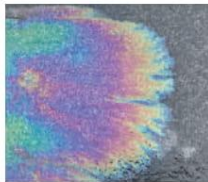


§ 30. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА



Чому мильні бульбашки райдужно забарвлені? Чому райдужно забарвлена масляна плівка на поверхні води і чому таке забарвлення дає тільки дуже тонка плівка? Пояснити це дисперсією неможливо. Не зміг пояснити це й І. Ньютон, хоча першим застосував це явище на практиці, шліфуючи лінзи набагато краще за найвідоміших майстрів свого часу. Отже, дізнаємось, що це за явище і в чому його причина.

1 Інтерференція світлових хвиль

Світло — це електромагнітна хвиля, а для будь-яких хвиль виконується *принцип суперпозиції*: якщо в певну точку простору надходять хвилі від кількох джерел, то ці *хвилі накладаються одна на одну*. Унаслідок такого накладання в деяких точках простору може відбуватися посилення коливань, а в деяких — послаблення, тобто спостерігається *явище інтерференції*.

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

З'ясуємо, що означає це явище для світла. 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 (так само додаються і вектори магнітної індукції). Результуюча напруженість характеризуватиме світлову енергію, що надходить у дану точку: чим більша напруженість, тим більшою є енергія, що надходить.

У випадку коли напрямки напруженостей полів двох світлових хвиль, що приходять у дану точку, збігаються, результуюча напруженість збільшується і в точці спостерігається максимальне збільшення освітленості. І навпаки, коли напруженості полів напрямлені протилежно, результуюча напруженість зменшується («світло гаситиметься світлом»).

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

Зверніть увагу!

Щоб у певних точках простору весь час могло відбуватися посилення або послаблення результуючих коливань, необхідне виконання двох умов, які називають **умовами когерентності хвиль**:

- 1) хвилі повинні мати однакову частоту (відповідно й довжину);
- 2) різниця $\Delta\phi$ початкових фаз хвиль має бути незмінною (хвилі, що накладаються, повинні мати незмінний у часі зсув фаз).

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

Ідеальними джерелами когерентних світлових хвиль є **лазери** — *оптичні квантові генератори*.

1. Світловий потік, який випромінюється лазером, має незмінну одну частоту (довжину хвилі), тобто є *монохроматичним* (від грец. *monos* — один, *chroma* — колір).

2. Усі електромагнітні коливання лазерного світлового потоку є синфазними (зсув фаз незмінний і дорівнює нулю).

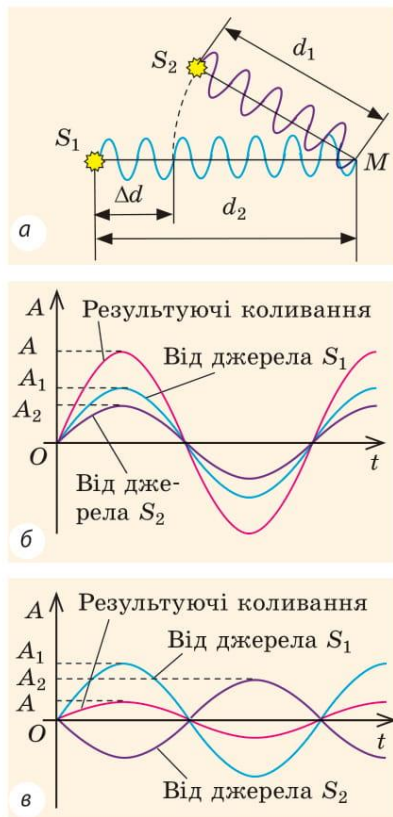


Рис. 30.1. Якщо хвилі надійшли в точку M (а) в однаковій фазі, амплітуда результатуючих коливань збільшується: $A = A_1 + A_2$ (б), а якщо хвилі надійшли в протилежних фазах, амплітуда результатуючих коливань зменшується: $A = A_1 - A_2$ (в)

Зверніть увагу!

Розв'язуючи задачі, слід враховувати, що довжина λ світлової хвилі в середовищі менша від довжини λ_0 світлової хвилі у вакуумі в n разів:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n},$$

де n — абсолютний показник заломлення середовища.

