

Практичне заняття 5

Практичне використання інтерференції

План:

1. Вимірювання малих кутів (клин).
2. Інтерферометри.
3. Просвітлення оптики тощо.

Основні формули:

1. Результат інтерференції світла в плоскопаралельній пластинці (у відбитому світлі) визначається формулами:

– підсилення світла:

$$2dn \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (\text{max}) \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

– ослаблення світла:

$$2dn \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (\text{min}) \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

де d – товщина пластинки; n – показник заломлення;
 β – кут заломлення; λ – довжина хвилі світла.

2. Оптична довжина шляху дорівнює ln , де l – геометрична довжина шляху, а n – показник заломлення речовини, по якій проходить світло.

3. Оптична різниця ходу двох променів

$$\Delta = l_2 n_2 - l_1 n_1.$$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. В дуже тонкій клиноподібній пластинці у відбитому світлі при нормальному падінні променів спостерігаються інтерференційні смуги. Відстань між сусідніми темними смугами дорівнює 5 мм. Знаючи, що $\lambda = 0,58$ мкм, а n пластинки 1,5, знайти кут α між гранями пластинки.

Аналіз та розв'язок:

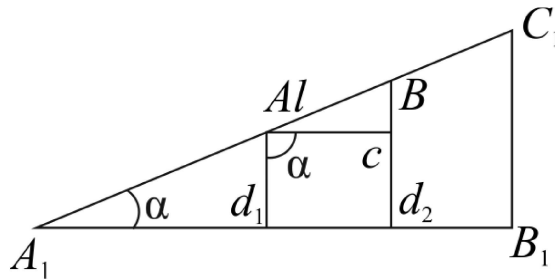
Дано:

$$l = 5 \text{ мм}$$

$$\lambda = 0,58 \text{ мкм}$$

$$n = 1,5$$

$$\alpha = ?$$



Для нормального падіння променів $\beta = 0$, тобто $\cos \beta = 1$.

$$2dn \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (\text{min}) \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Перенесемо $\frac{\lambda}{2}$ вправо, тоді $2dn = k\lambda$.

Із подібності трикутників $A_1B_1C_1$ і ABC , кут $B_1A_1C_1 =$ куту $BAC = \alpha$. В точці A видно k -ту смугу, в точці B – $(k+1)$ смуга, тоді

$$2d_1n = k\lambda, \quad (1)$$

$$2d_2n = (k+1)\lambda, \quad (2)$$

віднімемо з (2) рівняння (1).

$$2n(d_2 - d_1) = \lambda.$$

Із трикутника ABC знайдемо α .

$$\sin \alpha = \frac{BC}{AB} = \frac{d_2 - d_1}{l}.$$

$$d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{2n}, \text{ тобто } \sin \alpha = \frac{\lambda}{2n \cdot l}.$$

Підставимо числові значення:

$$\sin \alpha = \frac{58 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,5} = 0,0000386;$$

(λ і l підставлено в см, тому що розмірність довжини є в чисельнику та знаменнику)

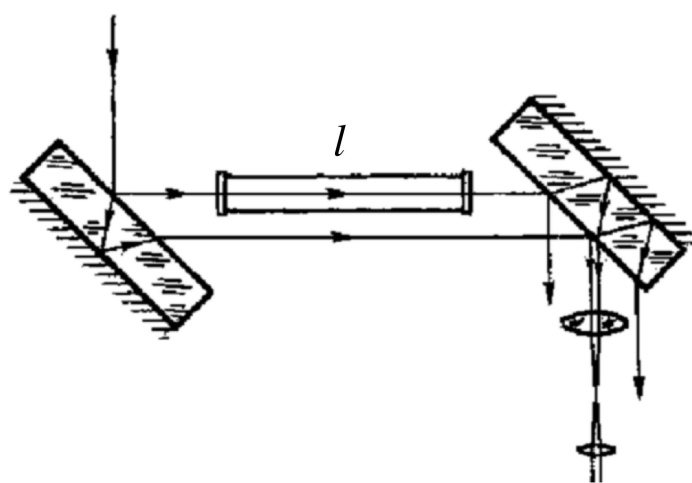
$$\alpha = \arcsin 0,0000386; \quad \alpha = 8''.$$

Відповідь: $\alpha = 8''$, як бачимо, кут дуже маленький, такі кути можна поміряти тільки інтерференційними методами.

