

## Лабораторна робота 5 Визначення радіуса кривизни лінзи за допомогою кілець Ньютона

Мета роботи: Визначити радіус кривизни лінзи за допомогою кілець Ньютона.

Прилади і матеріали: скляна лінза, змонтована з плоскопаралельною пластинною, біноклярний мікроскоп, один монокуляр якого використовується для підсвічування, а другий має окулярну шкалу, масштабна лінійка з ціною поділки 1 мм, світлофільтр, який пропускає світло визначеної довжини хвилі  $\lambda_{\text{ж}}=5860 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_{\text{ч}} = 6520 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_{\text{з}} = 5460 \text{ \AA}$ .

### Теоретичні відомості

Схема установки показана на рис. 1. Світло від лампи розжарення освітлювача 1 після проходження світлофільтра 2 та об'єктива 3 падає вертикально на лінзу 4, відбивається і спостерігається через окуляр 5. Тобто цей прилад дозволяє спостерігати кільця Ньютона у відбитому світлі при нормальному падінні променів.

Розглянемо хід променів на рис. 2. Промінь світла падає зверху. В точці *B* світло частково відбивається, а частково проходить далі. У точці *C* світло також частково відбивається. Світловий промінь поділяється на два промені, які можуть інтерферувати. Спостереження про

водяться поблизу точки *D*, де повітряний проміжок *BC* дуже тонкий. Радіус *R* кривизни лінзи досить великий, тому можна вважати, що відбиті промені поширюються вгору в одному напрямі.

Якщо оптична різниця шляхів цих променів дорівнює цілому числу довжин хвиль  $\Delta = k\lambda$ , то в точці *C* спостерігається підсилення світла (максимум), а якщо  $\Delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$ , то, відповідно, послаблення (мінімум). Зрозуміло, що геометричним місцем точок, для яких виконується умова максимуму чи мінімуму, буде коло, тому, дивлячись зверху, ми побачимо темні та світлі кільця. Радіус деякого кільця на рис. 2 дорівнює *r*.

Оптична різниця шляху світлових променів утворюється у повітряному проміжку *BC*. Позначимо його товщину *d*. Другий

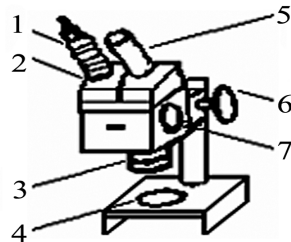


Рис. 1. Мікроскоп для спостереження кілець Ньютона: 1 – освітлювач; 2 – світлофільтр; 3 – об'єктив; 4 – лінза на скляній пластинці; 5 – окуляр; 6 – рукоятка фокусування; 7 – рукоятка збільшень мікроскопа

промінь проходить повітряний проміжок двічі, тому оптична різниця шляху дорівнює  $\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$ . Доданок  $\frac{\lambda}{2}$  виникає внаслідок того, що другий промінь відбивається від оптично більш густого середовища, при цьому його фаза змінюється на протилежну. Прирівнюючи умову мінімуму (темні кільця)  $\Delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$  та оптичну різницю шляху  $\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$ , отримаємо: товщина повітряного зазору для темних кілець повинна бути  $d = k \frac{\lambda}{2}$ .

Запишемо теорему Піфагора для трикутника  $OAB$  (рис. 2), в якому катет  $OA$  дорівнює  $R - d$ :

$$R^2 = r^2 + (R - d)^2,$$

$$R^2 = r^2 + R^2 - 2Rd + d^2.$$

Величиною  $d^2$  можна знехтувати, тому що вона дуже мала в порівнянні з іншими величинами. Тоді  $r^2 \cong 2Rd$ , а підставляючи вираз для товщини повітряного проміжку  $d$ , маємо

$$r^2 = Rk\lambda. \quad (1)$$

Радіус кривизни лінзи тоді дорівнює

$$R = \frac{r^2}{k\lambda}.$$

Звичайно радіуси кілець вимірюють у поділках окулярної шкали. Для переводу цих значень у систему СІ величину радіуса кільця треба помножити на ціну поділки окулярної шкали  $a$ .

