

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра інформатики та програмної інженерії

Звіт

з лабораторної роботи № 3.11 з дисципліни
«Ігрова фізика»

„ ВИВЧЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА ”

Виконав(ла)

ПІ-15 Мешков Андрій Ігорович

(шифр, прізвище, ім'я, по батькові)

Перевірив

Скирта Юрій Борисович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Київ 2022

Лабораторна робота № 3.11

ВИВЧЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА

Теорія методу та опис експериментальної установки

Інтерференція хвиль — явище накладання двох або більше когерентних хвиль, в результаті чого в одних місцях спостерігається підсилення кінцевої хвилі (інтерференційний максимум), а в інших місцях послаблення (інтерференційний мінімум).

Результуюча інтенсивність:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle, \quad (1)$$

де $\langle \cos \delta \rangle$ — усереднене у часі значення косинуса різниці початкових фаз коливань, що збуджуються у точці накладання кожним джерелом.

Якщо розглянути випадок когерентних хвиль, а саме коли $I_1 = I_2$, то отримаємо:

$$I = 2I_1 + 2I_1 \cos \varphi_2 - \varphi_1 = 2I_1 (1 + \cos \varphi_2 - \varphi_1)$$

Згадавши формулу половинного кута для косинусу:

$$\cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (2)$$

Можемо записати результуючу інтенсивність:

$$I = 4I_1 \cos^2 \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \quad (3)$$

Різниця фаз δ двох когерентних хвиль від одного джерела:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (4)$$

Добуток геометричної довжини d шляху світлової хвилі на показник заломлення середовища n називається оптичною довжиною шляху L , а $\Delta = L_2 - L_1$ — різниця оптичних довжин пройдених хвилями шляхів, називається оптичною різницею ходу.

Якщо оптична різниця ходу дорівнює числу хвиль у вакуумі:

$$\Delta = \pm m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

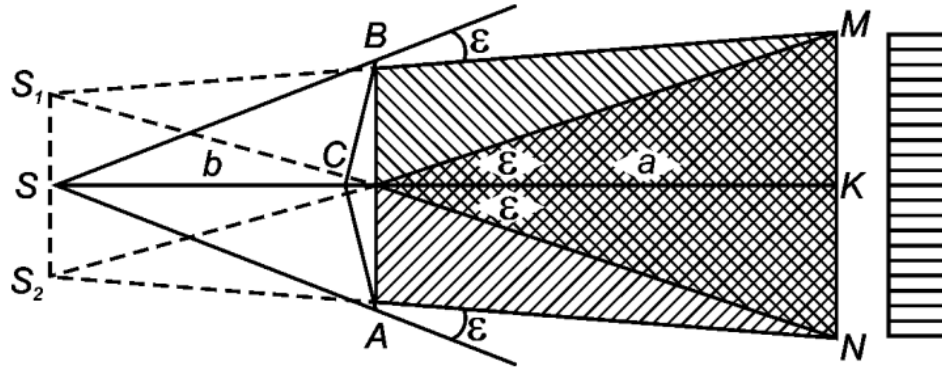
Тоді з формул (4) та (5) випливає, що $\delta = \pm 2m\pi$ і коливання, що збуджуються у точці M обома хвилями, знаходяться в однаковій фазі. Тому рівняння (10) — умова створення інтерференційного максимуму.

А якщо оптична різниця ходу:

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

Тоді з формул (4) та (6) випливає, що $\delta = \pm(2m + 1)\pi$ і коливання, що збуджуються у точці М обома хвилями, знаходяться у протифазі. Тому рівняння (6) – умова створення інтерференційного мінімуму.

Опис досліду з біпризмою Френеля.