Задача 2. На шляху одного з променів інтерферометра Жамена помістили відкачану трубку довжиною 10 см. При заповненні трубки хлором інтерференційна картина змістилась на 131 смугу. Довжина хвилі монохроматичного світла в цьому досліді дорівнює: $\lambda = 5,9 \cdot 10^{-5}$ см. Знайти показник заломлення хлору.

Дано:
 $l = 10$ см
 $N = 131$
 $\lambda = 5,9 \cdot 10^{-5}$ см

$n_{\text{хл}} = ?$



При відсутності хлору в полі зору спостерігаються смуги рівного нахилу. При заповненні трубки хлором смуги зміщуються, тому що на відрізьку l виникає оптична різниця ходу між першим і другим променями.

Оптична різниця ходу буде дорівнювати

$$ln_{\text{хл}} - ln_{\text{пов}} = ln_{\text{хл}} - l \cdot 1 = l(n_{\text{хл}} - 1),$$

де l – довжина трубки.

Ця різниця ходу призведе до зміщення інтерференційної картини на 131 смугу, тобто на довжину $\lambda \cdot 131$, тому $l(n_{\text{хл}} - 1) = \lambda \cdot N = \lambda \cdot 131$, тобто $n_{\text{хл}} - 1 = \frac{N \cdot \lambda}{l}$, або

$$n_{\text{хл}} = \frac{N \cdot \lambda}{l} + 1.$$

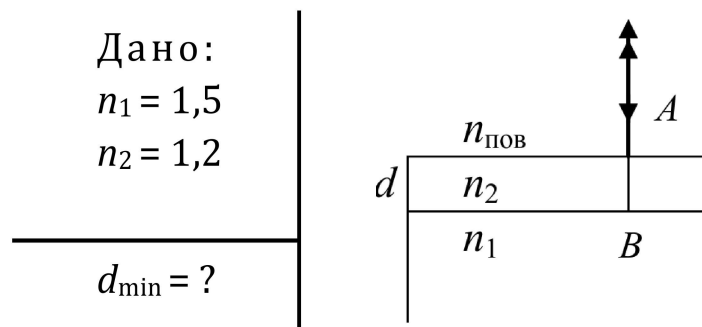
Підставимо значення величин, одержимо:

$$n_{\text{хл}} = \frac{13 \cdot 5,9 \cdot 10^{-5}}{10} + 1 = 1,000773.$$

Аналіз результату: як бачимо, різниця в показниках заломлення газів (хлор, повітря та інші гази) розпочинається в четвертому знаку, це можливо поміряти лише інтерференційними засобами.

Задача 3. На поверхню скляного об'єктива ($n_1 = 1,5$) нанесено тонку плівку, показник заломлення якої $n_2 = 1,2$ (просвітлююча плівка). При якій найменшій товщині цієї плівки відбудеться максимальне ослаблення відбитого світла в середній частині видимого спектра?

Аналіз та розв'язок:



З умови задачі видно, що $n_{\text{пов}} < n_2 < n_1$. У відбитому світлі інтерферують промені, які відбиваються від точки A та від точки B . Оскільки $n_2 > n_{\text{пов}}$, то в точці A має місце втрата півхвилі, аналогічно в точці B , оскільки $n_1 > n_2$ – теж втрачається півхвилі. Тобто при паралельному падінні променів на плівку втрачається ціла хвиля, значить, фаза коливань не змінюється і формула для відбитого світла має вигляд:

$$\begin{cases} 2dn_2 \cdot \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = (2k+1) \frac{\lambda}{2}, \quad \cos \beta = 1, \\ 2dn_2 = (2k+1) \frac{\lambda}{2}. \end{cases}$$

