

Визначення довжини світлової хвилі за допомогою кілець Ньютона

Мета роботи. Визначення радіусу кривизни плоско-опуклої лінзи та довжини світлової хвилі методом кілець Ньютона.

Прилади. У роботі використовується вимірювальний мікроскоп, освітлювач, світлофільтри, плоско-опукла лінза; платівка із чорного скла. Спостереження ведеться у відбитому світлі.

Теоретичний вступ

Інтерференцією називається явище накладання декількох хвиль, у якому в одних місцях відбувається посилення, а інших – ослаблення амплітуди результуючої хвилі. Необхідною умовою інтерференції хвиль є їхня **когерентність**

Когерентними називаються світлові хвилі однакової частоти з постійною різницею фаз і площинами коливань вектора E , що збігаються.

Одним із способів отримання когерентних джерел є метод так званих кілець Ньютона, які виникають при інтерференції світла в системі, що складається з плоскопаралельної скляної пластинки і плоско-опуклої лінзи на ній.

Нехай плоско-опукла лінза з великим радіусом кривизни R стикається з поверхнею скляної пластинки так, що між пластинкою і лінзою утворюється дуже тонкий повітряний прошарок (рис. 1). Цей прошарок поступово потовщується від точки дотику до країв.

Якщо на лінзу направити вертикально зверху світло, можна побачити навколо точки зіткнення з лінзою темні чи світлі концентричні кільця. Ці кільця і називають **кільцями Ньютона**.

Розглянемо лише один промінь, спрямований у точку B . Частина світла відбивається від точки B у зворотному напрямі, інша частина проходить повітряний зазор між склом і потрапляє в точку C на скляній пластинці. Тут промінь частково заходить у платівку, частково відбивається назад у напрямку лінзи.

Поділ хвилі на дві частини і визначає спосіб отримання когерентних хвиль. Якщо повітряний прошарок малий, то відбиті від нижньої поверхні лінзи і верхньої поверхні

пластини (точок B і C) світлові хвилі будуть когерентні і при накладанні їх у лінзі і вище за неї одержується інтерференційна картина.

Оскільки пучок падає нормально до пластинки і практично до нижньої поверхні лінзи (кривизна лінзи мала), світло відбивається від точок B і C в тому ж напрямку, в якому падає. Тому для різниці ходу світлових хвиль, відбитих від верхньої та нижньої поверхонь повітряного прошарку, можна написати

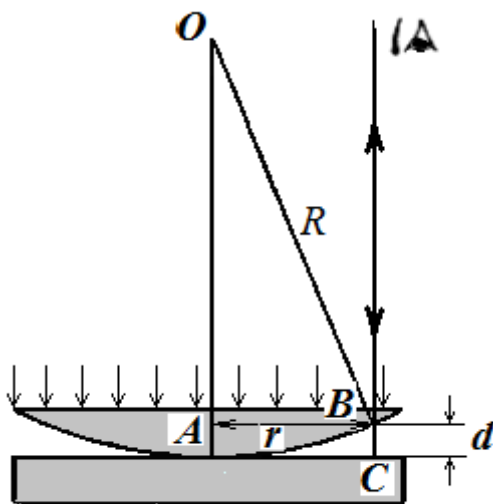


Рис. 1.

$$\Delta = 2nBC + \frac{\lambda}{2},$$

де λ – довжина хвилі відбитого світла, n – показник заломлення повітря.

Тут додається ($\lambda/2$) через зміну фази хвилі на 180° при відбиванні в точці C від нижньої пластинки як від оптично густішого середовища, ніж повітря, звідки світло падає на пластинку. (Такий же стрибок фази відбувається при відбиванні хвилі, що біжить вздовж струни, від її закріпленого кінця). Це еквівалентно збільшення шляху хвилі на половину довжини хвилі $\lambda/2$.

При відбиванні в точці B на межі поділу «скло-повітря» світло відбивається від оптично менш густого середовища, так що стрибка фази не відбувається.

