

§ 44. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА



Для будь-якого хвильового руху характерні явища інтерференції та дифракції. Оскільки світло має хвильову природу, можна спостерігати й інтерференцію світла. Слід зазначити, що одним з перших це явище на практиці застосував Ньютон, хоча йому так і не вдалося пояснити його причину, адже з позицій корпускулярної теорії світла, прихильником якої був учений, це було неможливо. Отже, дізнаємось, що це за явище і в чому його причина.



Характеризуємо хвильові властивості світла

Для будь-яких хвиль виконується принцип суперпозиції, тобто, якщо в певну точку простору надходять хвилі від декількох джерел, то ці хвилі накладаються одна на одну. За певних умов унаслідок такого накладання в деяких точках простору може відбуватися посилення коливань, а в деяких — послаблення.



Інтерференція — явище накладання хвиль, унаслідок якого в певних точках простору спостерігається стійке в часі посилення або послаблення результуючих коливань.

З'ясуємо, що означає це явище для світла. Оскільки світло має електромагнітну природу, то при поширенні світлової хвилі в кожній точці простору, де поширюється хвиля, відбувається періодична зміна напруженості та магнітної індукції електромагнітного поля. Якщо через деяку точку простору поширюються дві світлові хвилі, то напруженості полів векторно додаються. Результуюча напруженість характеризуватиме світлову енергію, що надходить в дану точку.

Чим більша напруженість, тим більшою є енергія, що надходить. Так само додаються і вектори магнітної індукції.

У випадку, коли напрямки напруженостей полів двох світлових хвиль збігаються, результуюча напруженість збільшується, і в точці спостерігається максимальне збільшення освітленості. І навпаки, коли напруженості полів напрямлені протилежно, результуюча напруженість зменшується, і світло гаситиметься світлом.

Зверніть увагу: під час інтерференції енергія не зникає — відбувається її перерозподіл у просторі.

Для того щоб в певних точках простору весь час могло відбуватися посилення або послаблення результуючих коливань, необхідне виконання двох умов, які називаються **умовами когерентності хвиль**: 1) хвилі повинні мати однакову частоту; 2) різниця початкових фаз $\Delta\phi$ цих хвиль має бути постійною.

Хвилі, які відповідають умовам когерентності, називають **когерентними хвилями**.

2 За яких умов утворюються максимум і мінімум інтерференції

Розглянемо дві когерентні світлові хвилі, які надходять у довільну точку M , розташовану на відстані d_1 від джерела S_1 і на відстані d_2 від джерела S_2 . Відстань $\Delta d = d_1 - d_2$ називається геометричною різницею ходу хвиль (рис. 44.1).

Якщо хвилі відходять від джерел S_1 і S_2 в однакових фазах, а різниця ходу $\Delta d = 0$, то в точку M хвилі надходять також в однакових фазах. У цьому випадку в точці M весь час відбуваються електромагнітні коливання зі збільшеною амплітудою (рис. 44.2), отже, спостерігається **максимум освітленості**. Те саме відбуватиметься і при $\Delta d \neq 0$ за умови, що на відрізок Δd укладається будь-яке ціле число довжин хвиль (парне число півхвиль).

Умова максимуму: в даній точці простору весь час відбувається посилення результуючих світлових коливань, якщо геометрична різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять в цю точку, дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль):

$$\Delta d_{\max} = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2},$$

де λ — довжина світлової хвилі у середовищі, k — ціле число.

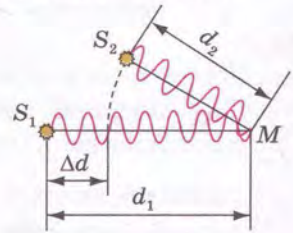


Рис. 44.1. Геометрична різниця ходу двох хвиль



Рис. 44.2. У точках інтерференційних максимумів коливання посилюють одне одне: $A = A_1 + A_2$, де A_1, A_2 — амплітуди вихідних коливань, A — амплітуда результуючих коливань

