МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА НА ПРИКЛАДІ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Інструкція до лабораторної роботи

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність», «Електричні машини і апарати»
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Укладачі: Г.В. Самар, Е.В. Лук’яненко

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Котовський В. Й.*, д-р.техн. наук, проф.,
завідувач кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря

Відповідальний редактор *Решетняк С.О., д-р фіз.-мат. наук, професор*

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 23.02.2023 р.)
за поданням Вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № 2 від 15.02.2023 р.)

У лабораторному практикумі представлені теоретичні відомості з теми «Інтерференція в тонких плівках», опис лабораторної роботи «Вивчення інтерференції на прикладі кілець Ньютона», наведені методичні вказівки до виконання до цієї лабораторної роботи, запропоновано контрольні питання для самостійної роботи.

Посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра, які навчаються у закладах вищої освіти і вивчають нормативну навчальну дисципліну «загальна фізика» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Буде також корисним і для студентів інших технічних спеціальностей вищих навчальних закладів, а також для науково-педагогічних працівників, які викладають курс фізики, під час планування та підготовки завдань до лабораторних робіт.

Реєстр. № НП 22/23-488. Обсяг 0,7 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
https://kpi.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

Лабораторна робота 3-2

ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА НА ПРИКЛАДІ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА

Мета роботи: вивчення явища виникнення інтерференційних смуг рівної ширини на прикладі кілець Ньютона та освоєння методики визначення радіуса кривизни сферичної поверхні прозорого тіла.

Завдання:

1. Дослідити явище виникнення інтерференційних кілець Ньютона.

2. Освоїти методику визначення радіуса кривизни лінзи, ширини спектрального інтервалу та визначити похибки методу та вимірювань

3. Отримати картину кілець Ньютона. Визначити радіус кривизни лінзи по розмірах кілець Ньютона при освітлені світлом з відомою довжиною хвилі λ. Оцінити похибку.

4. Визначити максимально можливу кількість темних смуг, які мають спостерігатися при монохроматичному освітленні, що пропускається досліджуваним світлофільтром. Оцінити похибку, враховуючи похибку у визначенні радіуса кривизни лінзи.

5. Визначити ширину смуги пропускання досліджуваного світлофільтра.

Обладнання й матеріали: мікроскоп, лінза, чорне скло, світлофільтри.

Теоретичні відомості

Інтерференцією світла називають явище перерозподілу енергії світлових хвиль у просторі внаслідок їх накладання. Досліджувати такий перерозподіл можна шляхом спостереження за освітленістю в певній точці простору[1].

Необхідною умовою існування інтерференції є когерентність хвиль, які накладаються. **Когерентністю** у широкому значенні називають узгоджене проходження хвильових або коливальних процесів[2]. Тому ***когерентними*** вважаються ті хвилі, які мають однакові частоти та незмінну різницю фаз $\delta\varphi$.

Через особливості процесу випромінювання світлових хвиль речовиною світло від переважної більшості джерел не є когерентним. Тому для отримання

когерентних світлових променів одну й ту саму хвилю можна поділити на дві складові, що розповсюджуватимуться в близьких напрямках та перекриватимуться (див. рисунок 1а)[3]. За таких умов різниця фаз буде визначатися різницею ($\tau_2 - \tau_1$) часів долання кожною з хвиль свого шляху.

З рисунка 1а видно, що ці часові проміжки будуть визначатися не лише шляхами s_1 та s_2, а й швидкостями $\upsilon_1 = c/n_1$, та $\upsilon_2 = c/n_2$. Тут c – швидкість світла у вакуумі, а n_1 та n_2 – показники заломлення середовищ, через які проходитимуть відповідно перша й друга частини розділеної світлової хвилі. Тоді різниця фаз двох хвиль можна розрахувати як:

$$\delta\varphi = \omega(\tau_2 - \tau_1) = \omega\left(\frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1}\right) = \frac{\omega}{c}(s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{\omega}{c}\Delta \qquad (1)$$

де $\Delta = s_2 n_2 - s_1 n_1$ називають ***оптичною різницею*** ходу, ω – циклічна частота хвилі.

