

План уроку 106

Тема: Коливальні хвилі

Тема уроку: Світло як електромагнітна хвиля.

Мета уроку ви дізнаєтесь про явища, пов'язані з хвильовою природою світла: накладання світлових хвиль, дисперсією, дифракцією та поляризацією світла й застосуванням цих явищ у науці й техніці.

ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА. Світлові хвилі випромінюються атомом. Під час випромінювання світла електрон в атомі переходить з вищого на нижчий енергетичний рівень (рис. 21.1). Електромагнітна хвиля, яка випромінюється при цьому, є монохроматичною, тобто має певну сталу частоту.

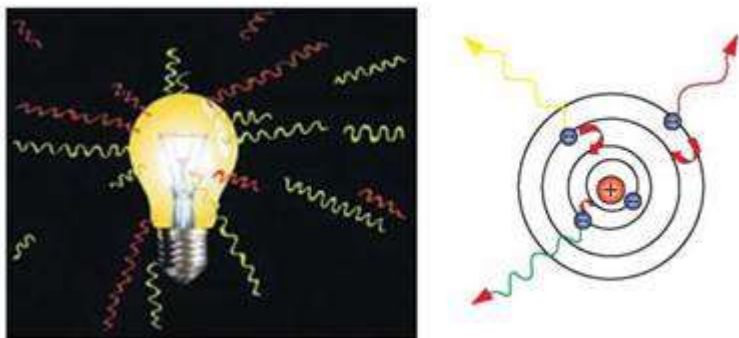
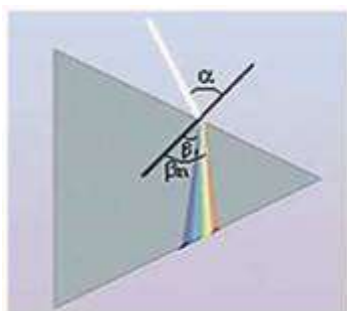


Рис. 21.1. Випромінювання світла атомом

У вакуумі світлові хвилі різних довжин хвиль (частот) поширюються з однаковою швидкістю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Під час проходження світлом границі розподілу середовищ швидкість світлової хвилі змінюється, внаслідок чого відбувається явище заломлення. Виявляється, кожна монохроматична хвиля має свою певну швидкість поширення в середовищі (v). Виходячи із закону заломлення світла

$$(\sin \beta = v \frac{\sin \alpha}{c}),$$

кожній монохроматичній хвилі відповідає певний кут заломлення β (рис. 21.2), а відповідно, і свій показник заломлення.



α — кут падіння білого променя;
 $\beta_1, \dots, \beta_n$ — кут заломлення монохроматичних променів

Рис. 21.2. Залежність кута заломлення монохроматичної хвилі від швидкості світла в середовищі

Пригадайте. Подібні міркування вперше практично підтвердив у 1666 р. Ісак Ньютон, досліджуючи проходження вузького пучка сонячного світла крізь скляну призму. В різнокольоровій смугі (спектрі) спостерігався поступовий перехід від червоного до фіолетового кольору. І. Ньютон виділив сім основних кольорів одержаного спектра: червоний, помаранчевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий.

Дисперсія світла — залежність показника заломлення світла в середовищі від довжини або частоти світлової хвилі.

Під час переходу монохроматичної хвилі через межу розподілу середовищ частота цієї хвилі лишається сталою. Skorиставшись зв'язком між швидкістю електромагнітної хвилі, її частотою і довжиною ($c = \lambda \nu$), одержимо залежність між показником заломлення та довжиною хвилі:

$$n = \frac{\lambda_{\text{вакуум}} \nu}{\lambda_{\text{речовина}} \nu} = \frac{\lambda_{\text{вакуум}}}{\lambda_{\text{речовина}}}.$$

Складною структурою білого світла можна пояснити велику різноманітність кольорів у природі. Якщо предмет, наприклад аркуш паперу, відбиває всі промені різних кольорів, то він здаватиметься білим. Трава і листя дерев здаються нам зеленими тому, що з усіх компонентів падаючого білого світла вони відбивають лише зелені, поглинаючи решту. Якщо подивитись на траву крізь червоне скло, то трава здаватиметься майже чорною. Червоні промені мають більшу довжину хвилі й розсіюються в повітрі слабше, ніж промені іншого кольору, тому вони проходять на більші відстані, ніж інші. Як наслідок, сигнал небезпеки у світлофорі є червоним.