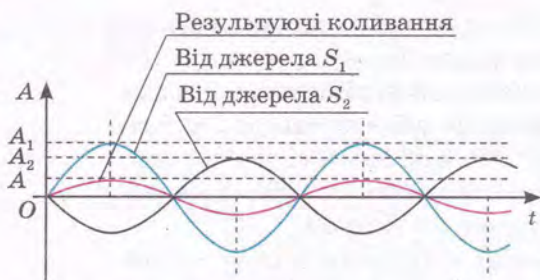


Рис. 44.3. У точках інтерференційних мінімумів коливання послаблюють одне одне: $A = A_1 - A_2$

Умова мінімуму: в даній точці простору весь час відбувається послаблення результативних світлових коливань, якщо геометрична різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять в цю точку, дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\Delta d_{\min} = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$$

Зверніть увагу: під час розв'язування задач слід враховувати, що довжина λ світлової хвилі у середовищі менша за довжину λ_0 світлової хвилі у вакуумі в n разів: $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, де n — абсолютний показник заломлення середовища.

3 Як спостерігати інтерференцію світла

Ви добре знаєте, що якщо в кімнаті ввімкнути додаткове джерело світла, то освітленість посилиться в будь-якій точці кімнати (інтерференція не спостерігатиметься). Річ у тім, що *спостерігати*

інтерференційну картину від двох незалежних джерел світла (за винятком лазерів) неможливо. Причина в тому, що атоми джерел випромінюють світло незалежно один від одного окремими «цугами» («обривками хвиль») довжиною до 3 м, тривалість імпульсу — порядку 10^{-8} с. Фази «цугів», випромінених окремими атомами, і площина коливань вектора напруженості хаотично змінюються. Отже, інтерференційна картина від двох незалежних джерел світла змінюється кожну 10^{-8} с. Через інерційність зору людина не може помітити настільки швидкі процеси (зорові відчуття на стійкості зберігаються протягом 0,1 с).



Для одержання когерентних джерел світла вдаються до штучного прийому: пучок світла від одного джерела S (рис. 44.4) розділяють на два (або більше) пучки світлових хвиль. Ці хвилі когерентні (випромінюються

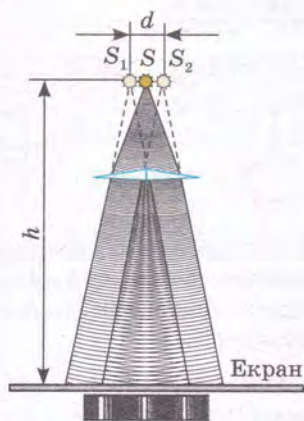


Рис. 44.4. Схема розділення пучка світла на два когерентні пучки за допомогою біпризми Френеля: S — джерело світла; S_1 і S_2 — вторинні когерентні джерела світла; у реальному досліді $d \ll h$ (1 мм — 3 м)

тим самим джерелом світла) і мають деяку різницю ходу (йдуть до екрана різними шляхами). Якщо різниця ходу для певної точки екрана дорівнює парному числу півхвиль, то в цій точці спостерігається максимум освітленості, якщо непарному — мінімум освітленості. Отже, на екрані створюється інтерференційна картина: чергування світлих і темних смуг у разі монохроматичного джерела світла або чергування райдужних смуг у разі джерела білого світла. ★

4 Інтерференція на тонких плівках.

★ Кільця Ньютона ★

Із проявами інтерференції світла в природі ми найчастіше зустрічаємось тоді, коли світло падає на тонку прозору плівку (рис. 44.5). Світлова хвиля частково відбивається від зовнішньої поверхні плівки (хвиля 1), частково проходить через плівку і, відбившись від її внутрішньої поверхні, повертається в повітря (хвиля 2). Оскільки хвиля 2 проходить більшу відстань, ніж хвиля 1, то між ними існує різниця ходу. Обидві хвилі когерентні, оскільки створені одним джерелом, тому в результаті їх накладання спостерігається стійка інтерференційна картина. Якщо хвиля 2 відстає від хвилі 1 на парне число півхвиль, то спостерігається посилення світла (максимум інтерференції), якщо на непарне — послаблення (мінімум інтерференції). Саме інтерференцією світла зумовлений переливчастий колір багатьох комах (рис. 44.6).