Позначаючи товщину повітряного прошарку BC через d і враховуючи, що показник заломлення повітря $n \approx 1$, для різниці ходу отримаємо

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Гасіння світла відбувається в тих місцях, де світлові хвилі додаються в протифазах. Це означає, що різниця ходу повинна мати значення, що дорівнює непарному числу півхвиль

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

де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ціле число, включаючи нуль, λ - довжина світлової хвилі.

Прирівнюючи (1) і (2), знайдемо для товщини d , при якій освітленість мінімальна

$$d_{\min} = m \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Підсилення світла відбувається в тих місцях, де світлові хвилі складаються в однакових фазах, тобто різниця ходу має дорівнювати парному числу півхвиль (цілому числу довжин хвиль)

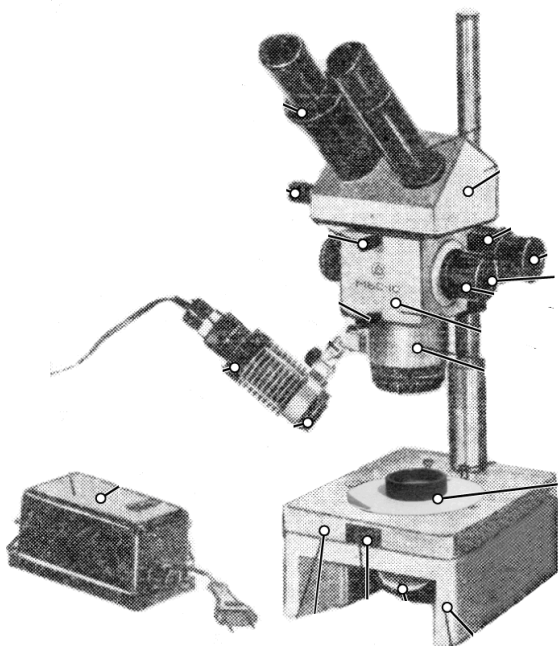
$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda. \quad (4)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$ - ціле число, λ - довжина світлової хвилі.

Відповідною буде і товщина повітряного прошарку для цих місць:

$$d_{\max} = \left(k - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

Як бачимо, інтенсивність відбитого світла залежить від товщини повітряного прошарку. Це означає, що інтенсивність відбитого світла однакова у тих точках, для яких товщина прошарку повітря однакова. Такі точки розміщуються по колам навколо



точки дотику лінзи з платівкою. Виникають світлі та темні концентричні кільця – кільця Ньютона.

Знайдемо співвідношення між радіусом кривизни лінзи R та радіусом r деякого кільця Ньютона.

З прямокутного трикутника OAB (рис. 1) визначимо d через радіус кільця $AB = r$ і радіус кривизни лінзи R :

$$R^2 = r^2 + (R - d)^2 = r^2 + R^2 - 2Rd + d^2. \quad (6)$$

У разі лінзи з великим радіусом кривизни $d^2 \ll 2Rd$.

Тоді отримаємо

$$d \approx \frac{r^2}{2R} \quad (7)$$

Підставляючи значення товщини повітряного зазору (3), відповідного темним кільцям, у (7), отримаємо формулу для знаходження радіусів темних кілець Ньютона:

$$r_k^{\text{ТЕМН}} = \sqrt{m\lambda R}. \quad (\text{для темних кілець } m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

Відповідно, підставляючи (5) в (7), визначимо радіус k -го світлого кільця

$$r_k^{\text{СВІТЛ}} = \sqrt{\left(k - \frac{1}{2}\right)R\lambda}. \quad (\text{для світлих кілець } k = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

Виконання роботи

Завдання 1 . Визначення радіуса R кривизни лінзи

1. Усі процедури п.1 виконує викладач, процедури пп. 2-6 – студент.

Викладач вводить в насадку для мікроскопа в лівій окулярній трубці *інтерференційний фільтр* із заданою довжиною хвилі λ .

Жовтий $\lambda = 580$ нм,

Зелений $\lambda = 546$ нм,

Блакитний $\lambda = 480$ нм.

