

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 04

ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА. БІПРИЗМИ ФРЕНЕЛЯ.

Завдання 1. Визначення параметрів біпризми Френеля за інтерференційною картиною

Мета роботи: дослідити інтерференцію червоного лазерного світла. Інтерференційна картина одержується за допомогою біпризми Френеля. За інтерференційною картиною і за відхиленням променя лазера біпризмою знаходять параметр біпризми Френеля - заломлюючий кут β . Результати порівнюються.

Обладнання: лазер з довжиною хвилі 670 нм (червоний) і потужністю випромінювання 0,5 мВт, оптична лава, набір рейтерів, короткофокусна лінза, біпризми Френеля.

Методика проведення. Підчас інтерференції і дифракції виявляються хвильові властивості світла. Різними способами (заломленням, відбиванням, розщеплення) можна накласти один світловий пучок на інший. Якщо виконується принцип суперпозиції, то кожен пучок буде проходити через область перекриття так, ніби іншого пучка не було.

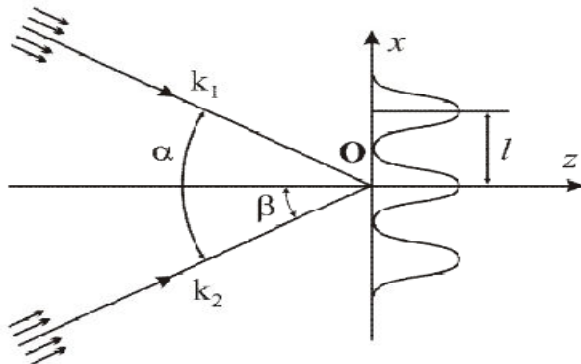


Рис. 1. Накладення двох променів, що сходяться під кутом.

Нехай два пучки накладаються в просторі (див. рис. 1). Напруженість електричного поля, створювана першим пучком в довільній точці області перекриття, E_1 , а другим – E_2 . Згідно принципом суперпозиції, результуюча напруженість в тій же точці А, створювана обома пучками, буде векторною сумою

$$E = E_1 + E_2.$$

Нехай пучки світла, що накладаються, є двома плоскими хвилями, що мають однакові амплітуди і частоти. Тоді

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \mathbf{r}), \\ \mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \mathbf{r}), \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$k_1 = k_2 = k = 2\pi/\lambda.$$

Знайдемо тепер інтенсивність світла у точці, що нас цікавить. Враховуючи, що $I \sim \langle E_0^2 \rangle$, де кутові дужки означають усереднення за часом, отримаємо

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}$$

Тут $I = I_1 = I_0 \sim \langle E_0^2 \rangle$, а інтерференційний компонент I_{12} має вигляд:

$$I_{12} = 4I_0 \langle \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \mathbf{r}) \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \mathbf{r}) \rangle = 2I_0 \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \mathbf{r}] \dots \quad (3)$$

В нашому випадку (див. рис. 1) $\alpha = 2\beta$ - кут сходження пучків. Тоді $(k_1 - k_2)r = 2kx \sin \beta$, де координата x відраховується від початку відліку O . Одержуємо

$$I = 2I_0 [1 + \cos(2kx \sin \beta)] = 4I_0 \cos^2(kx \sin \beta) \quad (4)$$

Залежність інтенсивності від координати x можна зобразити на графіку (див. рис. 2).

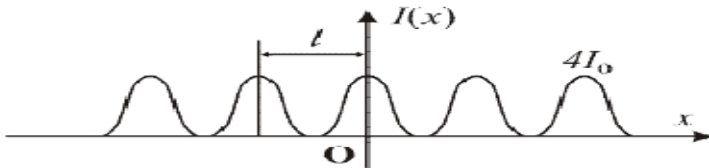


Рис. 2. Розподіл інтенсивності світла в інтерференційній картині по осі x

Неважко бачити, що виникає чергування максимальної та мінімальної інтенсивності, тобто виникає інтерференційна картина період якої

$$l = \frac{\pi}{k \sin \beta} = \frac{\lambda}{2 \sin \beta} = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)} \quad (5)$$

для малих кутів $l \approx \lambda/\alpha$.

