

РОБОТА 5.3. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА

Мета роботи: вивчити закономірності явища інтерференції світла; визначити довжину світлової хвилі, вимірюючи діаметри кілець Ньютона.

Прилади та обладнання: пристрій для одержання кілець Ньютона, вимірвальний мікроскоп, джерело монохроматичного світла.

Кільця Ньютона

Якщо на скляну пластинку покласти збирну лінзу (рис. 1, а), то у відбитому світлі спостерігаються концентричні кільця (кільця Ньютона), що оточують темну пляму з центром у точці дотику лінзи і пластинки (рис. 1, б). При використанні монохроматичного світла спостерігаються лише темні і світлі кільця, якщо ж світло біле – кільця різнобарвні. Кільця Ньютона утворюються внаслідок інтерференції світлових хвиль, відбитих від верхньої і нижньої границь повітряного прошарку між лінзою і скляною пластинкою. В даній роботі для їх отримання використовують плоскоопуклу лінзу з великим радіусом кривизни R . Світло від лампи розжарення проходить через світлофільтр Φ (рис. 2) і, відбиваючись від напівпрозорої пластинки Π , освітлює плоску поверхню лінзи. Інтерференційну картину (кільця Ньютона) у відбитому світлі спостерігають у мікроскопі (на рис. 2 “Об” – об’єктив мікроскопа).

Утворення кілець Ньютона пояснюється на рис. 1, а і рис. 3. Промені, відбиті від верхньої і нижньої границь повітряного прошарку – наприклад, промені 2 і 3, що виникають при відбиванні променя 1 від точок a і b – є когерентними, оскільки мають спільне походження: вони виникли з **одного і того ж** променя 1. Тому при накладанні у точці їх зустрічі (точка P на рис. 3 або точка a на рис. 1, а), розташованої поблизу опуклої поверхні лінзи, промені 2 і 3 інтерферують. При великому радіусі R кривизни лінзи промені 1, 2 і 3 поширюються практично вздовж однієї прямої, як це зображено на рис. 1, а. Геометрична різниця ходу променів 2 і 3 дорівнює $2h$, де $h = ab$ – товщина повітряного прошарку в місці падіння променя 1.

Інтерференційний ефект, що спостерігається у точці a , залежить від того, скільки довжин хвиль λ укладається на відстані $2h$. Геометричним місцем точок, що відповідають однакої товщині h повітряного прошарку, є коло. Тому в даному досліді лінії однакої інтенсивності світла – інтерференційні смуги – мають вигляд концентричних кілець.

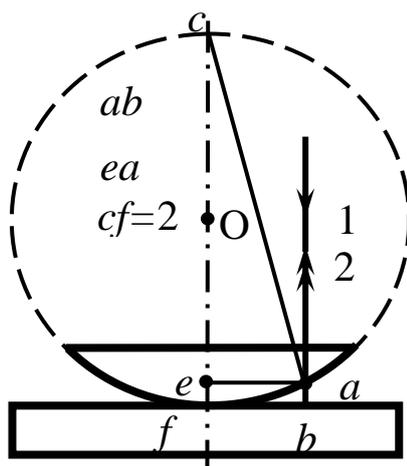
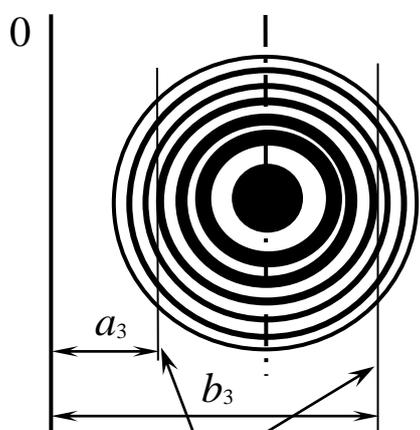


Рис. 1а



Положення візирної
нитки при вимірах

Рис. 1б

Як показують теорія і досвід, при відбитті від середовища з більшою оптичною густиною (тобто з більшим показником заломлення, в нашому випадку – від скла) фаза коливань електричного вектора світлової хвилі змінюється стрибком на π ; це рівнозначно додатково пройденій відстані $\lambda/2$. Таке явище називають “втратою півхвилі”. Внаслідок “втрати півхвилі” промені 2 і 3 при виконанні умови $2h = k\lambda$ мають протилежні фази і при накладанні гасять один одного. З врахуванням “втрати півхвилі” умови максимумів і мінімумів при інтерференції променів 2 і 3 мають наступний вигляд:

умова максимумів –

$$2h = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots; \quad (1)$$

умова мінімумів –

$$2h = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

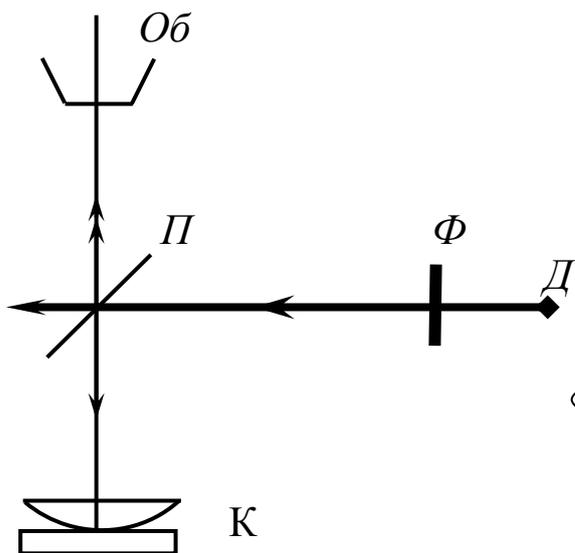


Рис. 2

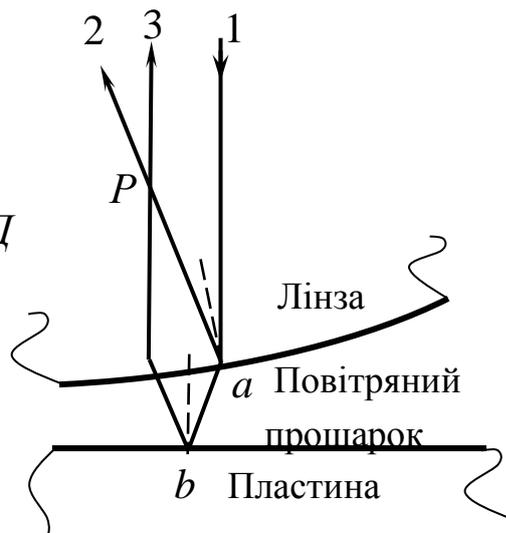


Рис. 3

У місці щільного дотикання лінзи і скляної пластинки товщина h повітряного прошарку є набагато меншою довжини хвилі світла, тобто $h \ll \lambda$. Тут результат інтерференції визначається фактично лише “втратою півхвилі”, тому центральна пляма завжди темна.

Радіус r інтерференційного кільця можна визначити із подібності трикутників aef і ace (рис. 1, а). Якщо ввести позначення $ef = ab = h$, $ae = r$ і $cf = 2R$, то

$$\frac{h}{r} = \frac{r}{2R - h};$$

отже,

$$r^2 = (2R - h) \cdot h. \quad (3)$$

Підставляючи у формулу (3) значення h , яке відповідає умові максимумів (1), і беручи до уваги, що $2R \gg h$, одержимо співвідношення для визначення радіусів $r_k = r_k^{\max}$ світлих кілець:

$$(r_k^{\max})^2 = \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \cdot R, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Аналогічно, використовуючи умову мінімумів (2), одержуємо співвідношення для визначення радіусів $r_k = r_k^{\min}$ темних кілець:

$$(r_k^{\min})^2 = k\lambda R, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Тут $k = 0$ відповідає центральній темній плямі.

Відповідно для діаметрів $d_k^{\max} = 2r_k^{\max}$ і $d_k^{\min} = 2r_k^{\min}$ світлих і темних кілець знаходимо:

$$(d_k^{\max})^2 = 4(k - \frac{1}{2}) \cdot \lambda \cdot R, \quad (4a)$$

$$(d_k^{\min})^2 = 4k \cdot \lambda \cdot R. \quad (5a)$$

У даній роботі при обробці експериментальних даних використовують графічний метод. Згідно з формулами (4a) і (5a) квадрат діаметра інтерференційного кільця (як темного, так і світлого) лінійно залежить від номера кільця k . При цьому коефіцієнт пропорційності A (кутовий коефіцієнт) обох залежностей визначається за формулою:

$$A = 4\lambda \cdot R. \quad (6)$$

Вимірявши діаметри кілець, будують графік залежності $(d_k^{\max})^2$ або $(d_k^{\min})^2$ від k , який має бути прямою лінією.

Визначене за цим графіком значення A підставляють у формулу (6) і знаходять довжину світлової хвилі λ :

$$\lambda = \frac{A}{4R} \quad (7)$$

Згідно з формулою (4) радіус k -го світлого кільця залежить від довжини світлової хвилі:

$$r_k^{\max} \sim \sqrt{\lambda}.$$

Тому при одному і тому ж k різним довжинам хвиль, тобто різним кольорам, відповідають кільця різних радіусів. Цим і пояснюється те, що інтерференційні кільця, утворені при використанні білого світла, є різнобарвними.

Порядок виконання роботи

1. Готують таблицю для запису результатів вимірювань.

$x \equiv k$	a_k , мм	b_k , мм	$d_k^{\min} = b_k - a_k$, мм	$y = (d_k^{\min})^2$, мм ²
	С =	С =	-	-
—				
7				
6				
5				
4				
3				
2				
1				

2. Вмикають джерело світла. Переміщують предметний столик до появи в полі зору мікроскопа інтерференційних кілець. Обертаючи окуляр мікроскопа, добиваються чіткого зображення кілець.

3. Заносять до таблиці ціну поділки шкали барабана вимірювальної каретки мікроскопа, $C = 0,01$ мм.