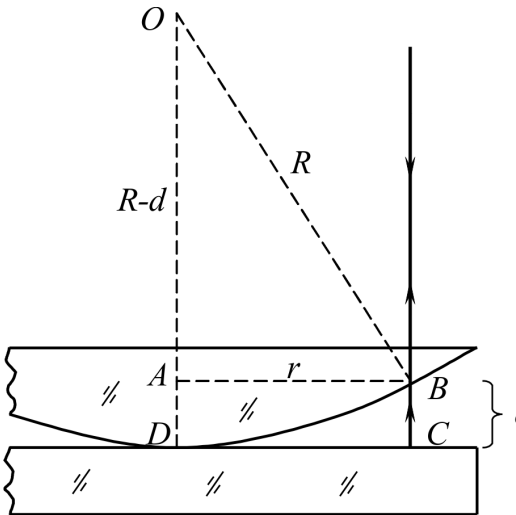


Рис. 2. Хід світлових променів

Тоді остання формула для визначення радіуса кривизни лінзи набуває вигляду

$$R = \frac{r^2 a^2}{k\lambda}. \quad (2)$$

Для стабільності інтерференційної картини лінзу притискують до скляної пластинки. У цьому випадку лінза деформується, як показано на рис. 3, і формула (1) дає неправильні результати. Дивлячись у мікроскоп, тепер ми побачимо у центрі не точку, а темний круг, радіус якого  $\rho$ . Величина деформації лінзи показана пунктиром і позначена літерою  $h$ .

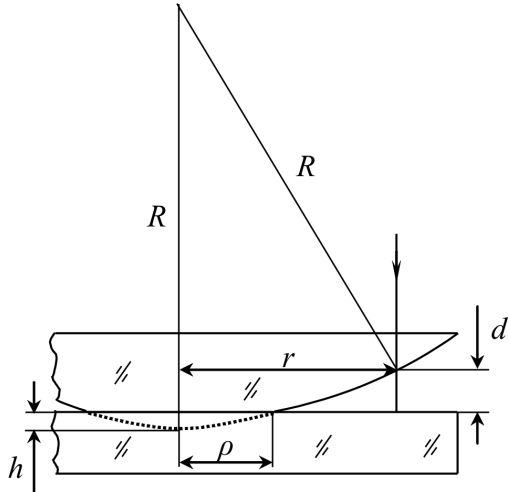


Рис. 3. Утворення кілець Ньютона у випадку деформації лінзи

Запишемо теорему Піфагора для прямокутного трикутника на рис. 3.

$$r^2 = R^2 - (R - (d + h))^2,$$

$$r^2 = R^2 - R^2 + 2R(d + h) - (d + h)^2.$$

Величиною  $(d + h)^2$  можна знехтувати, тому що вона дуже мала в порівнянні з іншими величинами. Тоді  $r^2 \cong 2R(d + h)$ .

Підставляючи товщину повітряного зазору  $d = k \frac{\lambda}{2}$ , отримаємо

$$r^2 = 2R \left( k \frac{\lambda}{2} + h \right),$$

або

$$r^2 = Rk\lambda + 2Rh. \quad (3)$$

Порівняння формул (1) і (3) приводить до висновку, що залежність квадратів радіусів кілець від їх порядкового номера  $r^2 = f(k)$  має лінійний характер. Коли деформація лінзи відсутня, то пряма  $r^2 = f(k)$  проходить через початок координат, якщо ж лінза помітно деформована, то ця пряма не проходить через початок координат.

Для знаходження радіуса кривизни у випадку деформованої лінзи запишемо останню формулу для двох кілець із номерами  $m$  та  $n$

$$r_m^2 = Rm\lambda + 2Rh, \quad r_n^2 = Rn\lambda + 2Rh$$

і знайдемо різницю квадратів радіусів кілець

$$r_m^2 - r_n^2 = R\lambda(m - n).$$

Звідси радіус кривизни лінзи дорівнює  $R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{\lambda(m - n)}$ ,

або

$$R = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)}{\lambda(m - n)}.$$

Помножуючи радіуси кілець на ціну поділки окулярної шкали, маємо

$$R = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)a^2}{\lambda(m - n)}. \quad (4)$$

Формула (4) дає можливість знаходити радіус кривизни у випадку деформації лінзи, але треба вимірювати радіуси двох кілець Ньютона.

Слід зазначити, що для світлих кілець треба використовувати умову максимуму  $\Delta = k\lambda$ . Нумерація темних кілець починається з нуля (темна центральна точка або круг має нульовий номер, перше темне кільце має перший номер, друге кільце – другий і так далі). Нумерація світлих кілець починається з одиниці.

## Порядок виконання роботи

*Вправа 1.* Вимірювання радіуса кілець Ньютона в поділках окулярної шкали.

1. Встановити під освітлювач мікроскопа світлофільтр.
2. Розмістити на предметному столику мікроскопа лінзу на скляній пластинці.
3. Включити освітлювач мікроскопа.
4. Повертаючи оправу окуляра, досягти різкого зображення окулярної шкали.
5. Переміщуючи лінзу, змінюючи збільшення мікроскопа та фокусуючи зображення кілець, досягти різкого зображення кілець Ньютона у зручному для вимірювань масштабі. Окулярна шкала при цьому повинна бути розташована вздовж діаметра кілець.
6. Виміряти координати точок перетину п'яти-семи темних кілець з окулярною шкалою.
7. Обчислити радіус кілець у поділках окулярної шкали за

формулою  $r_k = \frac{x_{k \text{ пр}} - x_{k \text{ лів}}}{2}$ , наприклад, для третього темного кільця на рис. 4:  $r_3 = \frac{75 - 35}{2} = 20$ .