Прилад складається з двох плоских дзеркал Z1 та Z2, розміщених під кутом одне до одного. Цей кут відрізняється від 180° всього на декілька кутових хвилин. При освітленні дзеркал від джерела S, відображені від дзеркал промені, можна розглядати як два когерентні джерела світла S1 та S2, які є віртуальними зображеннями S. В просторі, де промені перекриваються, виникає інтерференція. Якщо джерело S лінійне (щілина) та паралельне до ребра «пересікання» цих дзеркал, то при їхньому освітленні монохроматичним світлом, виникає інтерференційна картина у вигляді паралельних до щілини еквідистантних світлих та темних смуг. Цю картину можна спостерігати на екрані E, який може бути встановленим на будь-якій відстані в області перекриття світлових променів. За шириною інтерференційної смуги D можна визначити довжину хвилі світла. Досліди, проведені із дзеркалами Френеля стали одним із підтверджень хвильової природи світла.

Відстань від центра інтерференційної картини до m-го дифракційного максимуму визначається за формулою:

$$x_m = \frac{a + b}{c} m \lambda, \quad (7)$$

де a – відстань від біпризми до екрану, b – відстань від щілини до біпризми, c – відстань між уявними джерелами світла S_1S_2 , λ – довжина хвилі світла

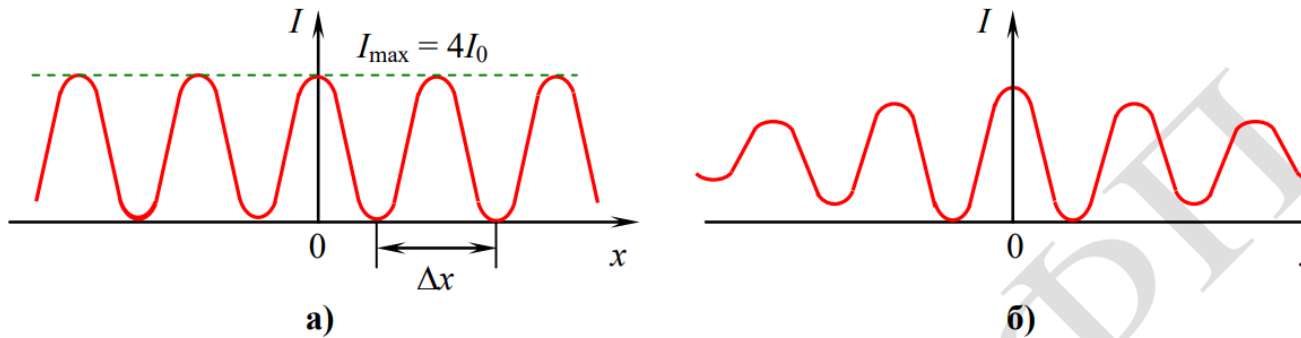
Логічно, що відстань від центра інтерференційної картини до m+1 інтерференційного максимуму буде:

$$x_{m+1} = \frac{a + b}{c} (m + 1) \lambda \quad (8)$$

Тоді з формул (7) та (8), відстань між сусідніми світлими (темними) інтерференційними смугами (інтерференційна ширина):

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{a + b}{c} \lambda \quad (9)$$

Наявність у реального джерела скінчених лінійних розмірів призводить до загального зниження контрастності інтерференційної картини, тобто до зменшення інтенсивності усіх максимумів і підвищення інтенсивності в усіх мінімумах. Тому при збільшенні лінійних розмірів джерела якість інтерференційної картини погіршується і при розмірах джерела порядку ширини смуги Δx інтерференційна картина зникає. Інша причина, що погіршує умови спостереження інтерференції, полягає у відсутності у природі повністю монохроматичних джерел світла – випромінювання завжди складається з хвиль у певному діапазоні $\Delta\lambda$.



Для реального джерела максимальний порядок k_{max} смуг, що спостерігаються, не перевищує значення:

$$k_{max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (10)$$

а загальна кількість смуг, які можна спостерігати на екрані:

$$N = 2k_{max} = \frac{2\lambda}{\Delta\lambda} \quad (11)$$

Якщо ми виразимо з формули (9) λ , то отримаємо:

$$\lambda = \frac{\Delta x c}{a + b} \quad (12)$$

Також виведемо $\Delta\lambda$ з формули (11):

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda}{N} \quad (13)$$

Експериментальна установка.