Відчуття того чи іншого кольору, яке виникає в очах спостерігача, залежить від частоти світлової хвилі, а не від її довжини. Оскільки під час переходу електромагнітної хвилі з одного середовища в інше її частота лишається незмінною, колір, який сприймається людиною в повітрі та, наприклад, у воді, буде однаковим.

Розглянемо ще одне явище, яке можна пояснити хвильовими властивостями.

ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА. Світлова хвиля є поперечною. У пучку природних світлових хвиль коливання вектора напруженості відбувається в усіх напрямках відносно напрямку поширення світлового пучка.

Хвиля, в якій вектор напруженості електричного поля E та, відповідно, вектор індукції магнітного поля B , коливаються тільки в одній площині, перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, є плоскополяризованою.

Природне світло є неполяризованим. Той факт, що в неполяризованому світлі коливання векторів напруженості електричного поля та індукції магнітного поля відбувається в різних площинах, можна пояснити і великою кількістю атомів у речовині, і тим, що кожен із них випромінює свою поляризовану хвилю.

Отримати плоскополяризовану світлову хвилю можна за допомогою поляроїда, наприклад, кристала турмаліну, що завдяки своїй внутрішній будові пропускає хвилі, в яких коливання вектора напруженості відбуваються тільки в одній певній площині (рис. 21.3).

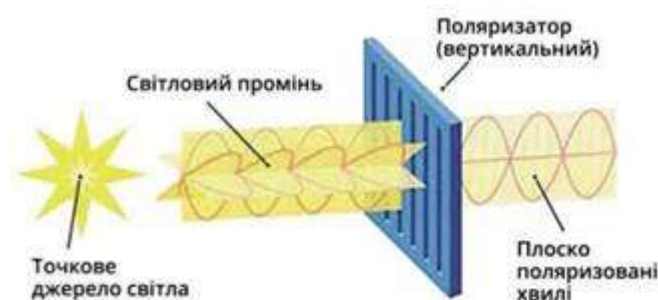


Рис. 21.3. Одержання плоскополяризованої хвилі

Розглянемо рис. 21.4. Якщо скористатися двома поляроїдами, то за умови паралельності їх площин поляризації яскравість свічки буде максимальною (рис.21.4, а). Під час повороту одного поляроїда відносно іншого яскравість свічки зменшується (рис. 21.4, б). При розташуванні щілин (площин поляризації) взаємно перпендикулярно крізь другий поляроїд світло від свічки не проходить (рис.21.4, в).

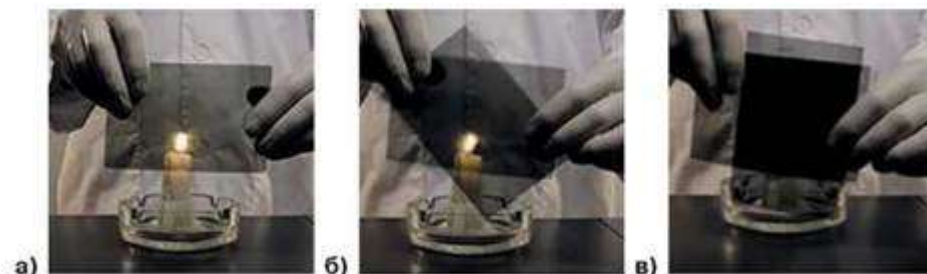


Рис. 21.4. Дослідження поляризації світла

Явище поляризації набуло широкого використання. Наприклад, поляризаційні окуляри, що стримують різкий спалах світла й можуть захистити очі під час зварювання металів. Поляризаційні окуляри, що створюють ілюзію об'ємності, використовують у стереокіно. Поляроїди також широко застосовують для зменшення відблиску від полірованих поверхонь та скла.

ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА. Подібно до механічних хвиль світлові хвилі можуть взаємодіяти між собою. Взаємодія хвиль є загальною властивістю хвиль будь-якої природи. Доволі часто для характеристики явища інтерференції використовують таку парадоксальну фразу: світло плюс світло може давати темряву. Здавалося б, якщо до світла додати світло, то має бути ще світліше.