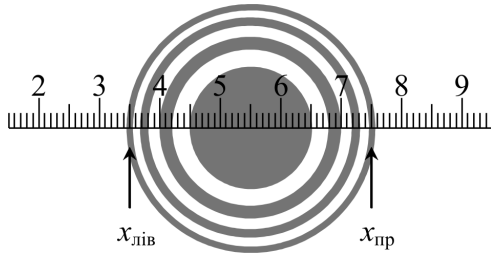


Рис. 4. Вимірювання радіуса кілець Ньютона

*Вправа 2.* Визначення ціни поділки окулярної шкали.

Для вимірювання розмірів маленьких об'єктів окуляр мікроскопа має шкалу. Перед проведенням вимірювань треба визначити ціну поділки окулярної шкали. Для цього на предметному столику мікроскопа розміщують масштабну шкалу, поділка якої дорівнює точно одному міліметру. Дивлячись в оку-

ляр мікроскопа, суміщають поділки масштабної та окулярної шкал, як показано на рис. 5. Для збільшення точності використовують декілька поділок або клітинок масштабної шкали (на рис. 5. дві клітинки). Далі з пропорції знаходять ціну поділки окулярної шкали, наприклад:

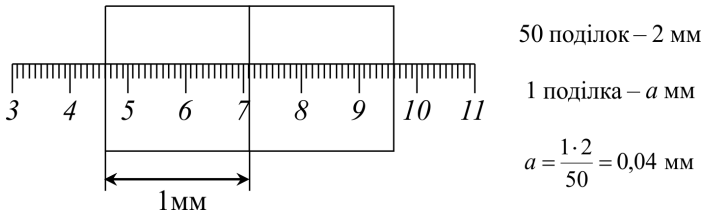


Рис. 5. Визначення ціни поділки окулярної шкали

У наведеному прикладі ціна поділки окулярної шкали дорівнює 0,04 мм. Тепер, використовуючи відому ціну поділки окулярної шкали, можна вимірювати лінійні розміри малих об'єктів.

Слід зауважити, що ціна поділки окулярної шкали залежить від збільшення мікроскопа, тому визначати ціну поділки треба при тому ж збільшенні, при якому спостерігалися кільця Ньютона.

Далі слід:

1. Визначити ціну поділки окулярної шкали три рази.
2. Знайти середнє значення  $\bar{a}$ .
3. Обчислити похибку за формулою

$$\Delta a = 2,92 \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^3 (a_i - \bar{a})^2}.$$

*Вправа 3.* Обчислення радіуса кривизни лінзи.

Починати розрахунки треба з аналізу ступеня деформації лінзи.

Для цього необхідно побудувати графік залежності квадратів радіусів кілець від їх номерів  $r^2 = f(k)$ . З теорії випливає, що це буде пряма лінія. Проводити пряму краще методом найменших квадратів або за допомогою програми *Advanced Grapher* (наприклад, *Agrapher 2.08*).

У найпростішому варіанті можна використати прозору лінійку. Лінію слід проводити так, щоб відхилення експериментальних точок від прямої було мінімальним. Якщо графік пройде через початок координат, то розрахунки можна проводити за формулою (2), якщо ж лінія помітно відхиляється від початку координат, то необхідно використовувати формулу (4).

Далі слід:

Розрахувати радіус кривизни лінзи три рази та знайти середнє значення  $R$ .

Обчислити похибку радіуса кривизни лінзи (для одного із значень). Якщо розрахунки радіуса кривизни лінзи проводились за формулою (4), то оцінювати похибку слід за формулою

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial r} \Delta r\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \lambda} \Delta \lambda\right)^2},$$

яку легко привести до вигляду

$$\Delta R = R \sqrt{\left(2 \frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2},$$

де  $\Delta \lambda$  – спектральний інтервал, який пропускає світлофільтр ( $\Delta \lambda = 100 \text{ \AA}$ ).

Контрольні запитання

1. Покажіть, які промені інтерферують у відбитому та прохідному світлі.
2. Чим відрізняються кільця Ньютона у відбитому та прохідному світлі?
3. Якими будуть кільця Ньютона при освітленні білим світлом?
4. Як зміниться вигляд кілець, якщо простір між лінзою та пластинкою заповнити водою?
5. Чим може бути спричинене викривлення кілець?
6. Чому інтерференція спостерігається лише у тонких плівках?
7. Вивести формули (2) та (4).