

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА ОТ ДВУХ ИСТОЧНИКОВ

Цель работы — исследование характеристик интерференционной картины в схеме Юнга.

Требуемое оборудование

Модульный учебный комплекс МУК-ОВ.

Описание см. в файле «Описание лабораторной установки.docx».

Общие положения

Под интерференцией света понимают пространственное перераспределение энергии при суперпозиции электромагнитных волн видимого диапазона. Необходимым условием интерференции любых волн является их когерентность. Когерентность – это согласованность в протекании колебательных процессов. Необходимая согласованность заключается, прежде всего, в постоянстве разности фаз волн, приходящих в данную точку пространства. Из-за значительной степени немонохроматичности обычных источников это условие невыполнимо для волн, испускаемых двумя независимыми источниками. Поэтому обычно для получения когерентных световых волн при наблюдении двухлучевой интерференции поступают следующим образом: световой пучок от одного источника, разделяют тем или иным способом на два пучка, «идущие» разными путями в одну и ту же область пространства, где и наблюдается интерференция.

Различают два основных метода получения интерферирующих пучков: метод деления волнового фронта и метод деления амплитуды. Из-за малости длин волн видимого света и требований пространственной когерентности наблюдение интерференции света методом деления волнового фронта сопряжено с определенными сложностями. Один из первых успешных экспериментов, демонстрирующих двухлучевую интерференцию методом деления волнового фронта (рис. 1), был осуществлен Томасом Юнгом в начале XIX века.

Для электромагнитных волн (свет – электромагнитная волна) колебания вектора \vec{E} от двух одинаковых источников S_1 и S_2 определяются выражениями

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 \cos(\omega t - k_1 r_1), \quad (1)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_0 \cos(\omega t - k_2 r_2), \quad (2)$$

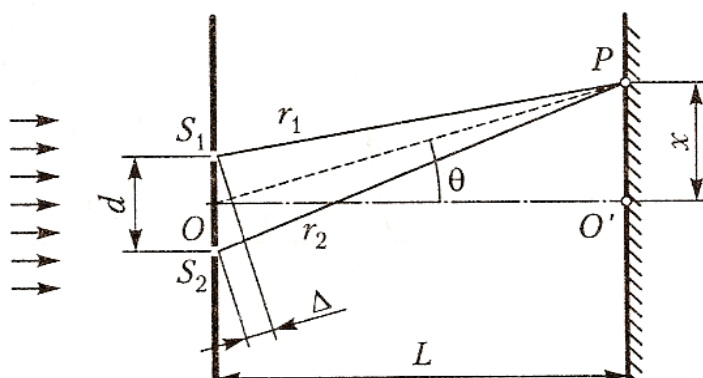


Рис. 1.

E_0 – амплитуда гармонических колебаний, k – волновое число, r_1, r_2 – расстояния от источников S_1, S_2 до точки наблюдения P на экране.

В точке наблюдения P происходит сложение колебаний одинаковой частоты. Будем считать, что эти колебания происходят вдоль одного

направления. Разность фаз колебаний в этой точке равна:

$$\delta = (\omega t - k_1 r_1) - (\omega t - k_2 r_2) = k_2 r_2 - k_1 r_1, \quad (3)$$

где $k = \frac{\omega}{v}$ – волновое число; $v = \frac{c}{n}$ – скорость распространения электромагнитной волны в среде с показателем преломления n ; c – скорость этой волны в вакууме. Так как

$$kr = \frac{\omega}{v} r = \frac{\omega}{c} nr = k_0 nr,$$

где $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ – волновое число для среды с $n = 1$ (вакуум), λ_0 – длина волны в среде с $n = 1$, то разность фаз колебаний

$$\delta = k_0 n_2 r_2 - k_0 n_1 r_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_2 r_2 - n_1 r_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (4)$$

определяет результирующее колебание в точке P . Величина $\Delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$ называется оптической разностью хода.