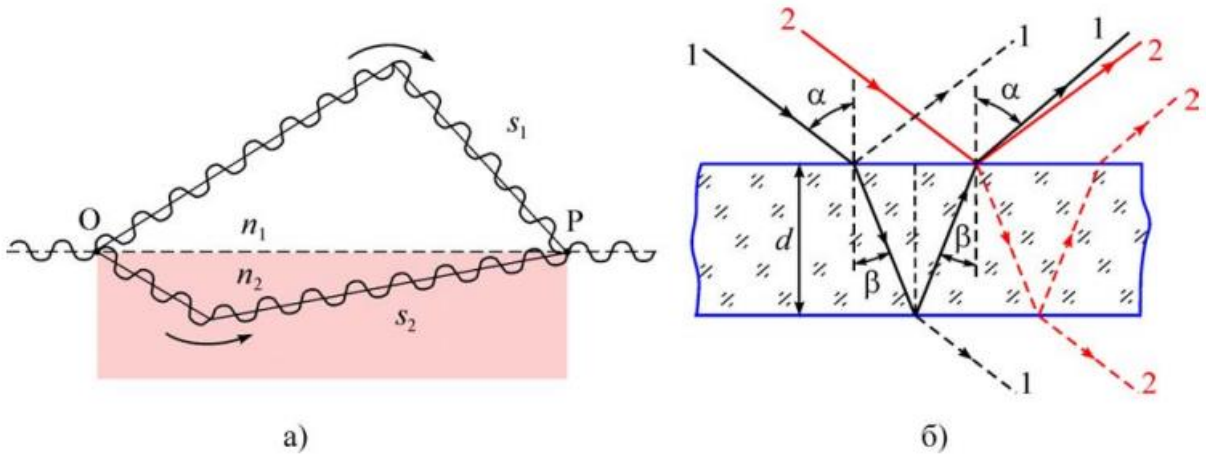


Рис.1

Очевидно, що енергія світлової хвилі досягатиме максимального значення за умови, що різниця фаз δ визначатиметься як ±2πm, m = (0, 1, 2, ...). В цьому випадку обидві хвилі прийдуть в точку P в одній фазі.

Із співвідношення (1) отримаємо умову інтерференційного максимума:

$$\Delta_{max} = \pm m\frac{c}{v} = \pm m\lambda_0, \qquad (2)$$

де ν – частота хвилі; λ_0 – довжина хвилі у вакуумі.

Умова мінімуму інтерференції аналогічним чином запишеться як

$$\Delta_{max} = \pm\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_0 \qquad (3)$$

Один зі способів розділення однієї хвилі на дві частини – часткове відбиття

та заломлення під час падіння світлового променя на тонку прозору пластинку (плівку) з паралельними чи майже паралельними заломлюючими гранями(див. рисунок 1б).

В результаті заломлення та часткового відбиття від верхньої та нижньої граней з кожної падаючої на плівку хвилі формується два когерентних промені 1 та 2. Промені мають практично однакову інтенсивність, що дає можливість спостерігати чітку інтерференційну картину у відбитому світлі (на рисунку 1б 1 і 2 для наочності розділені).

Оптична різниця ходу дорівнюватиме

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - sin^2\alpha} + \frac{\lambda_0}{2} \qquad (4)$$

де d – товщина плівки; α – кут падіння; n – показник заломлення плівки, а доданок $\lambda_0/2$ в формулі (4) виникає за рахунок того, що під час відбивання від середовища з більшим показником заломлення фаза хвилі змінюється на π.

Розрізняють два випадки інтерференції в тонких плівках при освітленні монохроматичним світлом:

1) Світло падає під різними кутами на плоскопаралельну пластинку (плівку). В цьому випадку d=const і результат залежить лише від кута падіння. Такі інтерференційні смуги називають смуги рівного нахилу.
2) Паралельний промінь падає на клиновидну пластинку. В цьому випадку різниця ходу залежить від товщини клина в місці падіння променів. Інтерференційна картина в цьому випадку утворює сукупність темних на світлих смуг, які називають смугами рівної товщини, оскільки кожна смуга відповідає одній і тій же товщині клина.

