

Лабораторна робота № 3-11

ВИВЧЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА (біпризма Френеля)

Мета роботи: вивчити двопроменеву інтерференцію світла за допомогою біпризми Френеля; визначити характеристики світлофільтра - довжину хвилі у максимумі пропускання та смугу пропускання.

Короткі теоретичні відомості

Інтерференцією називається таке накладання хвиль, за якого результуюча інтенсивність не дорівнює сумі інтенсивностей хвиль, що приходять до точки накладання.

Інтерференція обумовлена принципом суперпозиції, відповідно до якого, у точці накладання двох світлових хвиль додаються світлові вектори \vec{E}_1 і \vec{E}_2 (напруженості полів), а не енергії, тому за накладання хвиль з інтенсивностями I_1 і I_2 результуюча інтенсивність:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (1.1)$$

де $\langle \cos \delta \rangle$ – усереднене у часі значення косинуса різниці початкових фаз коливань, що збуджуються у точці накладання кожним джерелом. З цього співвідношення видно, що інтерференція можлива тільки за умови $\langle \cos \delta \rangle \neq 0$, тобто при накладанні когерентних (узгоджених) хвиль. Якщо інтенсивності $I_1 = I_2 = I_0$ то результуюча інтенсивність така:

$$I(\delta) = 4I_0 \cos^2(\delta/2) \quad (1.2)$$

Величина δ залежить від взаємного розташування джерел S_1 і S_2 і точки накладання P (рис. 1.1):

$$\delta = (2\pi/\lambda)\Delta, \quad (1.3)$$

де λ - довжина світлової хвилі у вакуумі; Δ - оптична різниця ходу променів.

Для вакууму або повітря $\Delta = r_2 - r_1$ (рис. 1.1), тобто співпадає з геометричною різницею ходу.

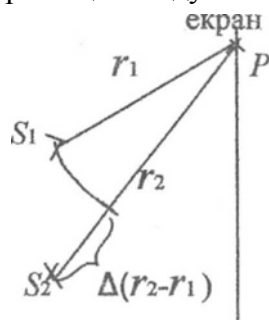


Рис. 1.1.

За переміщення точки P у заданому напрямку величини Δ і δ будуть монотонно, а інтенсивність I періодично змінюватись, тобто на екрані буде спостерігатись інтерференційна картина у вигляді світлих (максимуми) та темних (мінімуми) смуг, що чергуються. Загальні умови спостереження максимумів і мінімумів:

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} &= k\lambda \\ \Delta_{\min} &= (k + 1/2)\lambda, \end{aligned} \quad (1.4)$$

де $k = 0, 1, 2, \dots$ – порядок інтерференційного максимуму

Максимум, що відповідає $k = 0$, називається центральним.

Опис досліду з біпризмою Френеля

За своєю природою електромагнітне випромінювання (світло) незалежних природних джерел, а також різних ділянок одного джерела, некогерентне. Тому для отримання когерентних світлових пучків і спостереження інтерференції світла,

випромінювання, що йде від одного джерела малих розмірів (точкове), у той чи інший спосіб розділяється на два пучки, що перекриваються та поширюються у близьких напрямках. У даній роботі таке розділення здійснюється за допомогою біпризми Френеля (рис.1.2), яка являє собою дві скляні призми (склеєні малими основами) з малими кутами заломлення Θ . Світло від джерела S після заломлення у біпризмі поширюється у вигляді двох когерентних пучків, що розходяться, і таких, що, начебто, виходять із двох точок S_1 і S_2 , які є уявними зображеннями джерела S . Тому можна сказати, що біпризма замість одного некогерентного джерела S дає два уявних когерентних джерела S_1 і S_2 . При малих кутах θ відстань між джерелами S_1 і S_2 :

