «яркости» точки изображения на экране пропорциональна усреднённому за какой-то период квадрату напряженности электрического поля в этой точке. Её принято называть интенсивностью $I = \overline{E^2}$.

Пусть есть два пучка света, характеризуемые напряжённостями электрического поля \vec{E}_1 и \vec{E}_2 в некоторой пространственной точке. По принципу суперпозиции результирующей двух этих пучков в какой-либо точке пространства является векторная сумма

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Интенсивность света в данной точке

$$I = \overline{(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^2} = \overline{E_1^2} + 2\overline{(\vec{E}_1 \vec{E}_2)} + \overline{E_2^2} = I_1 + I_{12} + I_2.$$

Слагаемые I_1 и I_2 в правой части - интенсивности пучков 1 и 2, соответственно. Слагаемое I_{12} называется *интерференционным членом*. В случае, если пучки света независимы, усреднение по времени приводит к обращению в нуль этого члена. В случае если пучки не независимы, то интерференционный член может быть отличен от нуля, и такие пучки называют когерентными.

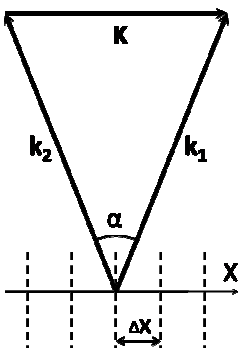


Рис.1

Рассмотрим две плоские монохроматические перекрывающиеся волны с волновыми векторами \vec{k}_1 и \vec{k}_2 (Рис.1). При этом

$$k_1 = k_2 = k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad k_{1,x} = k \cdot \sin(\alpha/2), \quad k_{2,x} = -k \cdot \sin(\alpha/2).$$

Здесь α - угол схождения плоских волн. Будем считать, что векторы напряженностей этих волн имеют только одну ненулевую компоненту перпендикулярную плоскости рисунка. Тогда для этих компонент можно записать

$$E_1 = a_1 \cos(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r} + \delta_1), \quad E_2 = a_2 \cos(\omega t - \vec{k}_2 \vec{r} + \delta_2),$$

здесь ω - циклическая частота волны.

Допустим, что $\delta_1 = \delta_2$. Тогда для разности фаз колебаний этих волн в некоторой точке получаем

$$\Delta\varphi = (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \vec{r} + (\delta_2 - \delta_1) = 2k \cdot \sin(\alpha/2) \cdot x.$$

Теперь выражение для результирующей интенсивности колебаний примет вид

$$I = I_1 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi) + I_2 = I_1 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(2k \cdot \sin(\alpha/2) \cdot x) + I_2.$$

Из этого выражения следует, что интерференционный максимум интенсивности достигается в тех точках пространства, в которых выполняется условие

$\Delta\varphi = 2\pi m, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Интерференционный минимум интенсивности достигается в тех точках пространства, в которых выполняется условие $\Delta\varphi = \pi(2m+1), m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

Допустим, что плоский экран для наблюдения интерференционной картины располагается перпендикулярно плоскости рисунка 1 так, что ось X лежит в его плоскости. Тогда в плоскости экрана будет наблюдаться периодическое изменение интенсивности от $I_{\max} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$ до $I_{\min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2$. При равных интенсивностях волн $I_1 = I_2 = I_0$

$$I(x) = I_0 \left(1 + \cos(2k \cdot \sin(\alpha/2) \cdot x) \right) = I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x\right) \right),$$

т.е. на экране будут наблюдаться темные и светлые параллельные полосы. Как видно из этого выражения, период интерференционной картины Λ (ширина интерференционной полосы) зависит от длины волны излучения λ и угла α схождения волн (см. рис.1)

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)} \approx \frac{\lambda}{\alpha}, \quad (1)$$

где последнее выражение получено для малых углов схождения.

О когерентности волн

Реальные световые волны не являются строго монохроматическими. Допустимо считать, что реальный источник испускает волны цугами (отрезками синусоид) длительностью τ . Цуги имеют пространственную длину $l = c\tau$, где c - скорость света. В течение этого цуга фаза волны остается постоянной. Таким образом, реальная световая волна представляет собой последовательность волновых цугов с беспорядочно изменяющейся от цуга к цугу фазой. Принято говорить, что колебания в разных цугах некогерентны. Интервал времени τ называют *временем когерентности*, а величину l - длиной когерентности.

Интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний, т.е. колебаний относящихся к одному цугу. В этом случае наблюдается устойчивая интерференционная картина. Таким образом, для получения интерференции света нужно волну от источника разделить на две когерентные волны и затем на экране наблюдать результат их сложения. При этом разность хода Δ волн до точки наблюдения не должна превышать длину когерентности l . Одной из оптических схем для наблюдения интерференции является схема с бипризмой Френеля (см. далее).