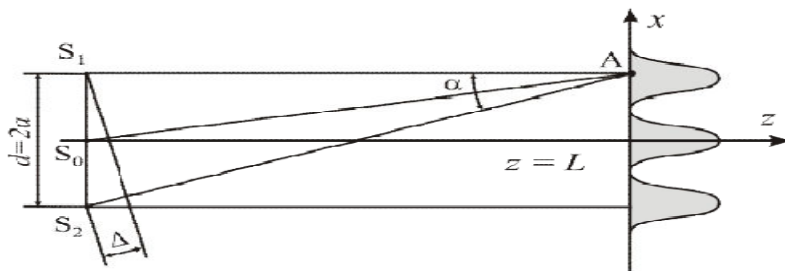


Рис. 3. Накладення світла в точці А

Чергування максимальної та мінімальної інтенсивностей в області перетину пучків є *інтерференцією*. Схема досліду з інтерференції подана на рис. 3. Якщо в просторі $z = L$ поставити екран спостереження, то ми побачимо інтерференційну картину, в якій в напрямку x інтенсивність змінюється за законом (4). Ця інтерференційна картина буде мати вигляд світлих і темних смуг.

Найбільш зручним джерелом світла для спостереження інтерференції є лазер. Це можливо в силу спеціальних властивостей лазерного світла - його когерентності. Можна вважати, що цуг випромінювання лазера настільки великий, що в результаті тимчасового усереднення картина інтерференції незмазується, а залишається чіткою. Довжина цугу світла повинна бути більше різниці ходу Δ двох інтерферуючих променів. У разі білого світла для спостереження інтерференційної картини допустима різниця ходу двох інтерферуючих променів величиною лише в кілька довжин хвиль λ . (Зелене світло $\lambda = 5 \times 10^5$ см). Для лазерного світла вона становить сантиметри і для спеціальних лазерів може досягати кілометрів.

Різниця ходу Δ у схемі інтерференційного експерименту (рис. 3) від двох джерел S_1 і S_2 визначається як $\Delta = 2a \sin \alpha$. Для малих кутів $\sin \alpha \approx \alpha \approx 2a/L = d/L$, де d - відстань між джерелами S_1 і S_2 , L - відстань від джерела до площини спостереження; λ - довжина хвилі; l - період інтерференційної смуги. Інтерференційна картина (див. рис. 2) з періодом l спостерігається при сходженні променів під кутом. Якщо відстань між джерелами S_1 і S_2 і геометрія досліду такі, що забезпечується кут сходження променів рівний $\alpha = \lambda/l$, то

умови виникнення інтерференції виконані, тобто виконується співвідношення

$$\frac{d}{L} = \frac{\lambda}{l} \quad (6)$$

Допустима різниця ходу між інтерферуючими променями може бути оцінена як

$$\Delta \approx 2a \sin \alpha \approx d\alpha \approx d \frac{\lambda}{l} \quad (7)$$

Оскільки в той же час має виконуватися співвідношення $\Delta = d^2/L$, то відстань L повинна бути не меншою ld/λ тобто

$$L \approx \frac{ld}{\lambda} \quad (8)$$

Це дозволяє вважати, що за наявності випромінювання з довжиною хвилі λ від двох джерел S_1 і S_2 з відстанню між ними d на відстані L від них буде спостерігатися інтерференційна картина з розміром смуги

$$l \approx \frac{\lambda}{d} L \approx \frac{\lambda}{\alpha} \quad (9)$$

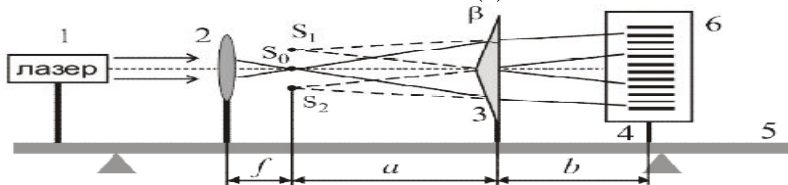


Рис. 4. Схема дослід з інтерференції лазерного світла на біпризмі Френеля. 1 - Лазер. 2 - Лінза. 3 - Біпризми Френеля.

4 - Екран спостереження. 5 – Оптична лава. 6 -
Інтерференційна картина

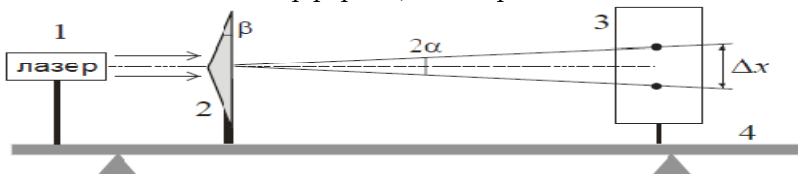


Рис. 5. Схема дослід з проходження лазерного променя через біпризму Френеля. 1 - Лазер. 2 - біпризми Френеля. 3 - Екран спостереження. 4 – Оптична лава

Інтерференційна картина з'являється при накладанні двох когерентних пучків світла. У роботі накладається два пучки, отримані шляхом поділу (розщеплювання) променя лазера на два пучки за допомогою біпризми Френеля на схемі рис. 4. Вимірюється період інтерференційної картини і знаходиться параметр біпризми - заломлює кут β .