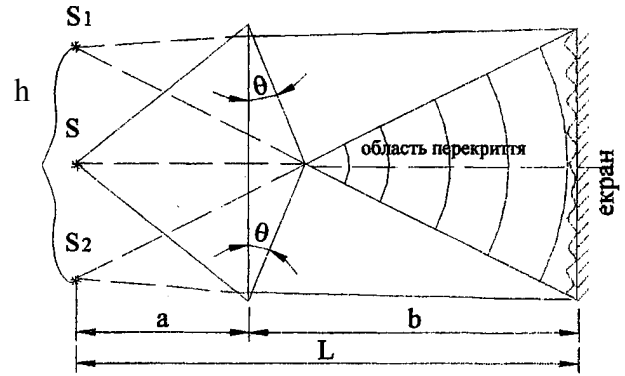


Рис 1.2

$$h = 2a(n-1)\theta,$$

де a - відстань від джерела S до біпризми; n - показник заломлення біпризми; для скла $n = 1.5$ і $h = \alpha\theta$. Для точкового та повністю монохроматичного джерела S на встановленому на відстані $L = a+b$ від нього екрані в області перекриття пучків (рис. 1.2) повинні спостерігатися інтерференційні смуги з однаковими інтенсивностями $I_{\max} = 4I_0$ і $I_{\min} = 0$ [див.(1.2) та рис. 1.3,a)]. Координати X_k максимумів і мінімумів залежать від порядку

джерелами h :

$$X_k^{\max} = \frac{k\lambda L}{h}; \quad X_k^{\min} = \frac{\left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda L}{h} \quad (1.5)$$

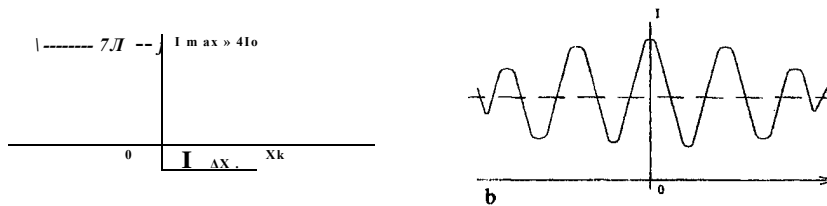


Рис. 1.3

З умов (1.5) виходить, що ширина інтерференційної смуги $\Delta X = X_{k+1}^{\min} - X_k^{\min}$ не залежить від k , тобто смуги розміщуються еквідистантно на відстані

$$\Delta X = \lambda L/h. \quad (1.6)$$

Наявність у реального джерела кінцевих лінійних розмірів призводить до загального пониження контрастності інтерференційної картини, тобто до зменшення інтенсивності усіх максимумів і підвищення інтенсивності в усіх мінімумах. Тому за збільшення лінійних розмірів джерела якість інтерференційної картини погіршується і при розмірах джерела

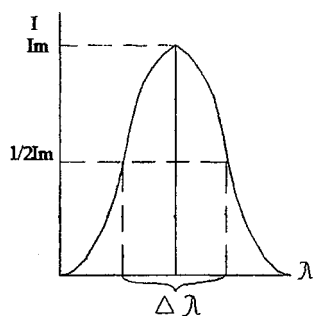
порядку ширини смуги ΔX інтерференційні смуги взагалі зникають. Інша причина, що погіршує умови спостереження інтерференції, полягає у відсутності у природі повністю монохроматичних джерел світла, випромінювання завжди містить певний інтервал довжин хвиль $\Delta\lambda$. Це призводить до того, що інтенсивність максимумів і контрастність картини різко зменшуються з віддаленням від центру, як показано на рис.1.3,6, внаслідок чого для реального джерела максимальний порядок k_{max} смуг, що спостерігаються, не перевищує значення

$$k_{max} = \lambda / \Delta\lambda, \quad (1.7)$$

а загальна кількість темних смуг, що можна бачити на екрані:

$$N = 2k_{max} = 2\lambda / \Delta\lambda, \quad (1.8)$$

У даній роботі біпризма Френеля освітлюється від лампи розжарювання крізь світлофільтри, тому величини, що входять до формул, треба розуміти так: λ - довжина хвилі, що відповідає максимуму смуги пропускання світлофільтра, $\Delta\lambda$ - ширина смуги пропускання світлофільтра (рис. 1.4). Вимірявши в експерименті параметри інтерференційної картини можна на підставі формул (1.6) і (1.8) визначити характеристик λ і $\Delta\lambda$ для світлофільтра, що використовується:



$$\lambda = \Delta X h / L, \quad (1.9)$$

$$\Delta\lambda = 2\lambda / N. \quad (1.10)$$

Величини L , ΔX і N вимірюються безпосередньо, а відстань h визначається так, як описано нижче.