4. Обертають барабан вимірювальної каретки і наводять візирну нитку окуляра на середину лівого краю 7-го або 6-го темного інтерференційного кільця. Записують до таблиці номер k цього кільця і значення a_k на шкалі барабана, що відповідає даному положенню візирної нитки.

5. Пересуваючи вимірювальну каретку до темної плями, послідовно виконують вимірювання a_k для решти кілець по перше кільце включно.

6. Продовжують пересувати вимірювальну каретку в тому ж напрямку, наводять візирну нитку на середину правого краю першого, потім другого і наступних темних кілець (аж до 7-го кільця включно) і заносять до таблиці відповідні значення b_k . Рис. 1, б ілюструє зняття вимірів a_k і b_k для третього ($k = 3$) темного кільця.

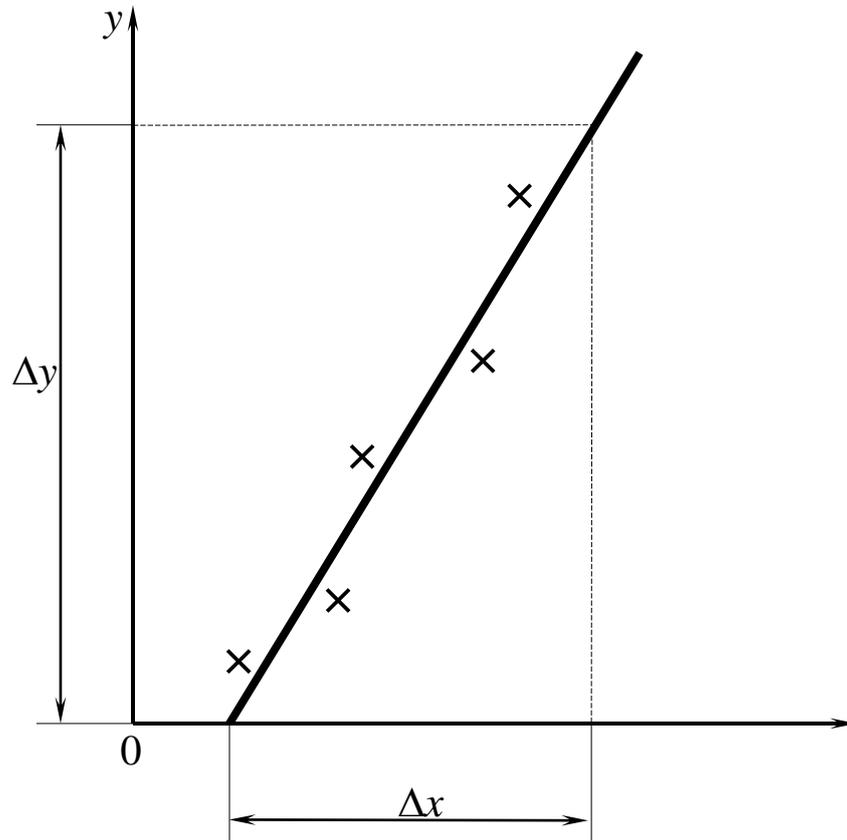


Рис. 4

7. Обчислюють діаметри $d_k^{\min} = b_k - a_k$ темних кілець, їх квадрати $(d_k^{\min})^2$ і результати заносять до таблиці.

8. Будують графік функції $y = Ax$, де $y = (d_k^{\min})^2$, $x = k$ (рис. 4).

Пряму лінію проводять так, щоб з обох боків від неї було приблизно однакове число експериментальних точок. Визначають кутовий коефіцієнт A за формулою:

$$A = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

9. Визначають довжину хвилі $\langle \lambda \rangle$ за формулою (7) (значення R вказано на лінзі) і виражають її в метрах і у нанометрах.

10. Визначають відносну систематичну похибку вимірювання довжини хвилі за формулою:

$$\varepsilon_\lambda = 4 \frac{C}{d} + \frac{\Delta R}{R}$$

(при цьому враховують, що $C = 0,01$ мм, $\Delta R = 5$ мм) і довірчу границю систематичних похибок за формулою:

$$\Delta_\lambda = \langle \lambda \rangle \cdot \varepsilon_\lambda;$$

записують результат вимірювання довжини хвилі у стандартній формі.

Запитання і вправи для самоконтролю

1. Запишіть рівняння хвилі і поясніть зміст позначень; підкресліть фазу хвилі.
2. Як зв'язані між собою різниця фаз і різниця ходу хвиль?
3. Які хвилі називаються когерентними?
4. У чому суть явища інтерференції хвиль?
5. Сформулюйте умови максимумів і мінімумів при інтерференції.
6. Поясніть, чому випромінювання двох незалежних джерел світла не дає інтерференційної картини.
7. Поясніть, у чому полягає загальний принцип отримання когерентних джерел світла, і наведіть приклади інтерференційних схем.
8. Поясніть механізм утворення кілець Ньютона і наведіть інші приклади інтерференційних смуг рівної товщини.