З досліду за схемою рис. 5 при безпосередньому визначенні кута β , на який відхиляє біпризма падаючий на неї промінь, знаходиться заломлюючий кут біпризми Френеля. Порівнюються значення кута β , отримані обома способами. Оцінюються похибки

Біпризма Френеля складається [3] з двох скляних призм з малими заломлюючими кутами β складених своїми основами. Джерелом світла є (див. рис. 4) сфокусоване в точку лазерне випромінювання. Після заломлення в біпризмі падаючий пучок світла розділяється на два когерентних промені з вершинами в уявних зображеннях S_1 і S_2 джерела S_0 . В області екрану промені перекриваються і дають систему паралельних інтерференційних смуг. У роботі: β - заломлюючий кут біпризми, n - показник заломлення біпризми (для розрахунків вважати n рівний коефіцієнту заломлення скла), a і b - відстані від біпризми до джерела випромінювання S_0 і до екрану спостереження відповідно.

Кожна половина біпризми відхиляє промінь на кут $\alpha = (n-1)\beta$. Відстань d між уявними джерелами S_1 і S_2 одно 1 лютото $d = S_1S_2 = 2a(n-1)\beta$. Кутова відстань між уявними джерелами $\alpha = d/(a+b)$. Ширина інтерференційної смуги (період інтерференційної картини)

$$l = \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{\lambda(a+b)}{2a(n-1)\beta} \quad (10)$$

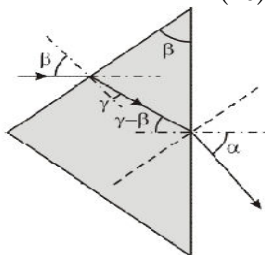


Рис. 6. Хід променів в біпризмі Френеля

Хід променів через біпризми Френеля показу на рис. 6. Використовуючи закон заломлення Снелліуса і малу величину кутів падіння і заломлення можна записати

$$\gamma = \beta \frac{n_0}{n},$$

$$\gamma' = \beta - \gamma = \beta \left(1 - \frac{n_0}{n} \right)$$

Біпризми відхиляє падаючий на неї промінь на кут

$$\alpha = \gamma' \frac{n_0}{n} = \beta \left(\frac{n_0}{n} - 1 \right) \quad (11)$$

Вважаючи для повітря $n_0 = 1$, можна записати, що кут, на який біпризма відхиляє падаючий на неї промінь, дорівнює

$$\alpha = \beta (n - 1) \quad (12)$$

Зберіть схему згідно з рис.4. Для цього лазер ставиться на оптичну лаву, далі біпризми в оправі і екран спостереження. На екрані закріплюється аркуш паперу для замальовки інтерференційної картини. У промінь лазера перед біпризмою ставиться в положення лінза ($f = 25$ мм). Вона створює джерело S_0 і розширює пучок. Лінзу встановлюють так, щоб її фокус був перед біпризмою (точка S_0). Далі розбіжний пучок ділиться біпризмою на два розбіжних промені. На екрані спостереження ці промені перекриваються. Область випромінювання лазера є світна щілина. Лазер обертають і встановлюють його так, щоб область випромінювання була паралельна ребру біпризми. Біпризма в оправі стоїть так, що її ребро було перпендикулярно до площини стола. На екрані виникає ряд паралельних смуг, напрямлених паралельно ребру призми.

Виконуючи нескладну настройку схеми, домагаються чіткої інтерференційної картини на екрані. Олівцем на листку паперу замальовуйте інтерференційну картину. Порахуйте число смуг між олівцевими позначками. Потім папір зміщується і картинка відзначається знову. Після кількох пересувань папір знімається, вимірюється відстань між мітками за допомогою лінійки. За допомогою лінійки вимірюють відстань між елементами схеми (лінзи, біпризми, екрану). Знаючи фокусну відстань лінзи, визначаються відстані a і b . Розмір інтерференційної області і число смуг визначають декілька разів. Після цього знаходять середній розмір періоду