Сюди ж вставляється *освітлювач*. У правій окулярній трубці мікроскопа встановлений окуляр зі збільшенням 8^x , який має діоптрійне наведення (наведення на різкість зображення об'єкта). У його фокальній площині встановлюється шкала. Механізмом діоптрійного наведення окуляра 8^x одержують чітке зображення шкали. Потім поворотом рукояток механізму фокусування домагаються різкого зображення інтерференційних кілець (об'єкта).

В окуляр мікроскопа спостерігається інтерференційна картина у вигляді світлих і темних кілець. Пряма лінія виміральної лінійки окуляра мікроскопа повинна проходити через середину темної плями

2. Виміряйте діаметри темних кілець.

Для цього за шкалою окуляра мікроскопа визначте положення першого темного кільця **зліва від центру** інтерференційної картини і занесіть це значення в Таблицю 1. Далі фіксуєте положення темних кілець наступного, біль-

шого діаметру і записуйте відповідні показання в Таблицю 1 (відповідно до номера кільця). Коли дійдете до останнього видимого зліва темного кільця, почніть вимірювання **праворуч від центру**, записуючи зростаючі номери кілець і координати їх положень. Центральна темна пляма має номер нуль.

Зручно працювати вдвох. Один експериментатор дивиться в окуляр мікроскопа та повідомляє другому експериментатору дані відліків.

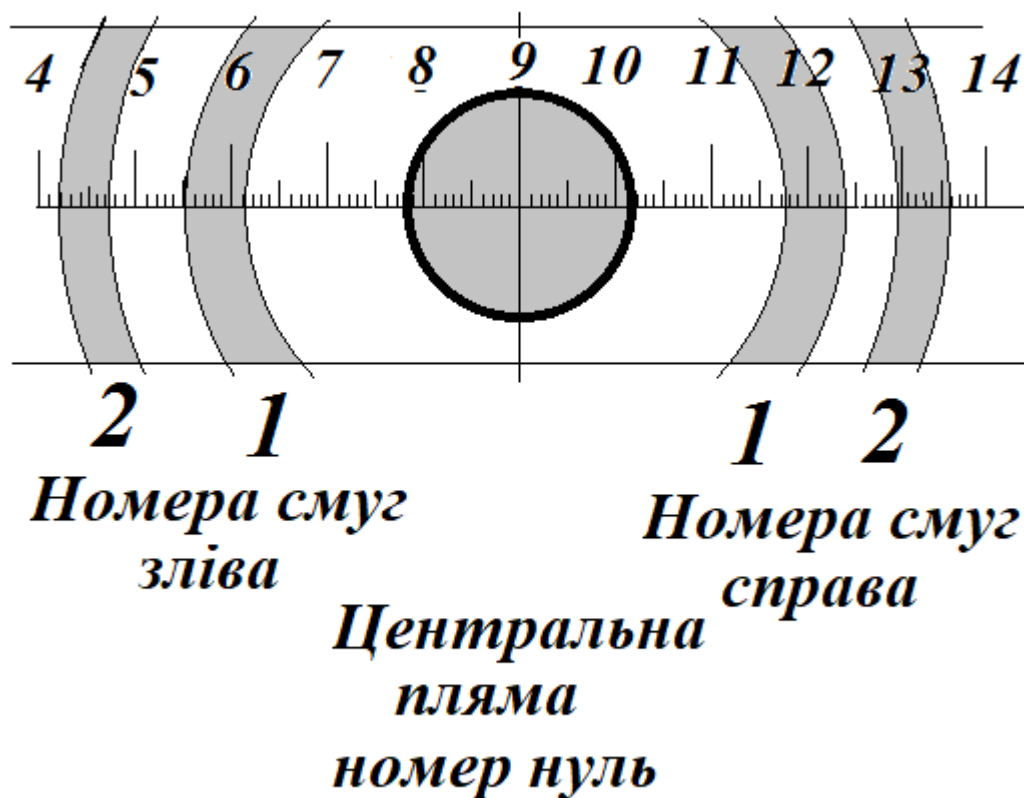


Рис. 2

Наприклад, на наведеному рис. 2:

ЗЛІВА номер кільця 1, відлік 58 (беремо середину кільця), номер кільця 2, відлік 44 і т.д.