2 Умови інтерференційних максимуму та мінімуму

Розглянемо дві когерентні світлові хвилі, які виходять із джерел S_1 і S_2 в однакових фазах, поширюються в однорідному середовищі та надходять у точку M , розташовану на відстані d_1 від джерела S_1 і на відстані d_2 від джерела S_2 (рис. 30.1, а). Відстань $\Delta d = d_2 - d_1$ називають **геометричною різницею ходу хвиль**.

Коли хвилі надходять у точку M в однаковій фазі, то в точці M увесь час спостерігаються коливання зі збільшеною амплітудою — **інтерференційний максимум** (рис. 30.1, б). Це відбудеться за умови, що на відрізок Δd укладатиметься будь-яке ціле число довжин хвиль (парне число півхвиль).

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

$$\Delta d = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2},$$

де λ — довжина хвилі; k — ціле число.

Коли хвилі надходять у точку M у протилежних фазах, вони **гаситимуть одна одну** (рис. 30.1, в) — у точці M спостерігається **інтерференційний мінімум**. Це відбудеться за умови, що на відрізок Δd укладатиметься непарне число півхвиль.

Умова інтерференційного мінімуму: в даній точці простору відбувається послаблення результатуючих світлових коливань, якщо різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять у цю точку, дорівнює непарному числу півхвиль:

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

де λ — довжина хвилі; k — ціле число.

3 Як спостерігати інтерференцію світла

Якщо в кімнаті ввімкнути додаткове джерело світла, то освітленість посилиться в будь-якій точці кімнати (інтерференція не спостерігатиметься). Чому так? Річ у тім, що *спостерігати інтерференційну картину від двох незалежних джерел світла* (за винятком лазерів) *неможливо*. Причина в тому, що атоми випромінюють світло короткими імпульсами, тривалістю порядку 10^{-8} с. Фази хвиль, випромінюваних окремими атомами, хаотично змінюються. Отже, інтерференційна картина від двох незалежних джерел світла змінюється кожні 10^{-8} с. Через інерційність зору людина не може зафіксувати такі швидкі зміни інтерференційної картини (зорові відчуття на сітківці зберігаються протягом 0,1 с).

Для одержання когерентних хвиль один із засновників хвильової оптики *Томас Юнг* використав дві вузькі щілини (S_1 і S_2), які були розташовані на відстані 1 мм одна від одної і на які потрапляло світло від *одного* джерела (рис. 30.2). Джерелом слугувала ще одна щілина — S . Відповідно до принципу Гюйгенса кожна щілина (S_1 і S_2) після потрапляння світла ставала джерелом вторинних хвиль. Ці хвилі були когерентні, оскільки насправді надходили від одного джерела (S) і мали певну різницю ходу Δd (йшли до екрана, розташованого на відстані 3 м, різними шляхами). Якщо для якоїсь точки екрана різниця ходу Δd дорівнювала парному числу півхвиль, то в цій точці спостерігався максимум освітленості, якщо непарному — мінімум освітленості. Тобто Юнг спостерігав на екрані *інтерференційну картину*: чергування світлих і темних смуг у випадку монохроматичного світла та чергування райдужних смуг у випадку білого світла.

? А чому світлові пучки, що йшли від щілин, розширювались (див. рис. 30.2)? (Згадайте дифракцію механічних хвиль.)

4 Інтерференція на тонких плівках

Із проявами інтерференції світла ми часто зустрічаємось, спостерігаючи освітлення тонкої прозорої плівки (рис. 30.3). Світлова

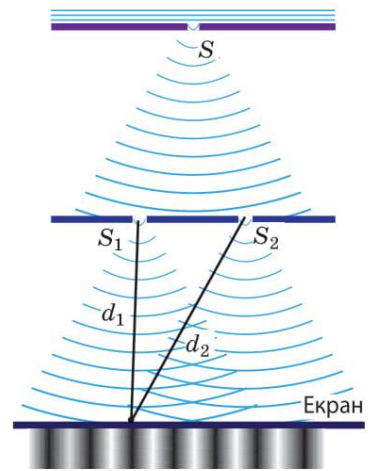


Рис. 30.2. Класичний дослід Юнга — розділення пучка світла на два когерентні пучки: щілина S — джерело світла; щілини S_1 і S_2 — вторинні когерентні джерела світла. У реальному досліді відстань між щілинами S_1 і S_2 набагато менша, ніж відстань від цих щілин до екрана