інтерференційної картини l . Знаючи розмір періоду інтерференційної картини і геометрію досліду (величини a і b), використовуючи співвідношення знаходять (10) параметр біпризми (заломлюючий кут β)

$$\beta = \frac{\lambda(a+b)}{2a(n-1)} \quad (13)$$

Зберіть схему згідно за рис 5. На екрані закріплюється аркуш паперу для замальовки інтерференційної картини. Лазер і біпризми виставляються так, щоб ребро біпризми розщеплювали промінь лазера на дві частини. Ці два пучки лазера падають на екран спостереження. Олівцем на листку паперу роблять замальовки двох лазерних плям на екрані. Аркуш паперу пересувають і роблять кілька замальовок. За допомогою лінійки вимірюють відстань L від біпризми до екрану. Папір з екрану знімають і за допомогою лінійки вимірюють на замальовках відстань Δx між променями лазера. Знаючи відстань L і величину Δx , визначають величину відхилення променя лазера a після проходження біпризми Френеля. Використовуючи вираз (4.12), знаходять значення величини параметра біпризми Френеля

$$\beta = \frac{\alpha}{n-1} \quad (14)$$

Визначте середнє значення параметра біпризми і похибки досліду у варіантах 1 і 2. Порівняйте результати визначення параметра β обома способами за формулами (13) і (14)

Зберіть схему за рис. 4. Помістіть екран послідовно в далеке положення від лазера і в ближнє положення від лазера. Для трьох значень b знайдіть величину періоду l інтерференційної картини. Вважаючи величину β визначеною і використовуючи отримані вище значення β , перевірте правильність співвідношення (4.10).

Додаток. Визначення параметрів біпризми Френеля.

Спосіб 1. Інтерференція в розбіжних пучках лазера. Схема досліду подана на рис. 4. У досліді лазер розміщується на оптичній лаві. Короткофокусну лінзу 4 встановлюють за лазером, далі - біпризму Френеля. Невеликий екран встановлюють в положення за біпризмою. Вимірювання періоду інтерференційної картини можна вести на екрані спостереження або на віддаленому на 2-3 метри екрані.

Спосіб 2. Інтерференція в паралельних променях лазера. Схема досліду подана на рис. 4а.

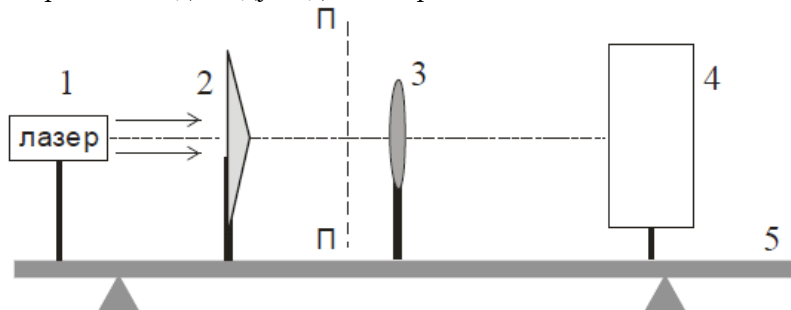


Рис. 4а. 1 - Лазер. 2 - біпризми Френеля. 3 - Лінза. 4 – Екран спостереження. 5 – оптична лавя. ПП – площина спостереження

Лазер розміщують на оптичній лаві, далі розміщують біпризми Френеля і пересувають її якомога ближче до лазера. Потім за біпризмою за ходом променя ставлять короткофокусний лінзу. Біпризми розташовують на такій відстані, щоб площина ПП спостереження інтерференційної картини була спроектована на екран.

Для лінзи з $f = 25$ мм відстань від біпризми до лінзи близько 65 або 93 мм. Для лінзи з $f = 15$ мм відстань від біпризми до лінзи близько 57 або 100 мм. Короткофокусная лінза відіграє допоміжну роль і є проєкційної лінзою. Вона картину у площині спостереження ПП проєктує на екран у збільшеному масштабі. Вимірювання періоду інтерференційної картини ведуться за зарисовкам на екрані за допомогою лінійки. Знаючи фокусну відстань лінзи f і відстань L від лінзи до екрана, визначають коефіцієнт збільшення інтерференційної картини на екрані. Потім обчислюють розмір інтерференційних смуг. Визначення параметра здійснюється біпризми аналогічно вище описану.

Література

1. Сивухин Д.В. Загальний курс фізики. т. IV. Оптика. - М.: Наука, 1980. гл.ІІІ. §§ 26,27.
2. Горелік Г.С. Коливання і хвилі - М.: Физматгиз, 1959, гл.V. §§ 26.
3. Ландсберг Г.С. Оптика - М.. Наука, 1976, гл.IV, § 11-16.