Збиральна властивість фокальної площини: будь-які паралельні між собою промені після проходження крізь лінзу перетинаються (самі або їхні продовження) в одній точці фокальної площини.

Положення предмета АВ та його зображення А'В' у лінзі (рис. 5) пов'язані формулою тонкої лінзи:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad (14)$$

де $d = AO$ – відстань від предмета до лінзи; $f = OA'$ – відстань від лінзи до зображення; $F = OF$ – фокусна відстань лінзи.

Величини d , f , F розглядаються як алгебраїчні відповідно до правила знаків: відстані між центром лінзи і дійсними точками беруть із знаком "+", а відстані між центром лінзи і уявними точками беруть із знаком "-".

Відношення розміру зображення $H = A'B'$ до розміру предмета $h = AB$: $\Gamma = H/h$ називається поперечним збільшенням. Воно визначається формулою:

$$\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{H}{h} \quad (15)$$

Визначивши відстань f з формули лінзи (19), одержимо ще один вираз для збільшення:

$$\Gamma = \frac{F}{d - F} \quad (16)$$

Також з співвідношень (19) та (20), маємо:

$$\frac{h}{L} = \frac{(d - F)^2}{d^2 F} H \quad (17)$$

$$\Delta x = \frac{x}{n} \quad (18)$$

Якщо ми підставимо отриманий вираз (18) та (17) у формулу (12), де $c = h$, $a + b = L$, то отримаємо формулу для визначення довжини світлової хвилі:

$$\lambda = \frac{xH(d - F)^2}{nd^2 F} \quad (19)$$

Порядок виконання роботи

$n = 10$

Світлофільтр	Червоний	Зелений	Синій
N	16	11	13
x, мм	2,47	1,93	1,81
	2,3	1,92	1,79
	2,32	2,02	1,74
$\langle X \rangle$, мм	2,363	1,957	1,780
h, мм	0,6	0,64	0,62
	0,62	0,61	0,62
	0,58	0,63	0,63
$\langle h \rangle$, мм	0,600	0,627	0,623
F, мм	145	145	145
d, мм	747,82	747,82	747,82
λ , нм	635,462	549,499	497,226
dl, нм	79,433	99,909	76,496

Середнє значення для x та h ми обраховували за формулою:

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (20)$$

Значення λ обрахували за формулою (19), а $\Delta\lambda$ – за формулою (13).

Для оцінки відхилення вибіркового середнього $\langle x \rangle$ від істинного значення вимірюваної величини, вводиться середня квадратична похибка середнього $S_{\langle x \rangle}$, яка обчислюється за формулою:

$$S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2} \quad (21)$$

У нашому випадку вимірів було по 3, тому $n = 3$.

Позначимо через β_1 і β_2 інтервал значень, до якого із заданою ймовірністю довіри α потрапляє вимірювана величина x .

$$\beta_1 = \langle x \rangle - \Delta x_{\text{випадкове}}, \quad (22)$$

$$\beta_2 = \langle x \rangle + \Delta x_{\text{випадкове}}, \quad (23)$$

де $\Delta x_{\text{випадкове}}$ – напівширина інтервалу довіри, що визначається за формулою:

$$\Delta x_{\text{випадкове}} = t_{\alpha,n} \cdot S_{\langle x \rangle}, \quad (24)$$

де $t_{\alpha,n}$ – коефіцієнт Стюдента, який залежить від ймовірності довіри α та числа вимірів n . По умові $\alpha = 0,9$.

Використавши дані у формулах (22) – (24), можемо записати:

$$\langle x \rangle - t_{\alpha,n} \cdot S_{\langle x \rangle} \leq x \leq \langle x \rangle + t_{\alpha,n} \cdot S_{\langle x \rangle} \quad (25)$$

або з ймовірністю α :

$$x = \langle x \rangle \pm t_{\alpha,n} \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2} \quad (26)$$

За допомогою формули (26) знайдемо ширину інтервалу, в якому шукана величина x буде знаходитись з ймовірністю 90%. Приймаючи до уваги, що коефіцієнт Стюдента $t_{\alpha,n} = t_{0,9;3} = 2,92$.