Біле світло поліхроматичне, воно складається з хвиль різної довжини, тому для посилення світла різного кольору потрібна різна товщина плівки. Отже, якщо плівка має різну товщину і освітлюється білим світлом, то вона виявиться райдужно забарвленою (райдужні мильні плівки, райдужна масляна плівка на поверхні води). Крім того, різниця ходу хвиль у тонкій плівці залежатиме від кута падіння світла на плівку (зі збільшенням кута падіння різниця ходу збільшується).

З інтерференцією світла на плівці пов'язана поява інтерференційної картини у вигляді концентричних кілець, що отримали назву кільця Ньютона (рис. 44.7).

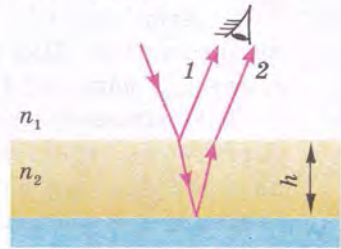


Рис. 44.5. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на тонкій плівці

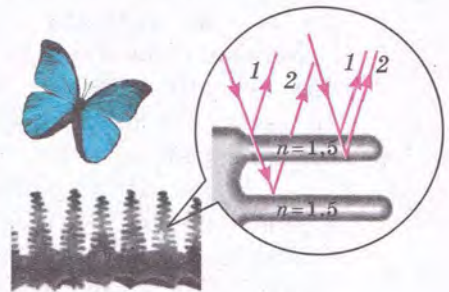


Рис. 44.6. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на крильцях метелика

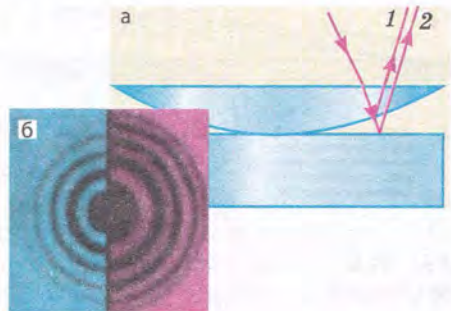


Рис. 44.7. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на повітряному проміжку між лінзою та скляною пластиною (а); кільця Ньютона (б)

Роль плівки у цьому випадку виконує повітряний проміжок між скляною поверхнею лінзи і скляною ж пластиною. Якщо освітлювати лінзу монохроматичним світлом, то спостерігається чергування світлих і темних кілець, причому радіуси кілець залежатимуть від довжини хвилі світла. Якщо ж лінзу освітити білим світлом, то кільця виявляться спектрально забарвленими. ★

5 Застосування інтерференції

Інтерференцію на тонких плівках застосовують для *просвітлення оптики*. Цей метод був відкритий українським фізиком Олександром Смакулою (1900–1983) у 1935 р.

В оптичних системах, які містять кілька лінз, унаслідок відбиття може втрачатися до 40 % енергії світла. Щоб знизити втрати, на поверхню лінз наносять тонку плівку, показник заломлення якої менший, ніж показник заломлення матеріалу лінзи. Товщину плівки добирають таким чином, щоб різниця ходу між променями, відбитими від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, дорівнювала півхвилі. У цьому випадку у відбитому світлі виконується умова мінімуму, отже, відбиті промені гаситимуться, і через лінзу проходитиме більше світла.

Але одна плівка не може забезпечити гасіння хвиль всіх довжин, тому товщину плівки добирають так, щоб повне гасіння за нормального падіння відбувалося для хвиль середньої частини спектра, до яких найбільш чутливе око людини. Якщо треба забезпечити гасіння в широкому діапазоні довжин хвиль, використовують багатошарові плівки.

За допомогою інтерференції *оцінюють якість шліфування поверхні виробу*. Для цього між поверхнею зразка і дуже гладенькою еталонною пластиною створюють повітряний прошарок. На тонкому повітряному клині між зразком і пластиною утворюється інтерференційна картина у вигляді світлих і темних смуг. Якість шліфування визначають за формою смуг: наявність нерівності навіть порядку 10^{-8} м призводить до викривлення інтерференційних смуг (рис. 44.8).