Отже, залежно від кута падіння α або товщини плівки d для хвилі певної довжини λ_0 буде виконуватись умова максимуму або мінімуму інтерференції.

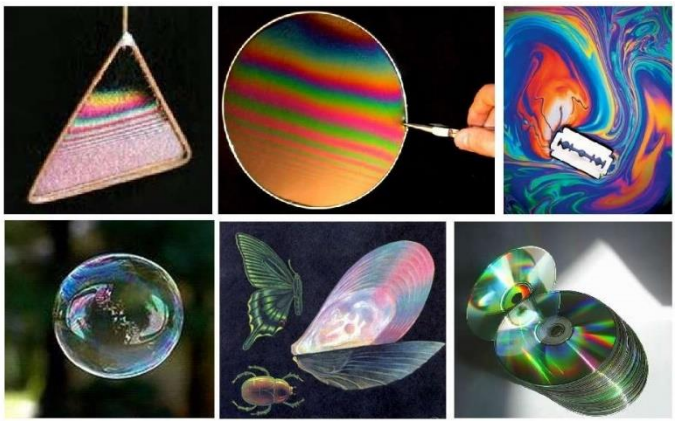


Рис.2

Саме цим і пояснюється різнокольорове забарвлення плям нафтопродуктів на воді, на поверхнях мильної бульбашки, CD-диска чи крилах метелика (Рис.2).

Важливою умовою спостереження інтерференції є мала товщина плівки. Така вимога пов'язана з особливістю випромінювання природного світла, яке являє собою набір хвильових імпульсів – так званих цугів, у межах довжини яких зберігаються монохроматичність та сталість різниці фаз. Якщо оптична різниця ходу Δ перевищить довжину цугу, то порушиться умова когерентності, й інтерференція спостерігатися не буде.

Прикладом інтерференції світла в тонких плівках є кільця Ньютона, які виникають при інтерференції променів, що відбиваються від різних граней повітряного клина утвореного сферичною поверхнею плоско-опуклої скляної лінзи та поверхнею плоско-паралельної пластинки. На рисунку 3а) зображено