Рис. 1.4

Експериментальна установка

На оптичній лаві (масивна рейка з направляючими) на рейтерах (спеціальні підставки) змонтовано усі необхідні елементи оптичної схеми (рис 1.5).

Пучок світла від освітлювача O проходить через змінний світлофільтр Φ та потрапляє на щілину Ψ , яка грає роль вузького лінійного джерела. Світло, що виходить із щілини, направляється в центральну зону біпризми Френеля Π . Інтерференція когерентних пучків світла, що утворюються після проходження біпризми, спостерігається за допомогою окулярного мікрометра OM , який грає роль екрану. Сюди ж проектується зображення

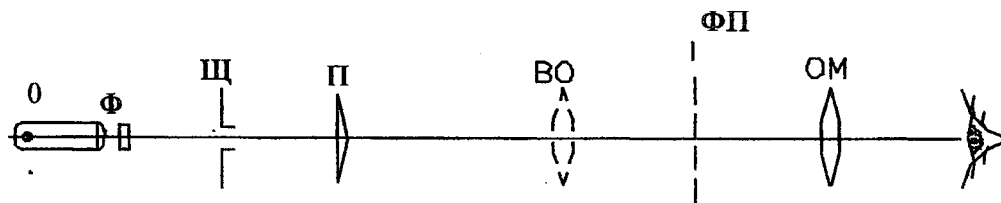


Рис. 1.5

візирної нитки і вимірювальної шкали, що дозволяє фіксувати положення інтерференційних смуг та вимірювати їх координати.

Для юстування (налагоджування) установки усі елементи схеми можуть переміщуватись як уздовж осі системи, так і впоперек (вертикально й горизонтально).

Оскільки відстань ΔX надто мала, то для підвищення точності вимірювань діють таким чином. Установлюють візирну нитку окуляра на будь-яку темну смугу у лівій частині картини (рис.6) і приписують їй номер 0. Потім вимірюють відстань між "нульовою" смугою і будь якою смугою з номером n (звичайно $n=10$). У такому випадку

$$\Delta X = X/n. \quad (1.11)$$

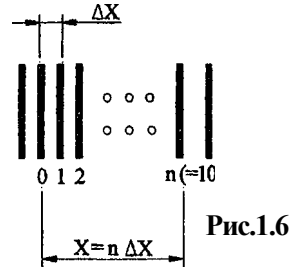


Рис.1.6

Для визначення відстані між уявними джерелами h використовується допоміжний об'єктив ВО (збірна лінза з відомою фокусною відстанню F), який установлюється між біпрізмою та окуляром (рис. 1.5). За допомогою об'єктива на передню фокальну площину окуляра фокусується дійсне зменшене зображення уявних джерел і зображення щілини S у біпрізмі), як показано на рис 1.7. З рисунка видно, що

$$h/h' = d/f \quad \text{і} \quad d+f=L. \quad (1.12)$$

Крім того, відстані d , f і F пов'язані формулою тонкої лінзи:

$$1/d = 1/f + 1/F. \quad (1.13)$$

Зі співвідношень (1.12) і (1.13) після елементарних перетворень маємо:

$$\frac{h}{L} = \frac{(d - F)^2}{d^2 F} \quad (1.14)$$

Тобто, визначивши за допомогою окулярного мікрометра величину h' і вимірявши відстані L і d , можна знайти h .

Підставивши вираз (1.14) для h і раніше отриманий вираз для ΔX (1.11) у співвідношення (1.9), отримаємо робочу формулу для визначення довжини світлової хвилі:

$$\lambda = \frac{Xh'(d - F)^2}{nd^2 F} \quad (1.15)$$

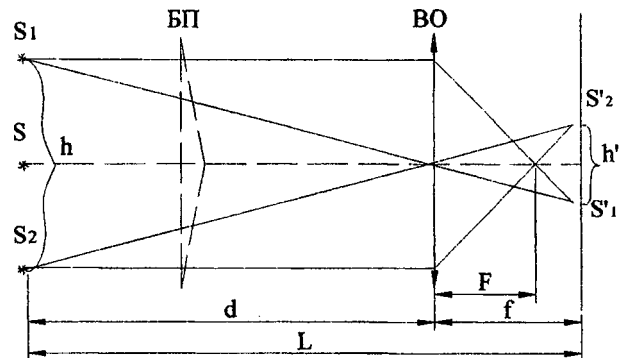


Рис.1.7

Ширина смуги світлопропускання $\Delta \lambda$ світлофільтра визначається за формулою (1.10) через візуально визначене загальне число N темних інтерференційних смуг, що спостерігаються. Попередньо розрахуємо за формулою (1.15) значення λ .