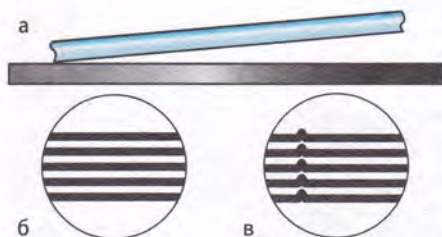


Рис. 44.8. Перевірка якості шліфування за допомогою інтерференції (а); якщо зразок гладенький, то інтерференційні смуги паралельні (б); якщо ж на поверхні зразка є подрапина — інтерференційні смуги викривлені в бік збільшення товщини повітряного клину (в)

Для точних вимірювань коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів, коефіцієнтів заломлення речовин, для вияву досить малих концентрацій домішок у газах та рідинах і т. д. використовують *інтерферометри* — надточні вимірювальні прилади, принцип дії яких ґрунтується на явищі інтерференції світла.

★ Як приклад розглянемо будову інтерферометра Майкельсона (рис. 44.9). Він складається з двох дзеркал M_1 і M_2 , напівпрозорої пластини P_1 та прозорої пластини P_2 . Світло від джерела падає на пластину P_1 , де розділяється на два

пучки: пучок 1 відбивається в напрямку до дзеркала M_1 , пучок 2 поширюється в напрямку до дзеркала M_2 . Відбиті від дзеркал пучки потрапляють в зорову трубу. Оскільки обидві хвилі когерентні, то око спостерігача побачить інтерференційні смуги. Якщо необхідно виміряти, наприклад, коефіцієнт заломлення деякої речовини, її розташовують на шляху променя 1 або 2, внаслідок чого інтерференційні смуги зміщуються. За цим зміщенням визначають коефіцієнт заломлення. ★

Серед різноманітних практичних застосувань інтерференції світла одним з найцікавіших є **голографія** (від грец. ὅλος — повний і γράφω — пишу).

Сутність голографії полягає в записуванні повної оптичної інформації про предмет, тобто інформації не тільки про амплітуду світлової хвилі, а й про її фазу. Річ у тім, що хвиля, відбита будь-яким тілом, містить інформацію не лише про його освітленість, а й про положення тіла та взаємне розташування його частин: чим далі від оптичної системи перебуває предмет або його частина, тим довше поширюється світло й тим більшою буде його фаза.

Якщо об'єкт спостереження освітити монохроматичним і просторово когерентним світловим пучком, то хвилі, відбиті від далеких від оптичної системи та близьких до неї ділянок об'єкта, накладаючись, створюють інтерференційну картину — **голограму**, яку записують на фотопластинці. Голографічне зображення предмета жодною мірою не відповідає його зовнішньому вигляду. Але після відновлення зображення з голограми можна побачити просторове зображення тіла. Цікаво, що зображення предмета з голограми можна відновити за будь-якою, навіть невеликою її частиною. ★

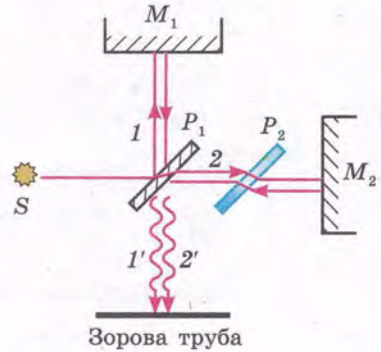


Рис. 44.9. Схема будови інтерферометра Майкельсона

6 Учимися розв'язувати задачі

Задача. Визначте товщину плівки на поверхні лінзи, якщо плівка розрахована на максимальне гасіння світлової хвилі довжиною 555 нм (див. рис. 44.5). Абсолютний показник заломлення плівки 1,231.

h — ?

Дано:

$n = 1,231$

$\lambda_0 = 555$ нм

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. Хвилі, відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, мають гасити одна одну, тому різниця їхнього ходу відповідатиме умові мінімуму: $\Delta d_{\min} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$.