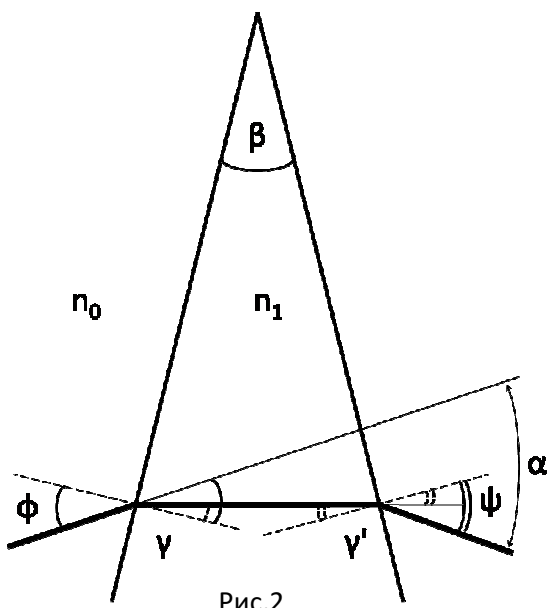


Рис.2

Отклонение луча бипризмой.

Рассмотрим ход луча, распространяющегося в среде с показателем преломления n_0 , и встречающего на своём пути клин из прозрачного материала с показателем преломления n_1 ($n_1 > n_0$) с малым преломляющим углом β (см. рис. 2.).

Пусть луч падает на клин под углом ϕ с нормали к поверхности. Тогда направление распространения преломлённого луча мы можем найти, пользуясь законом Снеллиуса:

$$n_0 \sin \phi = n_1 \sin \gamma,$$

где γ - угол, образованный прошедшим лучом с нормалью к преломляющей поверхности. Далее, если материал клина однороден, луч

распространяется прямолинейно, пока не встретит вторую границу раздела сред. Для неё можем записать:

$$n_1 \sin \gamma' = n_0 \sin \psi .$$

Связь углов γ и γ' найдём из треугольника, образованного вершиной клина и точками преломления луча на границе раздела сред:

$$\beta = \gamma + \gamma' .$$

Для малых углов падения и преломления связь углов ϕ и ψ примет простое выражение:

$$\phi + \psi = \frac{n_1}{n_0} \beta .$$

Рассмотрим, на какой угол луч отклонится от своего первоначального направления. Обозначим α угол между падающим и прошедшим лучом. На первой поверхности луч отклонится от линии своего направления распространения к более широкой части клина на угол $\phi - \gamma$, на второй – на угол $\psi - \gamma'$. Полный поворот луча в сторону широкой части клина составит

$$\alpha = (\phi - \gamma) + (\psi - \gamma') = (\phi + \psi) - (\gamma + \gamma') = \left(\frac{n_1}{n_0} - 1 \right) \cdot \beta .$$

Таким образом, при условии малости углов, угол отклонения α не зависит от угла падения, но только от материала клина и угла между плоскостями его образующими. В случае, когда внешней средой является воздух $n_0 = 1$, получаем

$$\alpha = (n - 1)\beta . \quad (2)$$

Бипризма Френеля.

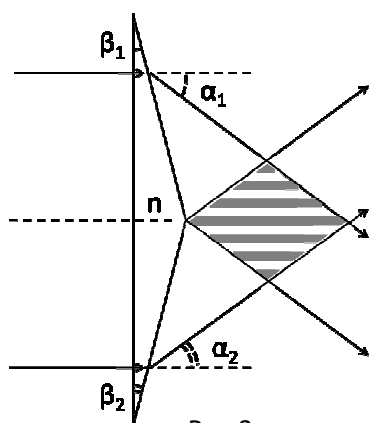


Рис.3

Как было сказано ранее, для наблюдения интерференции необходимо получить когерентные пучки света. Один из способов их получения - использование бипризмы Френеля.

Бипризма Френеля представляет собой две стеклянные призмы с малыми преломляющими углами β_1 и β_2 , сложенные своими основаниями (см. рис.3). Практически она изготавливается из целого куска стекла. Плоская волна, проходя через бипризму, разделяется на две когерентных плоских волны, распространяющихся под углом $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ друг к другу (угол схождения волн).

Описание элементов экспериментальной установки и схем их расположения при проведении измерений

На рис.4 показано поперечное сечение кюветы, одна из прозрачных стенок которой представляет собой бипризму Френеля с преломляющими углами β_1 и β_2 .