Порядок виконання роботи

1. Отримати у лаборанта набір світлофільтрів.
2. Ознайомитися з установкою та у відповідності до інструкції на робочому місці провести юстування (налагоджування) установки. Отримати максимально чітку інтерференційну картину. Продемонструвати зображення викладачеві.
3. Для кожного зі світлофільтрів виміряти відстань X_i між "нульовою" і n -ю темною смугою, як показано на рис. 1.3. Кожне вимірювання повторити тричі, значення X_i і n занести до таблиці 1.1.
4. Підрахувати загальне число N темних смуг, що спостерігаються у полі зору окуляра і занести до таблиці 1.1.
5. Установити допоміжний об'єктив та отримати чітке зображення двох щілин, що світяться. Вимірювання повторити тричі, результати занести до табл. 1.1
6. Виміряти відстані d між площинами щілини і допоміжного об'єктива та занести значення до таблиці 1.1.

Обробка результатів

1. За формулою (1.15) розрахувати довжину хвилі λ у максимумі пропускання кожного і світлофільтрів і занести результати до таблиці 1.1.
2. За формулою (1.10) оцінити ширину $\Delta\lambda$ смуги пропускання для кожного фільтра і занести результати до табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Світлофільтр	Червоний	Зелений
N		
$x_i, \text{ мм}$		
$x = \langle x_i \rangle, \text{ мм}$		
$h'_i, \text{ мм}$		
$h' = \langle h'_i \rangle, \text{ мм}$		
$F, \text{ мм}$		
$d, \text{ мм}$		
$\lambda, \text{ нм}$		
$\Delta\lambda, \text{ нм}$		

Контрольні запитання

1. Що називається інтерференцією світла? Виведіть формули (1.1) та (1.2).
2. Які хвилі називаються когерентними? Чому світлові хвилі, що випромінюються незалежними джерелами, некогерентні?
3. Поясніть принцип отримання когерентних світлових хвиль та наведіть конкретні приклади (окрім біпризми Френеля).
4. Чи обов'язково буде спостерігатись інтерференція під час накладання когерентних хвиль у випадку: а) звукових хвиль; б) світлових хвиль?
5. Що називається оптичною та геометричною різницею ходу променів (хвиль)?
6. Виведіть формулу (1.3). Запишіть вираз δ через довжину хвилі λ' світлової хвилі в однорідному середовищі.
7. Виведіть умову (1.4).
8. Виведіть формули (1.5) і (1.6). Чому заломлюючі кути біпризми повинні бути дуже малими?
9. * Взявши у досліді з біпризмою Френзеля $a = b = 0,5\text{ м}$ та роздільну здатність ока $\Delta\chi_0 = 0,2\text{ мм}$, оцініть максимально припустиме значення заломлюючого кута біпризми θ під час спостерігання інтерференції неозброєним оком та у проведеному у роботі досліді.
10. * Виведіть закон розподілення інтенсивності $I(x)$ на екрані у досліді з біпризмою залежно від відстані до центра картини.
11. * Як та чому впливає на інтерференційну картину неповна монохроматичність світла, що використовується? Виведіть співвідношення (1.7).
12. * Як та чому впливають на інтерференційну картину лінійні розміри джерела світла? Отримайте вираз для максимально припустимої ширини щілини b_{max} у досліді з біпризмою Френеля.

Література

1. І.М.Кучерук, І.Т.Горбачук. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.3. Оптика. Квантова фізика. -К.:Техніка, 1999 р.
1. Савельєв И .В. Курс общей физики. У 3 т. Т.2. § 110,119,120,121,122. -М.: Наука,1978.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. § 26 - 28, 30, 33. - М.: Наука, 1980.