При выполнении условия $\delta = \pm 2\pi m$ (колебания происходят в одной фазе) или то же, выраженное через оптическую разность хода

$$\Delta = \pm m \lambda_0, \quad (5)$$

где m – любое целое число, в точке P наблюдается интерференционный максимум. Если же

$$\delta = \pm (2m + 1)\pi \text{ или } \Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad (6)$$

то в точке P наблюдается минимум. Можно сказать, что при сложении колебаний в любой точке пространства результирующее колебание определяется величиной оптической разности хода волн.

Методика эксперимента

В данной лабораторной работе источником служит лазер, обладающий по сравнению с обычными источниками высокой степенью монохроматичности и большой яркостью. Это позволяет наблюдать значительное количество интерференционных полос. Для увеличения яркости наблюдаемой интерференционной картины вместо точечных отверстий в качестве S_1 и S_2 в данной работе используются узкие длинные параллельные друг другу щели.

Рассмотрим монохроматическую световую волну с плоским фронтом, падающую на непрозрачный экран с двумя щелями (схема Юнга). На рисунке 1 изображен ход интерферирующих лучей от когерентных источников S_1 и S_2 до точки наблюдения P . Колебания происходят с одинаковой частотой ω , разность начальных фаз колебаний равна нулю (источники синфазны). Обозначим: d – расстояние между источниками S_1 и S_2 , L – расстояние от источников до плоскости наблюдения интерференционной картины, $L \gg d$, x – расстояние от точки P до центра O' интерференционной картины. Обычно интерферирующие лучи идут под малыми углами к оси системы OO' , угол $\theta \ll 1$, и для него справедливо соотношение $\theta \approx \frac{x}{L}$. В этом случае разность хода $\Delta = r_2 - r_1$ можно выразить как

$$\Delta \approx d \cdot \theta \approx d \frac{x}{L}. \quad (7)$$

Пусть экран, где расположены щели может поворачиваться относительно точки O – середины расстояния d между щелями (рис. 2) на некоторый угол α .

В этом случае оптическая разность хода лучей 1 и 2 от плоского фронта до щелей равна $\Delta_1 = FS_2 = d \cdot \sin \alpha$, а оптическая разность хода лучей 1 и 2 после прохождения щелей S_1 и S_2 равна Δ_2 ($n = 1$). На экран лучи 1 и 2 приходят с разностью хода $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$.

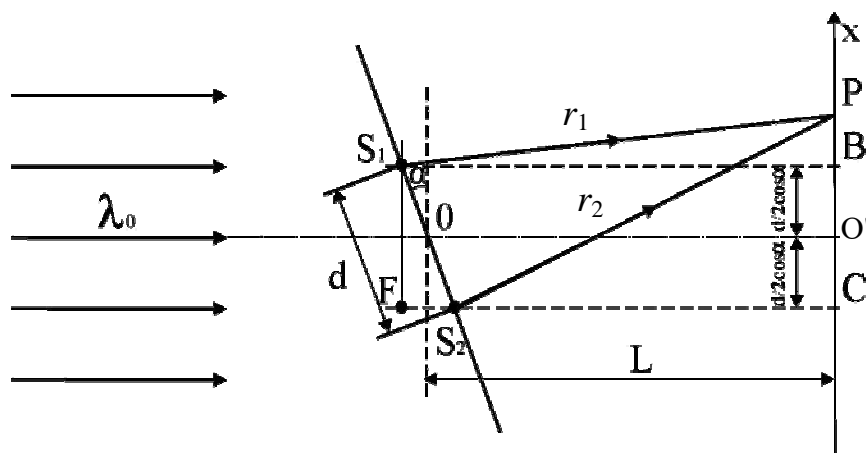


Рис. 2.