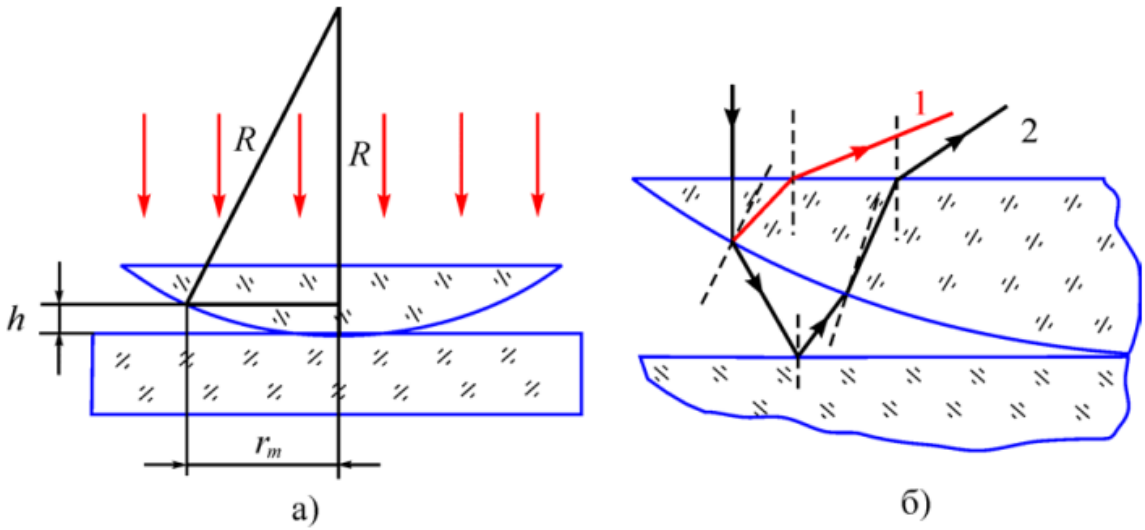


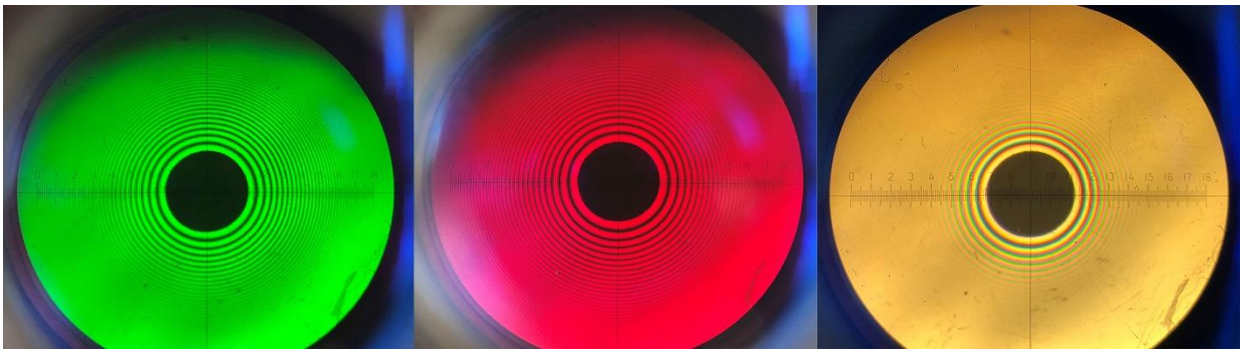
Рис.3

оптичну систему для спостереження кілець Ньютона, на рисунку 3б) - детальне зображення ходу світлових хвиль у такій системі.

Під час освітлення такої системи променем світла, паралельним до її осі

симетрії, виникає інтерференційна картина у вигляді концентричних кілець, яка отримала назву кілець Ньютона.

Якщо світло монохроматичне, то можна спостерігати лише світлі та темні кільця (Рис. 4 а та б), в той час як освітлення білим світлом зумовить різнобарвну інтерференційну картину (Рис. 4 в)



а ***б*** ***в***

Рис. 4.

У відбитому світлі оптична різниця ходу променів**,** за умови, що кут падіння $i = 0$, а показник заломлення повітря $n = 1$, дорівнює :

$$\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2} \qquad (5)$$

де λ – довжина хвилі монохроматичного світла (в повітрі), яким освітлюється установка; h – товщина повітряного зазору в даному місці.

Додаток $\lambda/2$ в правій частині формули (5) враховує зміну фази коливань на π при відбиванні променя в точці відбивання від середовища з більшим показником заломлення. З рис. 3:

$$R^2 = (R-h)^2 + r_k^2 = R^2 - 2Rh + bh^2 + r_k^2 \qquad (6)$$

де R – радіус кривизни лінзи; r_k – радіус кола, всім точкам якого відповідає однаковий повітряний зазор (радіус k-го кільця Ньютона).

Знехтувавши малим значенням $\boldsymbol{b^2}$, із формули (6) знаходимо:

$$2h = \frac{r_k^2}{R} \qquad (7)$$

Підставивши (7) в формулу (5), знаходимо вираз для оптичної різниці ходу:

$$\Delta = \frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2} \qquad (8)$$

При інтерференції темні кільця (мінімуми при інтерференції) виникатимуть за умови:

$$\Delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad (9)$$

де $k = 1,\ 2,\ 3, \ldots$

Порівнявши праві частини формул (8) і (9), знаходимо радіуси темних кілець Ньютона:

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} \qquad (10)$$

З цієї формули видно, що в центрі спостерігається темна пляма (нульове кільце), а також відбувається зменшення відстані між кільцями при збільшенні k (див. Рис.4). При достатньо великому значенні номера світлі та темні кільця зливаються і інтерференційна картина зникає. Кількість смуг, які можна спостерігати, збільшується при збільшенні радіуса кривизни лінзи. Іншою причиною, що обмежує кількість смуг, є неповна монохроматичність використаного світла, через що максимальний порядок (номер) смуги не перевищує значення

$$k_{max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \qquad (11)$$

де $\Delta\lambda$ – інтервал довжин хвиль і промені, що опромінює лінзу.