На рис.6 показана оптическая схема для определения угла α схождения (расхождения) лазерных пучков, возникших после преломления исходного лазерного пучка в бипризме Френеля. Как видно из рисунка, для малого угла α имеем

$$\alpha \approx \text{tg} \alpha = \frac{x_1 + x_2}{L} . \quad (3)$$

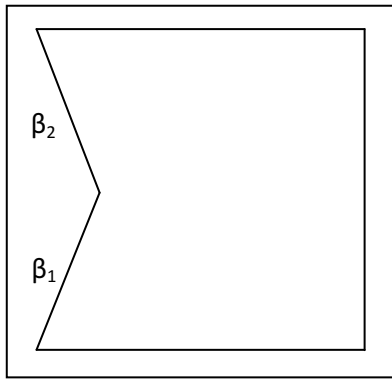


Рис.4

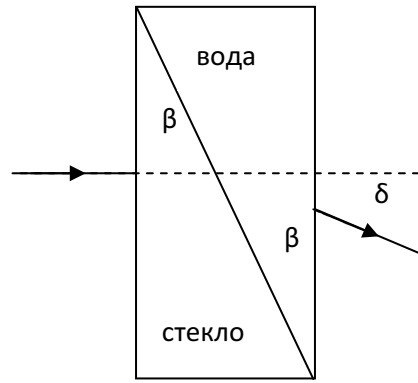


Рис.5

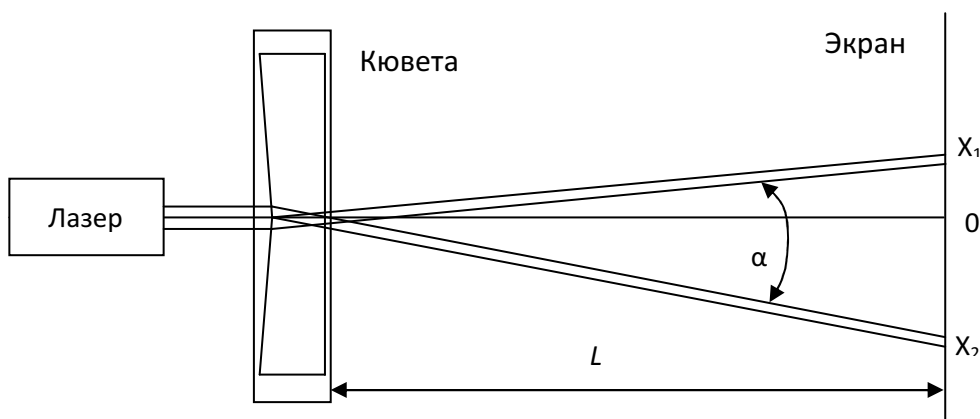


Рис.6

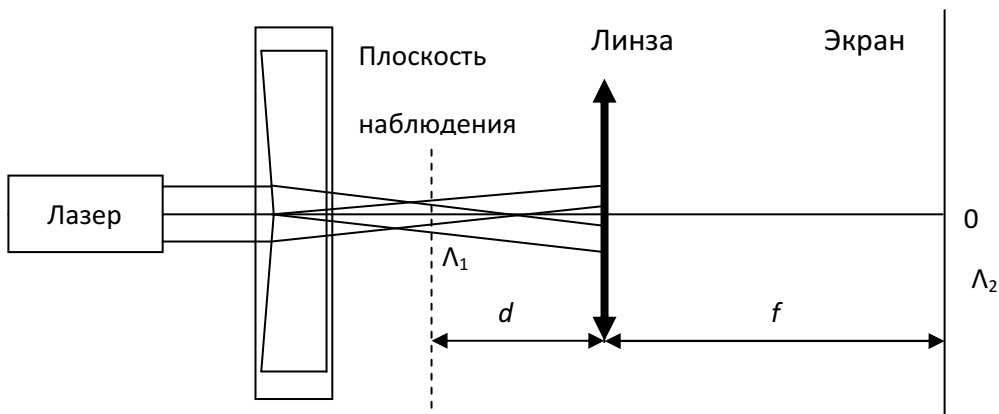


Рис.7

Задание.

1. Установите на одном конце направляющей лазер, на другом – экран с бумажным покрытием. Направьте лазер на экран. Включите питание лазера. Поворачивая и вращая крепление лазера, добейтесь попадания горизонтального луча лазера в центральную часть экрана. Отметьте карандашом на бумаге точку попадания.

2. Определите опытным путем, на какой из стенок кюветы «находится» бипризма Френеля. Для этого установите кювету на пути лазерного луча (ближе к экрану). Затем, помещая внутрь кюветы листочек бумаги, по характеру отраженных лучей сделайте вывод о «местонахождении» бипризмы Френеля. Смещая кювету относительно луча, наблюдайте за отклонением луча при его прохождении «левой» и «правой» половинок бипризмы. По результатам наблюдений составьте эскиз кюветы, указав на нем бипризму Френеля.