Звичайно, якщо посвітити спочатку одним світлодіодним ліхтариком на білий екран, а потім двома, то темряви ми не одержимо. Проте, якщо взяти аркуш цупкого картону, проколоти в ньому голкою два маленькі отвори на відстані до 1 мм і розташувати його на відстані 20—30 см перед екраном, то посвітивши на ці отвори одним із ліхтариків і трохи відрегулювавши відстань між ліхтариком та картоном, можна знайти положення, коли на екрані світлі ділянки будуть межувати з темними (рис. 21.5). Отже, в одних ділянках простору світлові хвилі, накладаючись, підсилюють одна одну, в інших — послаблюють.

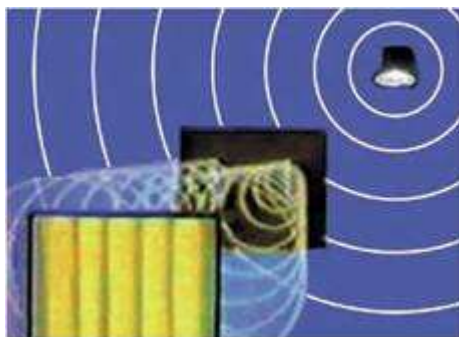


Рис. 21.5. Схема накладання світлових хвиль

Явище накладання хвиль, внаслідок якого спостерігається стійке в часі підсилення або послаблення результуючих коливань у різних точках простору, називають *інтерференцією* (від лат. *inter* — взаємно та *ferio* — дію, ударяю). Стійка у часі

інтерференційна картина може спостерігатися тільки під час накладання взаємопов'язаних хвильових коливань, які називають когерентними хвилями (від лат. *cohaerens* — той, що перебуває у зв'язку).

Когерентні хвилі — хвилі з однаковою частотою, поляризацією і сталою різницею фаз.

Світло випромінюється атомами речовини переривчасто, у вигляді окремих короткочасних імпульсів, які називають *цугами хвиль*. Тривалість випромінювання одного цуга 10^{-8} с. За цей час світлова хвиля встигає поширитися на відстань 0,3—3 м. Переривчаста структура світлового випромінювання ускладнює спостереження явища інтерференції. Необхідно зробити так, щоб інтерферували хвилі одного й того ж цуга внаслідок розділення початкового променя світла на два.

З цією метою використовують спеціальні оптичні прилади, наприклад, дзеркала Ллойда, які розділяють світловий потік і спрямовують відбиті світлові промені в певну точку (Р) де вони інтерферують (рис. 21.6, а) та біпризму Френеля (рис. 21.6, б), в якій інтерферують промені, що заломлюються призмою.

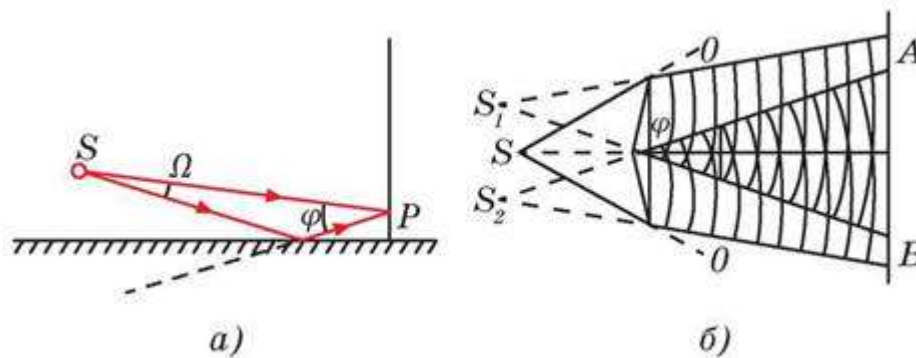


Рис. 21.6. Способи розділення світлового потоку: а) дзеркала Ллойда; б) біпризма Френеля

Спробуємо з'ясувати умови, за яких у певних точках простору утворюється світла чи темна ділянка. Нехай світлові хвилі однаково поляризовані та мають амплітудні значення напруженості, відповідно, E_1 і E_2 . Результуюче коливання має максимально можливе значення $E_m = E_1 + E_2$ у випадку запізнення хвилі з джерела S_2 порівняно з хвилею від джерела S_1 на час кратний періоду T . Це можливо за умови, коли різниця відстаней (різниця ходу хвиль $\Delta d = d_2 - d_1$) від джерел S_1 та S_2 до точки М (рис. 21.7, а), буде дорівнювати:

$$\Delta d = m\lambda, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$$

Цю умову називають умовою максимумів.