Мінімальна товщина плівки буде при $k = 0$, тобто

$$2dn_2 = \frac{\lambda}{2}; \quad d = \frac{\lambda}{2 \cdot 2n_2} = \frac{\lambda}{4n_2}.$$

Оскільки найбільшій чутливості людського ока відповідає центральна частина видимої області спектра довжиною хвилі 5500 \AA , тоді

$$d = \frac{5500 \cdot 10^{-10}}{4 \cdot 1,2} = \frac{5,5 \cdot 10^{-7}}{4,8} \approx 1,15 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Відповідь: $d \approx 1,15 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Максимально ослаблюється у відбитому світлі зелена область спектра, інші кольори спектра ослаблені значно менше, тому «просвітлений» об'єкт має фіолетово-червоне забарвлення.

Задачі для самостійного розв'язування та домашнього завдання

1. Мильна плівка розташована вертикально, утворює клин внаслідок стікання рідини. Спостерігаючи інтерференційні лінії у відбитому світлі ртутної дуги ($\lambda = 5461 \text{ \AA}$), знаходимо, що відстань між п'ятьма лініями дорівнює 2 см . Знайти кут клину в секундах. Світло падає перпендикулярно до поверхні плівки. Показник заломлення мильної води $1,33$.
2. В дуже тонкій клинчастій плівці у відбитому світлі при нормальному падінні спостерігаються інтерференційні лінії. Відстань між сусідніми темними лініями дорівнює 5 мм . Знаючи, що довжина світлової хвилі дорівнює $0,58 \text{ мкм}$, а показник заломлення пластинки $1,5$, знайти кут між гранями пластинки.

3. Мильна плівка, розташована вертикально, утворює клин внаслідок стікання рідини. Спостерігаючи інтерференційні смуги у відбитому світлі ($\lambda = 5500 \text{ \AA}$), знаходимо, що відстань між двома смугами дорівнює 0,8 см. Знайти кут клина. Світло падає на клин нормально. Показник заломлення мильної води 1,33.
4. Мильна плівка, яка розташована вертикально, здійснює клин. Інтерференція спостерігається у відбитому світлі крізь червоне скло ($\lambda = 6,31 \cdot 10^{-5} \text{ см}$), відстань між сусідніми червоними смугами при цьому дорівнює 3 мм. Потім ця плівка спостерігається через синє скло ($\lambda = 4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$). Знайти відстань між сусідніми синіми смугами. Врахувати, що за час вимірювання форма плівки не змінюється і світло падає на плівку нормально.
5. На скляний клин падає нормально пучок світла ($\lambda = 5,82 \cdot 10^{-7} \text{ м}$). Кут клина дорівнює $20''$. Яка кількість темних інтерференційних смуг приходить на одиницю довжини клина? Показник заломлення скла дорівнює 1,5.
6. Між двома плоскопаралельними пластинками потрапила волосина, внаслідок чого між ними утворився клин. При розгляді пластинок у відбитому світлі з довжиною хвилі 500 нм спостерігаються інтерференційні смуги, відстань між якими 3 мм. Знайти кут між пластинками клина, якщо пластинки мають показник заломлення 1,5, а простір між ними заповнений водою. Світло падає нормально.
7. На тонкий скляний клин з кутом $\alpha = 2''$ падає нормально до поверхні монохроматичне світло. Визначити довжину хвилі, якщо показник заломлення скла 1,55, а відстань між першою і одинадцятою темними смугами 3 мм.
8. Знайти зміщення дзеркала в інтерферометрі Майкельсона, якщо інтерференційна картина зміститься на 400 смуг. Дослід проводився при довжині хвилі 550 нм.
9. В інтерферометрі Жамена дві однакові трубки довжиною по 15 см заповнені повітрям і розміщені в плечі інтерферометра. При заміні однієї з них такою самою трубкою, заповненою киснем, інтерференційна картина змістилась на шість смуг, при довжині хвилі падаючого світла 500 нм. Знайти показник заломлення кисню, якщо показник заломлення повітря $n = 0,000292$.