Рассчитаем Δ_2 . Из прямоугольных треугольников S_1BP и S_2CP :

$$r_1^2 = \left(L + \frac{d}{2} \sin \alpha\right)^2 + \left(x - \frac{d}{2} \cos \alpha\right)^2,$$

$$r_2^2 = \left(L - \frac{d}{2} \sin \alpha\right)^2 + \left(x + \frac{d}{2} \cos \alpha\right)^2,$$

$$\Delta_2 = r_2 - r_1,$$

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 + r_1) \cdot (r_2 - r_1) = -2 L d \sin \alpha + 2 x d \cos \alpha.$$

При условии $d, x \ll L$,

$$r_1 \approx r_2 \approx L,$$

$$r_1 + r_2 \approx 2L,$$

$$2L \cdot \Delta_2 = 2 x d \cos \alpha - 2 L d \sin \alpha,$$

или

$$\Delta_2 = \frac{x d \cos \alpha}{L} - d \sin \alpha,$$

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{x d \cos \alpha}{L}. \quad (8)$$

Расстояние между соседними максимумами или минимумами интенсивности называют шириной интерференционной полосы Δx (периодом интерференционной картины). В данной лабораторной работе период картины определяется по расстоянию между минимумами, поскольку их положения фиксируются точнее.

Из условия минимума (6) для интерферирующих лучей 1 и 2 получим координаты точек экрана с минимальной интенсивностью света

$$\pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2} = \frac{x d \cos\alpha}{L},$$
$$x = \pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2} \frac{L}{d \cos\alpha}. \quad (9)$$

Отсюда для ширины полосы получаем:

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda_0 L}{d \cos\alpha}. \quad (10)$$

Измеряя Δx между серединами ярких полос, можно рассчитать расстояние между щелями d :

$$d = \frac{\lambda_0 L}{\Delta x \cos\alpha}. \quad (11)$$

Период Δx измеряется при нескольких расстояниях L . Как видно из уравнения (10), зависимость Δx от L является линейной, а коэффициент наклона графика этой зависимости $K = \frac{\lambda_0}{d}$ (при $\alpha = 0^\circ$). Построив экспериментальный график Δx от L , можно убедиться в том, что зависимость действительно линейна, а по коэффициенту наклона получившейся прямой определить расстояние между щелями d .

Порядок выполнения работы

Номера блоков и кнопок установки смотрите в файле с описанием лабораторной установки.

1.1 Для выполнения лабораторной работы приготовьте миллиметровую бумагу формата А5. Положите ее на электронный блок 11, она будет играть роль экрана наблюдения. При этом расстояние между объектом и экраном $L_1 = 370$ мм.

1.2 Включите установку кнопкой «Сеть» 22.

1.3 Включите лазер кнопкой 17. **Время непрерывной работы лазера не должно превышать 15 минут! При работе с лазером недопустимо попадание в глаза прямого лазерного излучения!**

1.4 Вращая турель 2 установите по ходу лазерного луча объект с двумя щелями.

1.5 Установите угол поворота щелей $\alpha = 0^\circ$. Поправьте лист миллиметровой бумаги так, чтобы интерференционная картина располагалась вдоль координатной линии. Зарисуйте или сфотографируйте интерференционную картину.

1.6 Повторите измерения для углов 30° , 60° .

1.7 Установите произвольный угол α_x в диапазоне от 30° до 60° и зарегистрируйте полученную интерференционную картину.

1.8 Повторите измерения для расстояния $L_2 = 278$ мм между объектом и экраном. Для этого введите в схему анализатор 7, положите на него миллиметровую бумагу и повторите пункты 1.5, 1.6. Уберите анализатор из хода луча.

1.9 Ввести в схему блок для измерения угла Брюстера 9 и повторить те же измерения. ($L_3 = 200$ мм).

1.10 По указанию преподавателя повторить все измерения для другого объекта со щелями.