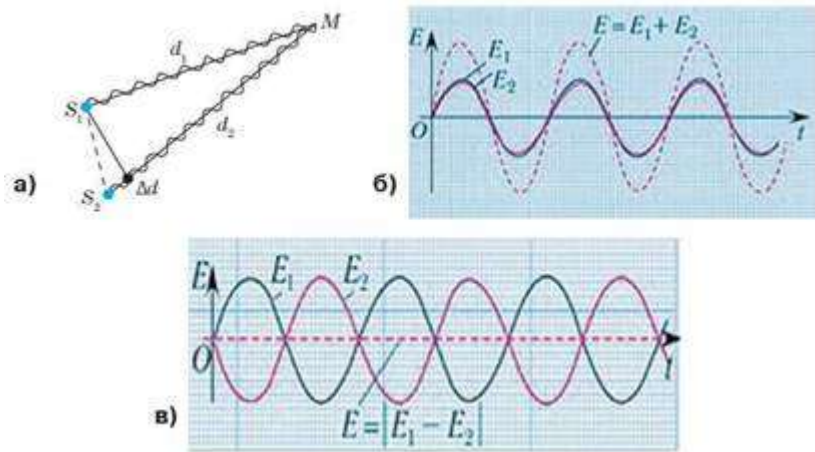


Рис. 21.7. Накладання світлових хвиль

Отже, *максимальна результуюча інтенсивність під час інтерференції когерентних хвиль у певній точці простору відбувається за умови запізнення хвиль одна відносно одної на час, кратний періоду цих коливань* (рис. 21.7, б):

$$\Delta t_{\max} = m \cdot T, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Коли ж у точці М результат додавання векторів напруженості E_1 і E_2 дорівнює нулю, тобто світлові хвилі взаємознищуються, спостерігається мінімум освітленості — темна ділянка. Це можливо за умови, коли різниця відстаней від джерел світла до точки М буде:

$$\Delta d = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Цю умову називають умовою мінімумів.

Мінімальна результуюча інтенсивність під час інтерференції когерентних хвиль у певній точці простору відбувається під час запізнення хвиль одна відносно одної на час, що дорівнює непарному числу півперіодів цих коливань (рис. 21.7, в):

$$\Delta t_{\min} = (2m + 1)T/2, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Варто зазначити, що в усіх інших точках накладання хвиль амплітуда результуючих коливань має проміжне значення $E_{\min} \leq E \leq E_{\max}$. Повна енергія світлових хвиль, що потрапляють на екран, не залежить від того, чи є світлові хвилі когерентними. Якщо джерела світла є некогерентними, енергія світла розподіляється рівномірно по екрану. За умови їх когерентності енергія концентрується в місцях максимумів, при цьому вона не зникає, а лише перерозподіляється, не змінюючи свого середнього значення. Отже, суперечність із законом збереження енергії не виникає.



Вітчизняні вчені також зробили внесок у дослідження явища інтерференції світла. Один з найвидатніших українських фізиків XX століття Олександр Смакула, винахід якого під назвою «просвітлення оптики» — те, чим користується нині весь світ, — наука визнала епохальним відкриттям.

Українські науковці беруть активну участь у дослідженнях голографічних зображень. Американський проект Bleep, заснований українцями Богданом Шевчуком та Олегом Коханом, розробляє перший у світі гаджет для показу голограм, орієнтований на масовий ринок.

Явище інтерференції світла використовується під час створення голографічних зображень. Голографія — одержання об'ємних зображень предметів на фотопластинці за допомогою когерентного випромінювання лазера.

ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА. Ще одним явищем, яке доводить хвильові властивості світла, є його дифракція. Дифракцією називають явище відхилення світла від прямолінійного напрямку поширення під час проходження поблизу перешкод. Як показує досвід, світло може заходити в ділянку геометричної тіні. Якщо на шляху поширення паралельного світлового пучка розташувати непрозорий екран або кульку (диск) з отвором, то на другому екрані, що розміщений на досить великій відстані від перешкоди, з'являється дифракційна картина — система світлих і темних кілець, що по чергово змінюються (рис. 21.8, а, в). Якщо ж отвір лінійний, то на екрані утвориться система паралельних дифракційних смуг (рис. 21.8, б).

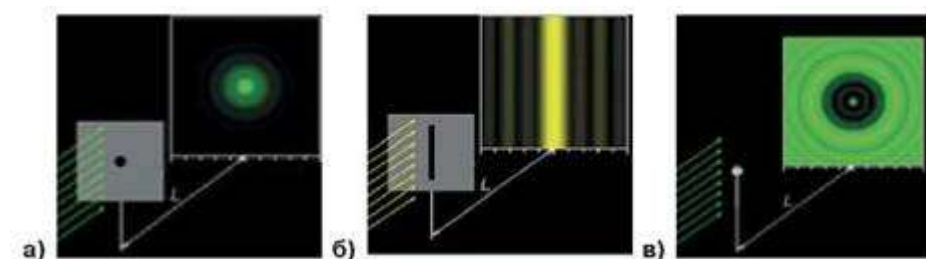


Рис. 21.8. Дифракція світла: а) на отворі; б) на щілині; в) на кульці

Спостерігати явище дифракції світла можна лише за певних умов. Теорія дифракції світла була розроблена в 1816 р. французьким вченим Огюстеном Френелем, який розвинув ідеї Гюйгенса.

Відповідно до принципу, сформульованого Френелем (принцип Гюйгенса — Френеля) збудження в кожній точці простору є результатом інтерференції когерентних вторинних хвиль, які випромінює кожна точка середовища, до якої дісталася хвиля.

Відповідно до принципу Гюйгенса — Френеля, хвиля довжиною λ , стикаючись з перешкодою (неоднорідностями) розміром d , що міститься на відстані L від джерела за умови

$$d \leq \sqrt{L\lambda}$$

«ділиться» на декілька когерентних хвиль, які в результаті накладання (інтерференції) утворюють стійку в часі картину розподілу максимумів і мінімумів коливань.

Під час спостереження явища дифракції білого світла його складові — монохроматичні хвилі, стикаючись із поверхнею перешкод, відхиляються від початкового напрямку на певні кути і створюють у відповідних місцях ділянки максимумів і мінімумів результуючих

коливань. Тому під час дифракції білого світла можна спостерігати сукупність різнокольорових зон.

Відповідно до принципу Гюйгенса — Френеля *кожна точка перешкоди, до якої дісталася хвиля, випромінює вторинні хвилі, які є когерентними, тому отримані внаслідок дифракції хвилі інтерферують між собою*. На явищі дифракції ґрунтується будова оптичного приладу — дифракційної ґратки, що є сукупністю прозорих і непрозорих проміжків, тобто сукупність щілин, розділених непрозорими проміжками (рис. 21.9, а). Кількість «штрихів» на 1 мм може становити 100 000. Величину, що дорівнює сумі ширини прозорого і непрозорого проміжку, називають періодом дифракційної ґратки d .

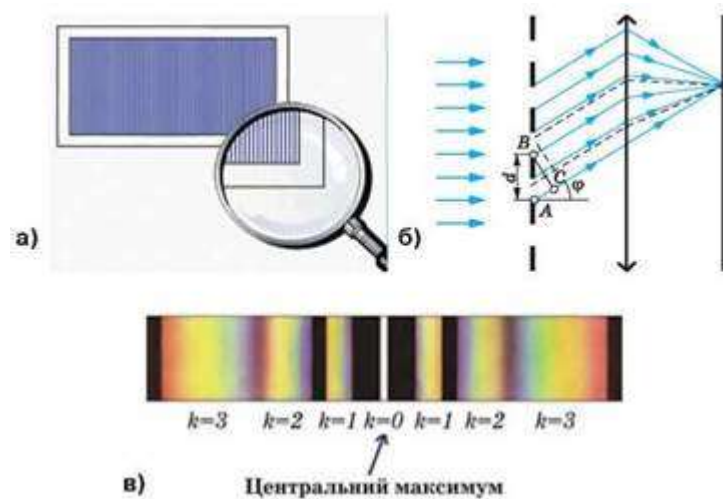


Рис. 21.9. Дифракційна ґратка: а) дифракційна ґратка є сукупністю прозорих і непрозорих проміжків; б) утворення дифракційного максимуму; в) дифракційний спектр