Беручи значення з попередньої таблиці, та використовуючи формули (21), (24) та (26), обрахуємо значення похибки.

Світлофільтр	Червоний	Зелений	Синій
$t_{0,9;3}$	2,92		
$(x_i - \langle x \rangle)^2, \text{мм}^2$	0,011378	0,000711	0,000900
	0,004011	0,001344	0,000100
	0,001878	0,004011	0,001600
$S_{\langle x \rangle}, \text{мм}$	0,054	0,032	0,021
$\Delta x, \text{мм}$	0,15768	0,09344	0,06132
$(H_i - \langle H \rangle)^2, \text{мм}^2$	0	0,0001778	0,0000111
	0,0004000	0,0002778	0,0000111
	0,0004000	0,0000111	0,0000444
$S_{\langle H \rangle}, \text{мм}$	0,0115	0,0088	0,0033
$\Delta H, \text{мм}$	0,03358	0,0257	0,0096

Похибка для x , мм	$2,363 \pm 0,15768$	$1,957 \pm 0,09344$	$1,780 \pm 0,06132$
Похибка для H , мм	$0,600 \pm 0,03358$	$0,627 \pm 0,0257$	$0,623 \pm 0,0096$

Контрольні запитання

1. Що називається інтерференцією світла? Виведіть формули (1.1) та (1.2).

Розглянемо умови утворення максимуму і мінімуму інтерференції світла.

Нехай дві когерентні монохроматичні світлові хвилі накладаються одна на одну в деякій точці простору. Перша хвиля викличе в цій точці гармонічні коливання:

$$E_1 = E_{01} \cos \omega t + \varphi_1$$

Тоді друга:

$$E_2 = E_{02} \cos \omega t + \varphi_2$$

Ми можемо скласти рівняння (1) та (2), оскільки це коливання однакового періоду, що відбуваються в однаковому напрямку, то результуюче коливання буде також гармонічним коливанням, яке здійснюється з тим самим періодом і в тому самому напрямку, тобто

$$E = E_0 \cos \omega t + \varphi$$

Варто зазначити, що амплітуда цього коливання описується по формулі:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \varphi_2 - \varphi_1$$

Так як хвилі когерентні, то $\cos \varphi_2 - \varphi_1$ має постійне, але своє для кожної точки простору, значення в часі, тому інтенсивність I результуючої хвилі визначається квадратом амплітуди $I = E_0^2$:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi_2 - \varphi_1$$

2. Які хвилі називаються когерентними? Чому світлові хвилі, що випромінюються незалежними джерелами, некогерентні?

Необхідною умовою інтерференції хвиль є їх когерентність (узгодженість у часі). Когерентними називаються джерела, що випромінюють хвилі однакової частоти зі стабільною різницею фаз і площинами коливань світлового вектора E , що збігаються (остання вимога не є істотною при інтерференції природного світла).

Природні джерела світла не є когерентними. Їх випромінювання є накладенням величезної кількості не узгоджених між собою хвильових пакетів (цугів хвиль) окремих атомів. Для спостереження інтерференції від таких джерел, необхідно світло від одного і того ж самого джерела розділити на два пучки (або на кілька пучків), а потім звести ці пучки разом. Якщо розглянути випадок когерентних хвиль, а саме коли $I_1 = I_2$, то отримаємо $I = 4I_1 \cos^2 \varphi_2 - \varphi_1 / 2$

3. Поясніть принцип отримання когерентних світлових хвиль та наведіть конкретні приклади (окрім біпризми Френеля).

Різниця фаз δ двох когерентних хвиль від одного джерела:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

Добуток геометричної довжини d шляху світлової хвилі на показник заломлення середовища n називається оптичною довжиною шляху L , а

$$\Delta = L_2 - L_1 = n_2 r_2 - n_1 r_1,$$

це різниця оптичних довжин пройдених хвилями шляхів, називається оптичною різницею ходу.