СПРАВА номер кільця 1, відлік 121 (беремо середину кільця), номер кільця 2, відлік 123 і т.д.

При тривалій роботі освітлювач потрібно періодично вимикати для охолодження

3. Виберіть два найбільш віддалених один від одного темних кілець. Для темних кілець з номерами m і k маємо:

$$r_m^2 = mR\lambda \quad \text{та} \quad r_k^2 = kR\lambda .$$

Звідси для радіуса кривизни лінзи одержуємо формулу

$$R = \frac{r_k^2 - r_m^2}{(k - m)\lambda} . \quad (10)$$

Спочатку радіуси кілець обчислюються в поділах шкали мікрометра, а потім переводяться в міліметри з урахуванням того, що ціна поділу окулярного мікрометра залежить від збільшення об'єктиву. При даному збільшенні ціна поділки шкали мікроскопа **1 поділ. = 0,014 мм.**

4. З таблиці 1 виберіть **три пари кілець** та обчисліть радіус кривизни лінзи за формулою (10). Для зменшення помилки слід вибрати пари кілець, найбільш віддалені один від одного.

5. За трьома значеннями R обчисліть середнє значення радіусу кривизни лінзи.

6. Викладач може замінити світлофільтр і запропонувати провести вимірювання розмірів кілець для інших довжин хвиль. Обчисліть радіус кривизни лінзи і для іншого значення довжини хвилі.

Таблиця 1

Номер кільця i	Відлік		Діаметр, поділок	Радіус r_i , поділ	Радіус r_i , мм	R , мм за (10)	$\langle R \rangle$, мм
	зліва	справа					
1						За парою 1-8	
2						За парою 2-7	
3						За парою 1-6	
4							
5							
6							
7							
8							

Завдання 2. Визначення довжини світлової хвилі

1. Вставте в насадку для мікроскопа інтерференційний фільтр з іншою довжиною хвилі пропускання (за участю викладача).

2. Повторіть усі вимірювання радіусів кілець як у п. 2 завдання 1.

3. Використовуючи формулу (10) і визначений у завданні 1 радіус R кривизни лінзи, розрахуйте довжину хвилі пропускання вибраного світлофільтра.

$$\lambda = \frac{r_k^2 - r_m^2}{(k - m)R} \quad (11)$$

Таблиця 2.

Номер кільця i	Відлік		Діаметр, поділок	Радіус r_i , поділ	Радіус r_i , мм	R , мм	λ , за (11), нм
	зліва	справа					
1							За парою 1-8
2							За парою 2-7
3							За парою 1-6
4							
5							
6							
7							

Контрольні питання

1. У чому полягає явище інтерференції світла? Які хвилі називаються когерентними?
2. Що називається оптичною різницею ходу хвиль?
3. Назвіть умови інтерференційних максимумів та мінімумів. Визначте, що спостерігатиметься на екрані, максимум або мінімум, при $\Delta = 2,22$ мкм і $\lambda = 0,555$ мкм.
4. У чому полягає відмінність застосованої в даній роботі інтерференційної схеми від інших схем спостереження інтерференції?
5. Чому в центрі кілець Ньютона у відбитому світлі розміщена темна пляма?
6. Чому ширина кілець зменшується зі збільшенням порядку?
7. Відстань між першим та другим кільцями Ньютона при розгляданні їх у відбитому світлі 0,6мм. Визначити відстань між дев'ятим та десятим кільцями.

Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.3: Оптика. Квантова фізика. Навчальний посібник для студентів вищих технічних та педагогічних закладів освіти – К.; "Техніка", 2006, -520 с
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 5. - Хвильова оптика. [Текст]: - Д. НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. - 58 с. -

Склав І.П.Гаркуша