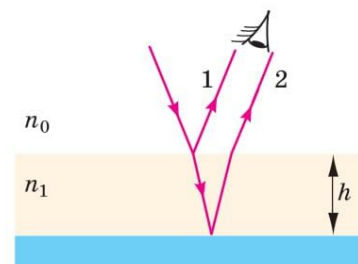


Рис. 30.3. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на тонкій прозорій плівці; n_0 — показник заломлення повітря, n_1 — показник заломлення плівки, h — товщина плівки

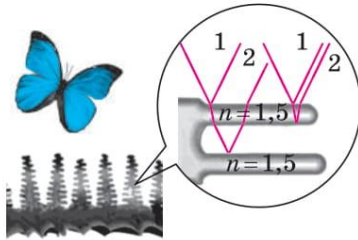


Рис. 30.4. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на крильцях метелика

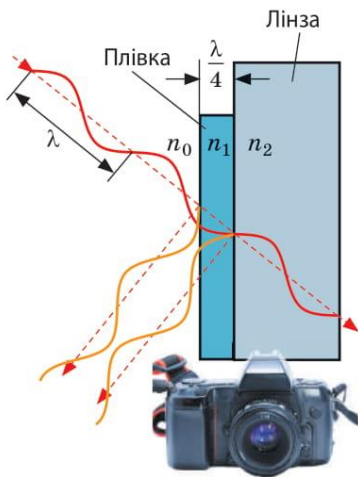


Рис. 30.5. Просвітлення оптики. Товщину плівки добирають такою, щоб за нормального падіння світла повне гасіння відбувалося для хвиль середньої частини спектра, до яких око людини найбільш чутливе. Саме тому просвітлена оптика зазвичай має бузковий колір, адже найбільше відбиваються хвилі червоної та фіолетової частин спектра

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, між ними існує різниця ходу.

Обидві хвилі когерентні, адже 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 (інтерференційний максимум), якщо на непарне — послаблення світла (інтерференційний мінімум). Саме інтерференцією світла зумовлений колір багатьох комах (рис. 30.4).

Біле світло поліхроматичне (складається з хвиль різної довжини), тому для посилення світлового випромінювання різного кольору потрібна різна товщина плівки: якщо плівка різної товщини освітлюється білим світлом, то вона виявляється райдужно забарвленою (райдужні мильні бульбашки, райдужна масляна плівка на поверхні води). Крім того, різниця ходу хвиль залежить від кута падіння світла на плівку (зі збільшенням кута падіння різниця ходу збільшується), тому тонкі плівки переливаються — змінюють колір, коли змінюється кут, під яким ми дивимося на плівку.

Зверніть увагу: якщо товщина плівки в кілька разів більша за довжину світлової хвилі, то інтерференційні смуги розташовані надто близько й око не здатне їх розділити — смуги збігаються, і ми бачимо біле світло.

5 Застосування інтерференції

Інтерференцію на тонких плівках застосовують для *просвітлення оптики*. Цей метод був відкритий українським фізиком *Олександром Теодоровичем 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 від показника заломлення матеріалу, з якого виготовлено лінзи (рис. 30.5). Товщину h плівки добирають

таким чином, щоб різниця ходу Δd променів, відбитих від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, дорівнювала півхвилі:

$$\Delta d = 2h = \frac{\lambda}{2},$$

де λ — довжина хвилі в плівці.

У такому разі у відбитому світлі виконується умова мінімуму (відбиті промені гаситимуться) і через лінзу проходитиме більше світла.