Геометрична різниця ходу променів – це різниця геометричних шляхів променів в середовищі з $n = 1$ (вакуумі). Якщо геометричну різницю ходу позначити через Δ , геометричну довжину шляхів променів позначити через r_1 і r_2 , то геометрична різниця ходу виразиться так:

$$\Delta = r_2 - r_1$$

7. Виведіть умову (1.4).

Приймаючи до уваги відповідь на попереднє запитання, якщо оптична різниця ходу дорівнює числу хвиль у вакуумі:

$$\Delta = \pm m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Тоді з попередніх формул випливає, що $\delta = \pm 2m\pi$ і коливання, що збуджуються у точці М обома хвилями, знаходяться в однаковій фазі. Тому рівняння (10) – умова створення інтерференційного максимуму.

А якщо оптична різниця ходу:

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Тоді з попередніх формул випливає, що $\delta = \pm 2m\pi$ і коливання, що збуджуються у точці М обома хвилями, знаходяться) випливає, що $\delta = \pm (2m + 1)\pi$ і коливання, що збуджуються у точці М обома хвилями, знаходяться у протифазі. Тому рівняння (11) – умова створення інтерференційного мінімуму.

Інтерференційна картина являє собою послідовність світлих і темних інтерференційних смуг – максимумів і мінімумів.

8. Виведіть формули (1.5) і (1.6). Чому заломлюючі кути біпризми повинні бути дуже малими?

Біпризма Френеля складається з двох склеєних основами призм з малими заломлюючими кутами. Світловий пучок від джерела (щілина діафрагми S) (рис. 2) після заломлення у біпризмі поділяється на два когерентних пучки з вершинами в уявних зображеннях S_1 і S_2 . Оскільки джерела когерентні, у будь-якій точці області перекриття пучків буде спостерігатись інтерференційна картина.

На екрані MN, розташованому на відстані $CK = a$ від біпризми, можна спостерігати інтерференційну картину, яка має вигляд тонких світлих і темних смуг, що чергуються, колір яких залежить від довжини хвилі, яку пропускає світлофільтр. Оскільки інтерференційні смуги дуже вузькі і розташовані дуже близько одна до одної, то для їх спостереження зазвичай використовують окулярний мікроскоп.

Відстань від центра інтерференційної картини до m-го дифракційного максимуму визначається за формулою:

$$x_m = \frac{a + b}{c} m\lambda,$$

де a – відстань від біпризми до екрану, b – відстань від щілини до біпризми, c – відстань між уявними джерелами світла S_1S_2 , λ – довжина хвилі світла

Логічно, що відстань від центра інтерференційної картини до m+1 інтерференційного максимуму буде:

$$x_{m+1} = \frac{a + b}{c} (m + 1)\lambda$$

Тоді з формул (12) та (13), відстань між сусідніми світлими (темними) інтерференційними смугами (інтерференційна ширина):

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{a + b}{c} \lambda$$

Наявність у реального джерела скінчених лінійних розмірів призводить до загального зниження контрастності інтерференційної картини, тобто до зменшення інтенсивності усіх максимумів і підвищення інтенсивності в усіх мінімумах. Тому при збільшенні лінійних розмірів джерела якість інтерференційної картини погіршується і при розмірах джерела порядку ширини смуги Δx інтерференційна картина зникає.

Висновок: під час виконання лабораторної роботи, ми більше дізналися про інтерференцію, когерентні та некогерентні хвилі, та їх природу, їх різновиди. Розглянули умови утворення максимуму і мінімуму інтерференції світла. Вивели рівняння інтенсивності результуючої хвилі та різниць ходу. Вивчили навіщо потрібна біпризма Френеля та визначили формули для роботи з нею. Повторили властивості збиральної лінзи та розраховували довжини хвиль. Визначили для них похибку.