10. Для визначення показника заломлення аміаку в одне з плечей інтерферометра Майкельсона розташували відкачану трубку довжиною $l = 14$ см. Кінці трубки закриті плоскопаралельними стеклами. При заповненні трубки аміаком інтерференційна картина для довжини хвилі $\lambda = 0,59$ мкм зміститься на 180 смуг. Знайти показник заломлення аміаку.
11. Знайти відношення відстаней d_1 і d_2 між сусідніми темними смугами в інтерферометрі Жамена для довжин хвиль λ_1 і λ_2 .
12. На скляний клин з малим кутом нормально до його поверхні падає паралельний пучок променів монохроматичного світла з довжиною хвилі $0,6$ мкм. При цьому виникають інтерференційні смуги, кількість яких, що припадає на 1 см, дорівнює 10 . Показник заломлення скла $1,5$. Визначити кут клина.
13. На поверхню скляної пластинки з показником заломлення $1,5$ нанесли прозору плівку з показником заломлення $1,4$. На поверхню плівки нормально падає світло довжиною хвилі 500 нм. При якій найменшій товщині плівки відбивання світла не буде?
14. В досліді з інтерферометром Майкельсона для зміщення інтерференційної картини на 500 смуг треба змістити дзеркало на відстань $0,161$ мм. Знайти довжину хвилі падаючого світла.
15. Знайти зміну оптичної довжини ходу променя, що поширюється у повітрі, якщо на його шляху поставити скляну пластинку товщиною 2 мм. Розрахунок зробити для нормально падаючого променя і для променя, що падає під кутом 60° .
16. Різниця ходу двох інтерференційних хвиль монохроматичного світла $\Delta = 0,5 \lambda$. Знайти різницю фаз $\Delta\phi$.
17. Знайти всі довжини хвиль видимої частини спектра, які будуть максимально підсилені при різниці ходу інтерферуючих променів 2 мкм?
18. Який відрізок шляху пройде монохроматичний промінь у вакуумі за той самий час, за який він проходить у воді 3 м?

Теоретичні питання для самоконтролю

1. Що таке геометрична різниця ходу між двома променями?
2. Що таке оптична різниця ходу між двома променями?
3. Як встановити зв'язок між різницею ходу Δ та різницею фаз $\Delta\phi$?
4. Як називаються смуги інтерференції, які ми спостерігаємо на клині?
5. Як можна спостерігати це явище в лабораторних умовах?
6. Для чого виконується явище інтерференції на клині?
7. Який принцип роботи інтерферометра Жамена? Накресліть схему інтерферометра.
8. Чому за допомогою інтерферометра спостерігається інтерференційна картина? Яка фізична природа смуг інтерференції?
9. Чому зміщуються смуги інтерференції, коли на шляху одного променя розмістити трубку з газом або будь-яке прозоре тіло?
10. Який принцип роботи інтерферометра Майкельсона? накресліть схему інтерферометра.
11. Для чого служать дзеркала в інтерферометрі?
12. Чи зміниться оптична різниця ходу, коли на шляху одного з променів інтерферометра Майкельсона розмістити трубку з газом, а потім таку ж трубку розмістити на шляху одного з променів інтерферометра Жамена? Чому?
13. Який з цих інтерферометрів більш чутливий?
14. Де використовуються інтерферометри Майкельсона і Жамена?
15. Для яких цілей використовується інтерферометр Лінніка?
16. Як здійснюється «просвітлення» оптики?
17. Яке значення показника заломлення повинна мати «просвітлююча» плівка по відношенню до показника заломлення скла, яке «просвітлюється»? Чому?
18. Чому «просвітлений» об'єктив здається фіолетово-червоним?
19. Виведіть формулу для мінімальної товщини плівки, яка «просвітлює»?