За допомогою інтерференції оцінюють *якість шліфування поверхні виробу* (рис. 30.6). Для цього між поверхнею зразка (1) і дуже гладенькою еталонною пластиною (2) створюють повітряний прошарок (рис. 30.6, а). У разі освітлення пластин монохроматичним світлом на тонкому повітряному клині між зразком і пластиною утворюється інтерференційна картина у вигляді світлих і темних смуг. Якість шліфування визначають за формою смуг: наявність нерівностей навіть порядку 10^{-8} м спричиняє викривлення інтерференційних смуг (рис. 30.6, в).

Першим цей метод застосував І. Ньютон. Використовуючи невелику еталонну лінзу, він домігся майже ідеального шліфування великих лінз і дзеркал. Роль плівки виконував повітряний прошарок між шліфувальною поверхнею й еталонною лінзою (рис. 30.7, а). Інтерференційна картина, яка виникала, мала вигляд радужних концентричних кілець, що отримали назву *кілець Ньютон* (рис. 30.7, б). Якщо лінзу освітити монохроматичним світлом, інтерференційна картина матиме вигляд світлих і темних концентричних кілець (рис. 30.7, в).

? Що спостерігав І. Ньютон, якщо на поверхні, яку він шліфував, були нерівності?

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

6 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Визначте товщину плівки на поверхні лінзи, якщо плівка розрахована на максимальне гасіння світлової хвилі довжиною 555 нм (див. рис. 30.3). Абсолютний показник заломлення плівки — 1,231.

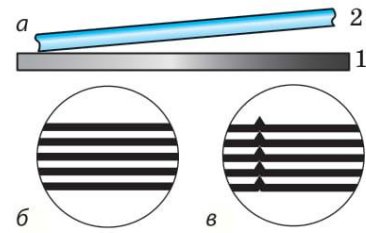


Рис. 30.6. Перевірка якості шліфування за допомогою інтерференції. Якщо зразок (1) гладенький, то інтерференційні смуги паралельні (б); якщо ж на поверхні зразка є подряпина — інтерференційні смуги викривлені в бік збільшення товщини повітряного клину (в)

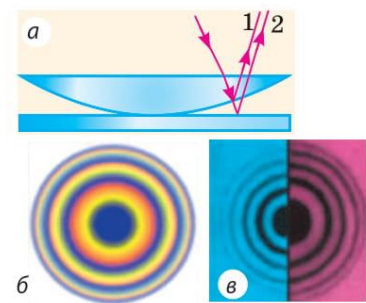


Рис. 30.7. Розділення пучка світла на два когерентні пучки на повітряному проміжку між лінзою та скляною пластиною (а). Кільця Ньютон при освітлюванні лінзи білим світлом (б); монохроматичним світлом (синім, червоним) (в)

Дано:

$$\lambda_0 = 555 \text{ нм}$$

$$n = 1,231$$

$h = ?$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. Хвилі, відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, мають гасити одна одну, тому різниця їхнього ходу відповідатиме умові мінімуму:

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

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

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

Плівки розраховують для *нормального* падіння світла, тому різниця ходу дорівнює подвійній товщині плівки: $\Delta d = 2h$. Остаточного маємо: $2h = \frac{\lambda_0}{2n} \Rightarrow h = \frac{\lambda_0}{4n}$.

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

Відповідь: $h \approx 113 \text{ нм}$.



Підбиваємо підсумки

- Для світла, як і для будь-яких інших хвиль, є характерним явище інтерференції — явище накладання хвиль, унаслідок якого в деяких точках простору спостерігається стійке в часі посилення (або послаблення) результатуючих коливань.
- Стійку інтерференційну картину можна спостерігати лише у випадку когерентних хвиль, тобто таких, які мають однакову частоту і незмінну різницю початкових фаз. Одержати когерентні світлові хвилі можна, якщо пучок світла від одного монохроматичного джерела розділити на два пучки, які спрямовуються різними шляхами. Когерентними є також хвилі, створені лазерами.
- Умова інтерференційних максимумів: різниця ходу хвиль дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль): $\Delta d = k\lambda = 2k\frac{\lambda}{2}$.
- Умова інтерференційних мінімумів: різниця ходу хвиль дорівнює непарному числу півхвиль: $\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$.
- На практиці інтерференцію використовують для просвітлення оптики; перевірки якості шліфування поверхонь виробів і якості виготовлення лінз; здійснення точних вимірювань.