Оскільки в процесі просвітлення оптики намагаються використовувати якомога тонші плівки, то найменша товщина плівки відповідатиме умові: $\Delta d_{\min} = \frac{\lambda}{2}$.

Довжина хвилі у плівці менша за довжину хвилі у вакуумі в n разів: $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$.

Плівки розраховують для *нормально* падаючого світла, тому різниця ходу дорівнює подвійній товщині плівки: $\Delta d_{\min} = 2h$.

$$\text{Остаточко маємо: } 2h = \frac{\lambda_0}{2n} \Rightarrow h = \frac{\lambda_0}{4n}.$$

$$\text{Визначимо значення шуканої величини: } h = \frac{555 \text{ нм}}{4 \cdot 1,231} \approx 113 \text{ нм}.$$

Відповідь: товщина плівки $h = 113 \text{ нм}$.

! Підбиваємо підсумки

Для світла, як і для будь-яких інших хвиль, характерне явище інтерференції — явище накладання хвиль, унаслідок якого в певних точках простору спостерігається стійке в часі посилення або послаблення результуючих коливань.

Стійку інтерференційну картину можна спостерігати лише у випадку когерентних хвиль, тобто таких, які мають однакову частоту і постійну різницю початкових фаз. Одержати когерентні світлові хвилі можна, якщо пучок світла від одного монохроматичного джерела розділити на два пучки, які спрямовуються різними шляхами, а потім знову збираються.

Умова інтерференційних максимумів: геометрична різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль):

$$\Delta d_{\max} = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Умова інтерференційних мінімумів: геометрична різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль: $\Delta d_{\min} = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$.

На практиці інтерференцію використовують для просвітлення оптики; перевірки якості шліфування поверхонь виробів і якості виготовлення лінз; здійснення точних вимірювань; отримання голографічних зображень.

? Контрольні запитання

1. Що таке інтерференція хвиль? 2. Які хвилі називають когерентними? 3. Назвіть умови максимуму й мінімуму інтерференції. 4. Чому в оптичному діапазоні важко створити джерела когерентних хвиль? ★ 5. У чому полягає фізична сутність приладів для спостереження інтерференції світла? 6. Чому тонкі плівки мають райдужне забарвлення? ★ 7. Опишіть пристрій для спостереження кілець Ньютона. 8. Як за допомогою інтерференції перевірити якість шліфування поверхонь виробів? 9. У чому полягає ефект просвітлення оптики? ★ 10. Опишіть будову інтерферометра Майкельсона. ★ 11. У чому відмінність голограми від звичайної фотографії?



Вправа № 33

1. Поясніть появу райдужних смуг при отриманні інтерференційної картини за допомогою біпризми Френеля. Чому центральний інтерференційний максимум у цьому випадку репрезентований смугою білого світла?

2. У деяку точку простору надходять когерентні світлові хвилі з геометричною різницею ходу $1,2 \text{ мкм}$. Довжина хвиль у вакуумі 600 нм . Визначте, посилення чи послаблення світла відбувається в точці, якщо світло поширюється у вакуумі; у повітрі; у воді; в алмазі.
- 3*. За рис. 44.4 визначте відстань на екрані між максимумами другого порядку для фіолетового й червоного світла, якщо відстань від уявних джерел S_1 і S_2 до екрана $1,5 \text{ м}$, а відстань між джерелами $0,50 \text{ мм}$. Вважайте, що довжина хвилі фіолетового світла в повітрі дорівнює $0,42 \text{ мкм}$, червоного — $0,70 \text{ мкм}$.
- ★ 4. В обидва плеча інтерферометра Майкельсона помістили дві циліндричні кювети завдовжки 50 мм кожна. Коли в одній з кювет повітря замінили вуглекислим газом, то інтерференційний спектр змістився на 25 смуг. Визначте показник заломлення вуглекислого газу, якщо показник заломлення повітря $1,0003$. Інтерферометр освітлювався світлом з довжиною хвилі 630 нм .