3. Установите кювету на расстоянии примерно $5 \div 10$ см от выходного окна лазера таким образом, чтобы центр луча попадал на вертикальное ребро бипризмы Френеля в средней (по высоте) её части (см. рис.6). Для «тонкой» настройки положения кюветы используйте винт, позволяющий плавно смещать её в горизонтальном направлении. На экране при этом должны появиться два пятна, соответствующих лучам, отклоненным разными частями бипризмы. Смещением кюветы в горизонтальном направлении перпендикулярно падающему на неё лучу добейтесь, чтобы пятна на экране имели одинаковую яркость. Измерив расстояние $x_1 + x_2$ между центрами пятен и расстояние L от экрана до кюветы, определите угол α схождения лучей. Изменяя положение кюветы относительно экрана, повторите измерения 3-4 раза.

4. Установите между кюветой и экраном (на расстоянии ≈ 10 см от кюветы) собирающую линзу (фокусное расстояние линзы $F=36$ мм) таким образом (см. рис.7), чтобы центр картинка (пятно с размытыми краями и более яркой центральной частью) на экране совпадал с точкой попадания луча при отсутствии линзы (центрирование оптической схемы).

5. Перемещая линзу по направлению к экрану, наблюдайте за изменением интерференционной картины на экране. Добейтесь появления на экране 3-4 вертикальных темных (или светлых) отчетливо видных интерференционных полос.

6. Запишите расстояние f от линзы до экрана, а также данные для определения периода Λ_2 наблюдаемой на экране интерференционной картины.

7. Воспользовавшись формулой тонкой линзы, определите расстояние d от линзы до плоскости наблюдения интерференционной картины (см. рис.7), изображение которой проецируется на экран. Рассчитайте линейное увеличение Γ линзы.

8. Зная увеличение Γ линзы, определите период Λ_1 интерференционной картины в плоскости наблюдения.

9. Пользуясь формулой (1) для периода интерференционной картины, рассчитайте угол схождения лучей после бипризмы. Длина волны излучения лазера указана на его подставке.

10. Повторите измерения по пунктам 5-9 для еще трех различных значений f .

11. Сравните значения для угла α схождения лучей, полученные двумя способами. Сравните погрешности измерения угла α двумя способами.

12. Заполните кювету водой. Повторите измерения по пунктам 5-9.

13. Получите выражение для угла δ отклонения луча после прохождения «водно-стеклянной» бипризмы (см. рис.5). Используя выражение для δ , получите выражение для угла α схождения (расхождения) пучков после прохождения кюветы с водой (пункт 12).

14. По результатам измерений α (пункт 12) определите значение показателя преломления n_{cm} стекла, из которого изготовлена стеклянная бипризма. По таблице показателей преломления стекол определите возможную марку стекла. Показатель преломления воды n_v принять равным $4/3$.

15. Оцените среднее значение преломляющего угла β_{cp} стеклянной бипризмы ($\beta_{cp}=0,5(\beta_1+\beta_2)$).

Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция?
2. Какие волны называются монохроматическими, а какие когерентными?
3. Что такое время и длина когерентности?
4. Сформулируйте условия для наблюдения интерференционного максимума и минимума.
5. Выведите формулы определяющие положение интерференционных максимумов и ширину полосы (периода интерференционной картины) для оптической схемы с двумя точечными источниками света.
6. Получите формулы 1, 2 и 3 к данной лабораторной работе.
7. Оцените максимальное число интерференционных полос, которое можно наблюдать в условиях опыта.
8. Оценить размеры (вдоль и поперек направления распространения пучков лазера) в которой можно наблюдать интерференционную картину.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика, М.: Наука, 1976.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики, т. IV. Оптика.

Показатели преломления для длины волны 589,3 нм

Тип среды	Среда	Температура, °С	Значение
Кристаллы ^[2]	LiF	20	1,3920
	NaCl	20	1,5442
	KCl	20	1,4870
	KBr	20	1,5552
Оптические стёкла ^[3]	ЛК3 (Лёгкий крон)	20	1,4874
	К8 (Крон)	20	1,5163
	ТК4 (Тяжёлый крон)	20	1,6111
	СТК9 (Сверхтяжёлый крон)	20	1,7424
	Ф1 (Флинт)	20	1,6128
	ТФ10 (Тяжёлый флинт)	20	1,8060
	СТФ3 (Сверхтяжёлый флинт)	20	2,1862 ^[4]
Драгоценные камни ^П	Алмаз белый	-	2,417
	Берилл	-	1,571 — 1,599
	Изумруд	-	1,588 — 1,595
	Сапфир белый	-	1,768 — 1,771
	Сапфир зелёный	-	1,770 — 1,779
Жидкости ^П	Вода дистиллированная	20	1,3330
	Бензол	20-25	1,5014
	Глицерин	20-25	1,4370
	Кислота серная	20-25	1,4290
	Кислота соляная	20-25	1,2540
	Масло анисовое	20-25	1,560
	Масло подсолнечное	20-25	1,470
	Масло оливковое	20-25	1,467
	Спирт этиловый	20-25	1,3612