Вимірювання радіусів r_k інтерференційних кілець при освітленні лінзи світлом з відомою довжиною хвилі λ дозволяє визначити радіус кривизни сферичної поверхні досліджуваної лінзи за формулою (10).

Точність такого обчислення можна підвищити, якщо виміряти радіуси декількох кілець r_k та побудувати графік залежності ${r_k}^2$ від k (Рис. 5). В цьому випадку радіус кривизни лінзи можна визначити за формулою:

$$R = \frac{K_\alpha}{\lambda}, \qquad (12)$$

де α – кутовий коефіцієнт графіка

$$K_\alpha = \frac{\Delta({r_k}^2)}{\Delta k}.$$

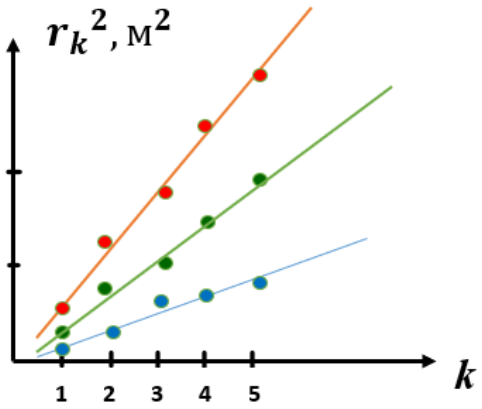


Рис. 5

Опис експериментальної установки

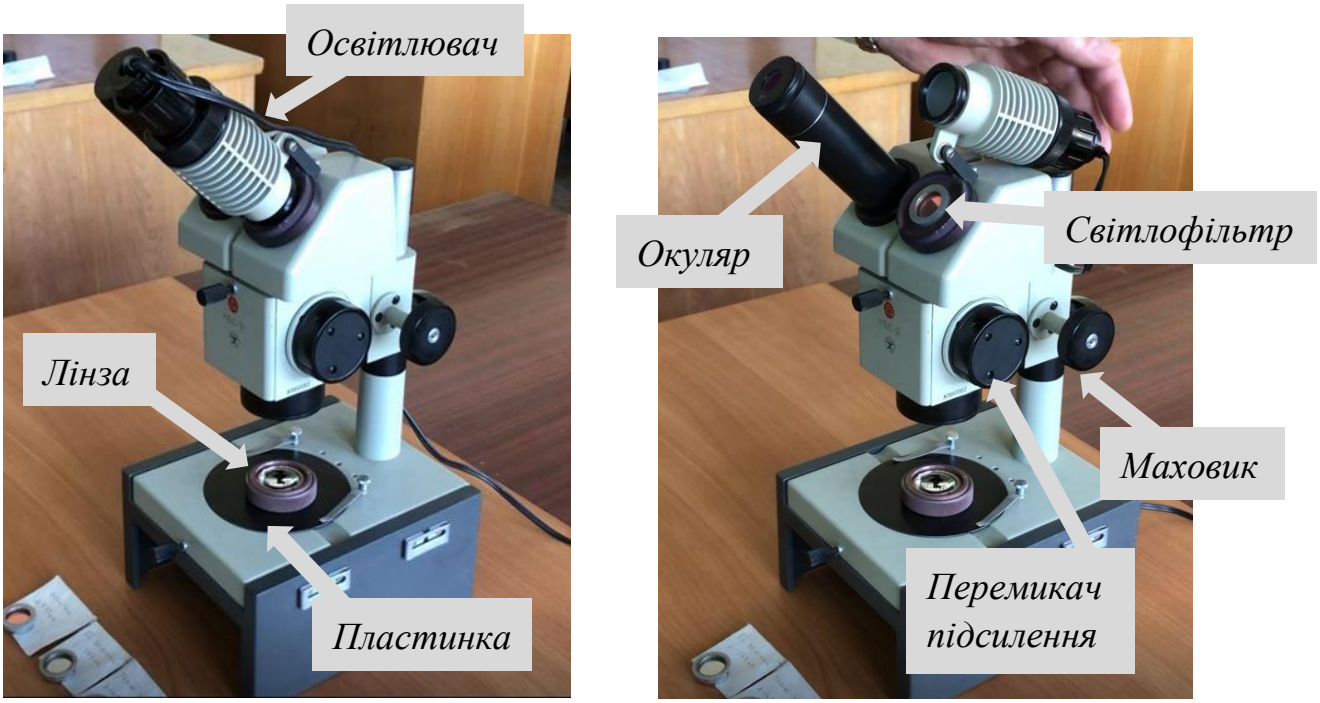


Рис. 6

Спостереження кілець Ньютона й вимірювання їхніх радіусів проводиться за допомогою бінокулярного стереоскопічного мікроскопа МБС-9 (рис. 6). Одна з бінокулярних трубок мікроскопа замінена насадкою із ламповим освітлювачем. Спостереження кілець Ньютона ведеться у відбитому світлі.

Оптичну схему експерименту показано на рис. 7. Промінь світла від освітлювача проходить через світлофільтр і направляється на прозору скляну пластинку *П1*, встановлену під кутом 45^0 до напрямку променів. Відбиті від поверхні пластинки *П1* промені падають перпендикулярно на поверхню досліджуваної лінзи з плоско-паралельною пластиною, що розміщена на предметному столику мікроскопа. Відбиті промені через систему оптичних елементів попадають в окуляр. В окуляр вмонтована шкала для вимірювання радіусів інтерференційних кілець. Чіткість зображення поля зору досягається обертанням маховика та перемикача підсилення зображення мікроскопа.