Контрольні запитання

1. Дайте означення інтерференції.
2. Які хвилі називають когерентними?
3. Назвіть умову інтерференційного максимуму й умову інтерференційного мінімуму.
4. Чому в оптичному діапазоні важко створити джерела когерентних хвиль?
5. Які властивості має лазерне випромінювання?
6. Опишіть досвід Т. Юнга з отримання когерентних світлових хвиль. У чому суть його методу?
7. Чому тонкі плівки мають райдужне забарвлення?
8. У чому полягає метод просвітлення оптики за допомогою інтерференції?
9. Як за допомогою інтерференції перевірити якість шліфування поверхонь виробів?
10. Назвіть приклади виникнення інтерференційних картин у природі.



Вправа № 30

1. Чи можна спостерігати інтерференцію світлових хвиль, які випромінюють дві електричні лампи? дві свічки? дві лазерні указки?
2. Чому крильця бабки переливаються? Що можна сказати про товщину її крилець? Чому переливається внутрішня (перламутрова) частина мушлі?
3. Максимум чи мінімум інтерференції буде спостерігатися в точці M , якщо різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять у цю точку, дорівнює 0 ? дорівнює 3λ ? дорівнює $\lambda/2$?
4. У деяку точку надходять дві когерентні світлові хвилі з геометричною різницею ходу $1,2$ мкм. Довжина хвиль у вакуумі — 600 нм. Визначте, посилення чи послаблення світла відбувається в точці, якщо світло поширюється у вакуумі; повітрі; воді; алмазі.
5. Прозора скляна пластина завтовшки $0,3$ мкм освітлюється пучком монохроматичного світла довжиною 600 нм, який падає перпендикулярно до поверхні пластини. Показник заломлення пластини — $1,5$. Максимум чи мінімум інтерференції буде спостерігатися, якщо дивитися на пластину: а) у прохідному світлі (рис. 1)? б) у відбитому світлі (рис. 2)? *Зверніть увагу:* якщо світло відбивається від межі із середовищем більшої оптичної густини, то виникає додаткова різниця ходу $\lambda/2$.
6. Серед різноманітних практичних застосувань інтерференції світла одним із найцікавіших є голографія. Дізнайтесь, у чому суть голографії, як створюють голограму, які її особливості.

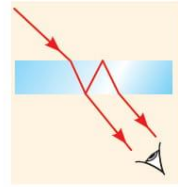


Рис. 1

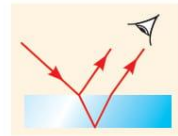


Рис. 2



Експериментальне завдання

У невеликій посудині приготуйте мильний розчин. Виготовте з дроту невелику рамку та занурте її в розчин. Обережно витягніть рамку з розчину і спостерігайте мильну плівку, що утворилася на рамці. Зарисуйте або сфотографуйте картину, яку ви спостерігаєте, та поясніть її походження.

Фізика і техніка в Україні



Олександр Теодорович Смакула (1900–1983) — видатний український фізик і винахідник. Використавши поняття квантових осциляторів, О. Т. Смакула зміг пояснити радіаційне забарвлення кристалів і вивести кількісне математичне співвідношення, відоме в науці як *формула Смакули*. Праці вченого створили передумови для синтезу вітамінів А, В₂ та ін., а процес трансформації кристалічного вуглецю називають тепер *інверсією Смакули*.

У 1935 р. О. Т. Смакула зробив відкриття, завдяки якому його ім'я назавжди залишиться в історії науки, — спосіб поліпшення оптичних пристроїв (*просвітлення оптики*). Суть відкриття в тому, що поверхню лінзи вкривають шаром спеціального матеріалу завтовшки $1/4$ довжини падаючої хвилі (десяті частки мікрометра), що значно зменшує відбивання світла від поверхні лінзи й водночас збільшує контрастність зображення. Це відкриття стало великим здобутком, адже лінзи є основним елементом більшості оптичних пристроїв (фотоапаратів, біноклів, мікроскопів тощо).

2000 р. був оголошений ЮНЕСКО роком О. Т. Смакули.