Обработка результатов

2.1. Составьте таблицу, в которую занесите информацию о расстоянии L от щелей до экрана, угле поворота α , количестве N интерференционных полос (рекомендуется для расчета брать $N = 7 \dots 9$), расстоянии s между серединами крайних выбранных минимумов, ширине полосы Δx , расстоянию между щелями d :

№ п/п	L , мм	α , °	N	s	Δx	d	$\langle d \rangle$
1	370	0					
2		30					
3		60					
4		α_x					
...	...						

2.2. По полученным данным рассчитайте ширину полосы $\Delta x = s/N$.

2.3. Рассчитайте расстояние между щелями d по формуле 11. Полученное значение усредните.

2.4. По результатам пункта 1.7, учитывая рассчитанное расстояние между щелями d , определите угол поворота объекта α_x .

2.5. Выполните те же вычисления для других L . Постройте график зависимости $\Delta x(L)$ при $\alpha = 0^\circ$. По коэффициенту наклона аппроксимирующей кривой определите расстояние d между щелями: $d = \frac{\lambda_0}{K}$. Полученное значение сравните с d , рассчитанным по формуле 11.

2.6. Постройте графики зависимости $\Delta x(\alpha)$ для всех расстояний L .

2.7. Оцените погрешность Δd .

Отчет по лабораторной работе оформляется либо на листах формата А4, либо на двойном листе из тетради в клетку. Отчет должен включать:

- протокол измерений, подписанный преподавателем, проводившим занятие в лаборатории;
- краткую теоретическую часть с оптической схемой;
- графики, выполненные на миллиметровой бумаге;
- вывод.

Список рекомендуемой литературы:

1. А. А. Детлаф, Б. М. Яворский Курс физики.— 8-е изд., стер. — М.: Издательский центр "Академия", 2009.
2. С. К. Стафеев, К. К. Боярский, Г. Л. Башнина Основы оптики. — СПб.: Питер, 2006.
3. Т. И. Трофимова Курс физики. Оптика и атомная физика: теория, задачи и решения. — М.: Высшая школа, 2003.
4. В. В. Курепин, И.В. Баранов Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2003.-57 с.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление интерференции?
2. Что понимают под монохроматической волной?
3. Какие источники называются когерентными, и как их можно получить?
4. В чем отличие понятий геометрической и оптической разности хода при интерференции?

5. Сформулировать условия максимумов и минимумов при интерференции в выражении через разность хода и разность фаз.
6. Что такое ширина интерференционной полосы?
7. Как найти разность хода интерферирующих лучей в опыте Юнга?
8. Как изменяется вид интерференционной картины в опыте Юнга при уменьшении расстояния между отверстиями S_1 и S_2 ?
9. Как изменяется вид интерференционной картины в опыте Юнга при увеличении расстояния между плоскостью с отверстиями S_1 и S_2 и плоскостью наблюдения интерференции?
10. Как изменится вид интерференционной картины в опыте Юнга при увеличении длины волны света, с которым проводится опыт?
11. Что такое степень монохроматичности излучения?
12. Что называется условием временной когерентности для наблюдения интерференции?
13. Что такое порядок интерференционной полосы?
14. Зачем была нужна первая щель в опыте Юнга?
15. Что такое радиус когерентности излучения? При каком условии на радиус когерентности излучения можно наблюдать интерференцию в опыте Юнга?
16. Достаточно ли условие когерентности для получения интерференционной картины при совмещении двух и более световых волн?
17. Почему результат интерференции зависит от разности хода совмещающихся когерентных и поляризованных волн?
18. При осуществлении интерференции света участвовали световые пучки, в состав которых, наряду с когерентным светом, входил и некогерентный. Что при этом наблюдалось?
19. Можно ли наблюдать интерференцию при совмещении волн от:
 - а) двух независимых источников волн на поверхности воды;
 - б) двух струн одной гитары;
 - в) двух одинаковых камертонов;
 - г) двух ламп накаливания;
 - д) двух лазеров?