Нехай на дифракційну ґратку перпендикулярно до її площини падає монохроматичне світло (рис. 21.9, б). Кожна щілина є джерелом вторинних когерентних хвиль. У результаті накладання хвиль, створюваних щілинами, спостерігається інтерференційна картина. Головні максимуми будуть спостерігатися під кутами ϕ , що задовольняють умову:

$$d \cdot \sin \phi = k\lambda, \text{ де } k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

З рис. 21.9, в видно, що величина k визначає порядок спектра (номер спектральної лінії, починаючи від центрального максимуму). Виходячи зі сказаного, дифракційну ґратку можна використовувати для вимірювання довжини світлової хвилі.

! Головне в цьому параграфі

Підтвердженням хвильової природи світла є явища: інтерференції (накладання світлових хвиль), дисперсії (залежність показника заломлення від довжини світлової хвилі), дифракції (відхилення світла від прямолінійного напрямку поширення під час проходження поблизу перешкод) та поляризації; ці явища мають широке застосування в науці й техніці.

? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. У зошиті написано червоним кольором оцінку «12». Є два скельця — зелене і червоне. Крізь яке скельце треба дивитися, щоб побачити цю оцінку? 2. Чому тільки досить вузький світловий пучок після проходження крізь призму дає спектр, а в широкого пучка забарвленими виявляються лише краї? 3. Яке світло називають поляризованим? 4. Яке світло називають природним? 5. За допомогою якого досліду можна довести поперечність

світлових хвиль? 6. Як довести, що світло, відбите від поверхні води, є частково поляризованим? 7. Чим пояснити розкладання світла на кольорові промені? 8. Чому ми бачимо предмети різнокольоровими?

Вправа до § 21

1. Вкажіть означення дисперсії:

- А. Накладання когерентних хвиль.
- Б. Розкладання світла в спектр під час заломлення.
- В. Перетворення природного світла в плоскополяризоване.
- Г. Огинання хвилею перешкод.

2. Яке явище безпосередньо пов'язане з поперечністю світлових хвиль?

- А. Дисперсія.
- Б. Інтерференція.
- В. Дифракція.
- Г. Поляризація.

3. Дві світлові хвилі є когерентними, якщо...

- А. $v_1 = v_2$.
- Б. $\Delta\varphi = 0$.
- В. $\Delta\varphi = \text{const}$.
- Г. $v_1 = v_2, \Delta\varphi = \text{const}$.

4. Можливості оптичних мікроскопів обмежені, внаслідок явища.

- А. поляризації;
- Б. дифракції;
- В. інтерференції;
- Г. дисперсії.

5. Якби випромінювання Сонця було монохроматичним, наприклад червоним, то якими б здавалися різнокольорові тіла на Землі?

- А. червоними;
- Б. сірими і червоними;
- В. різнокольоровими;
- Г. чорними і червоними.

6. Через дифракційну ґратку, що має 200 штрихів на міліметр, проходить монохроматичне випромінювання з довжиною хвилі 750 нм. Визначте кут, під яким видно максимум першого порядку цієї хвилі.

7. На дифракційну ґратку нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 610 нм. На екрані, розташованому на відстані 2 м від ґратки, відстань між другим і третім максимумами становить 8,7 см. Знайдіть період дифракційної ґратки.

8. Довжина хвилі когерентних світлових хвиль від джерел А і В дорівнює 500 нм. Яким є результат інтерференції світла в точці відрізка АВ, розташованій на відстані 0,125 мкм від середини цього відрізка?

9. Частота світлових коливань дорівнює $4 \cdot 10^{14}$ Гц. Визначте довжину хвилі цього випромінювання в алмазі. Абсолютний показник заломлення алмазу 2,42.