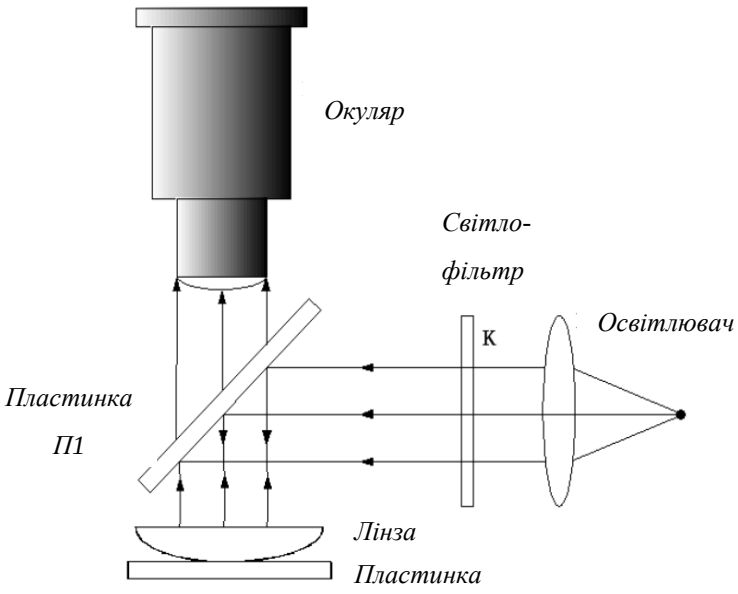


Рис. 7

Порядок виконання роботи

1. На робочому місці ознайомтеся з установкою, підключіть мікроскоп до джерела живлення та ввімкнути освітлювач.
2. Провести налаштування та отримати чітку інтерференційну картину. Переконатися, що в білому світлі утворюється різнокольорова інтерференційна картина.
3. Встановити один зі світлофільтрів з відомою довжиною хвилі в спеціальний отвір освітлювача (рис. 6). За допомогою ручки маховика отримати чітке зображення в окулярі.
4. Розмістити інтерференційну картину в полі зору окуляра таким чином, щоб перехрестя шкали збігалося з центром кілець.
5. Визначити ціну поділки вимірювальної шкали.
6. Виміряти координати лівих $x_{\text{лів}}$ та правих $x_{\text{прав}}$ точок перетину з вимірювальною шкалою для десяти перших темних кілець. Результати вимірів занести в таблицю.
7. Порахувати число k_{max} всіх темних кілець, що спостерігаються в окулярі. Занести до таблиці значення k_{max} та довжину хвилі λ світлофільтра.
8. Повторити вимірювання за пунктами 3-7 для світлофільтра з іншою довжиною світла (іншого кольору).

Обробка результатів

1. Розрахувати значення радіусів r_k та ${r_k}^2$ для всіх виміряних кілець та занести отримані значення до таблиці.
2. У відповідності до отриманих значень ${r_k}^2$ побудувати графік залежності ${r_k}^2$ від k.
3. Розрахувати кутовий коефіцієнт K_α побудованої залежності.
4. За формулою (12) розрахувати радіус кривизни лінзи та оцінити похибку вимірювання.
5. Оцінити ширину $\Delta\lambda$ смуги пропускання використаних світлофільтрів за формулою $\Delta\lambda = \frac{\lambda}{k_{max}}$.

Таблиця 1.

Колір світлофільтру _____										
k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_{\text{лів}}, мм$										
$x_{\text{прав}}, мм$										
r_k, мм										
$r_k{}^2$, мм^2										
$k_{max} =$										
λ (нм) $=$										
$\Delta\lambda$ (нм) $=$										

Таблиця 2.

Колір світлофільтру _____										
k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_{\text{лів}}, мм$										
$x_{\text{прав}}, мм$										
r_k, мм										
$r_k{}^2$, мм^2										
$k_{max} =$										
λ (нм) $=$										
$\Delta\lambda$ (нм) $=$										

Контрольні запитання

1. Що таке інтерференція та за яких умов вона спостерігається?
2. Які хвилі називаються когерентними, монохроматичними? Чому випромінювання природніх джерел світла некогетентне?
3. Які способи отримання когерентних хвиль ви знаєте? Поясніть принципи та наведіть приклади.

4. Що таке оптична довжина шляху та оптична різниця ходу променів? Який між ними зв'язок в однорідному середовищі.
5. Виведіть співвідношення між різницею фаз та різницею ходу двох когерентних хвиль.
6. Виведіть формулу координат максимуму та мінімуму інтерференції від двох джерел?
7. Що таке смуги рівного нахилу? За допомогою рисунків поясніть виникнення смуг однакового нахилу.
8. Що таке смуги рівної товщини? За допомогою рисунків поясніть виникнення смуг однакової товщини.
9. Що таке кільця Ньютона? Поясніть як вони виникають та виведіть формулу для радіусів темних і світлих кілець Ньютона.
10. Виведіть формулу для радіусів темних і світлих кілець Ньютона за умови, що між лінзою і плоско-паралельною пластинкою знаходиться не повітря, а речовина з $n' < n$ скла.
11. Чи теоретично можливо спостерігати виникнення кілець Ньютона при спостереженні в світлі, що пройшло крізь пластину? Чим має відрізнятися інтерференційна картина від тої, яка спостерігається в відбитому світлі?
12. В чому полягає суть явища «просвітлення оптики»?
13. Поясніть принцип роботи інтерферометра Майкельсона. Практичне застосування інтерферометрів.

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т3 Оптика. Квантова фізика. – К.: Техніка, 2006.
2. А. М. Красіко, Л. Г. Лосицька, Т. І. Братусь. Фізика: Електрика і магнетизм. Оптика. Атомна фізика. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів енергетичних спеціальностей. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010.
3. Лютий Т.В., Панченко Л.М. Лабораторний практикум з фізики. «Хвильва та квантова оптика». – Суми: СумДУ, 2008.