

УДК 53:378.14 (078.5)
ББК В30я7
К 903

Тиражувати без офіційного дозволу НАУ забороняється

Рецензенти:

Ю. І. Горобець, д-р фіз.-мат. наук, чл.-кор. АПН України
(Національний технічний університет України «КПІ»),
Л. В. Поперенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.
(Національний університет ім. Тараса Шевченка)
О. Д. Альохін, д-р фіз.-мат. наук, проф.
(Національний університет ім. Тараса Шевченка)

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(Лист № 1.4/18-Г-366 від 04.07.2006)*

Куліш В.В., Соловійов А.М., Кузнєцова О.Я.
К 903 Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система:
Навч. посібник. — У 4 ч. — М. III. Коливання і хвилі. Оптика. — К.: Книж-
кове вид-во НАУ, 2007. — 173 с.
ISBN 966-598-269-9
ISBN 978-966-598-389-7 (Модуль 3)

Пропонований посібник — навчально-методичний комплекс робочих матеріалів, створений для забезпечення впровадження кредитно-модульної системи безпосередньо в студентську аудиторію. Увесь матеріал даного комплексу розбито на навчальні модулі. При цьому для кожного модуля подано мінімально необхідний лекційний матеріал (теоретичне ядро), де вказано, яку його частину призначено для аудиторного вивчення, а яку — для самостійної роботи, розміщено повноцінні задачі з текстами задач за темами кожного предметного елемента та з прикладами розв'язання, списки тестових запитань для поточного (предметно-елементного) і модульного контролю, описи реальних та віртуальних лабораторних робіт тощо.

Матеріал кожного модуля у даному комплексі подано у формі окремого тому. Тобто, у випадку чотирьох-модульного, як у нашому базовому варіанті, курсу фізики, увесь вказаний матеріал складає зміст чотирьох окремих томів. Однак, у разі необхідності, даний комплекс може бути використано також і у випадку шести-модульного (три-семестрового) варіанту курсу.

Комплекс відповідає чинній навчальній програмі й рекомендований Міністерством освіти і науки України для студентів інженерних спеціальностей та викладачів.

УДК 53:378.14 (078.5)
ББК В30я7

ISBN 966-598-269-9
ISBN 978-966-598-389-7 (Модуль 3)

© В.В. Куліш, А.М. Соловійов,
О.Я. Кузнєцова, 2007
© НАУ, 2007

Навчальне видання

КУЛІШ Віктор Васильович
СОЛОВІЙОВ Андрій Миколайович
КУЗНЄЦОВА Олена Яківна

Фізи́ка
для інженерних спеціальностей
КРЕДИТНО-МОДУЛЬНА СИСТЕМА

Навчальний посібник

У чотирьох частинах

Модуль III. Коливання і хвилі. Оптика

Художник обкладинки *Т. Зябліцева*
Верстка *Ж. Марковського*

Підп. до друку 17.07.07. Формат 84×108/16. Папір офсет. № 1.
Гарнітура Тип Таймс. Друк офсет. Ум. друк. арк. 24,36.
Обл.-вид. арк. 16,55. Наклад 1500 пр. Зам. № 07-178.

Книжкове видавництво Національного авіаційного університету
03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи (серія ДК, № 977 від 05.07.2002)
Тел./факс (044) 406-71-33; Тел. 406-78-33
E-mail: publish@nau.edu.ua

Друк ПП «Гарант Сервіс»
03067, м. Київ, вул. Машинобудівна, 46
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи (серія ДК, № 1256 від 10.02.2003) Тел./факс (044) 206-20-75; 206-20-76

ВСТУП

Що таке світло? Чому ми бачимо і біле світло, і різнокольорове? Такі і багато інших запитань постають тому, що природа створила людину так, що вона не може існувати без світла.

Ще Піфагор і Декарт намагалися пояснити утворення і поширення світла в просторі. Піфагор вважав, що тіла стають видимими завдяки тому, що вони випускають маленькі частинки, які потрапляють в око спостерігача. Декарт розглядав світло як результат стиснення, що поширюється в ідеальному пружному ефірі, який заповнює світовий простір і проміжки між частинками тіл. Однак найбільш послідовні дослідження оптичних явищ належать І. Ньютону і викладені в його книзі «Оптика» (1704). Експериментальні дослідження Ньютона в оптиці до XIX сторіччя лишалися неперевершеними. Його книга була основним джерелом, яким користувалися всі підручники того часу. Але до питання про природу світла Ньютон ставився дуже обережно і все ж таки схилився до корпускулярних уявлень про його природу. Далі історична ситуація розвивалася за законами доброго детективу. На початку XIX сторіччя завдяки працям Юнга і, особливо, Френеля хвильові уявлення про природу світла починають домінувати у фізиці. У 60-х роках XIX сторіччя Максвелл установив загальні закони електромагнітного поля, за допомогою яких він зробив висновок, що світло — це електромагнітні хвилі. А після дослідів Герца електромагнітна природа світла запанувала у фізиці. І вже на початку XX сторіччя фізика світла стає хвильовою. І це, здавалося б, мало остаточно спростувати концепцію Ньютона щодо корпускулярної природи світла.

Проте наприкінці XIX — на початку 20 сторіччя було проведено серію експериментів із вивчення фізичних явищ типу *фотоелектричного ефекту*. Результати їх узагальнив А.Ейнштейн. Як наслідок, було сформульовано, по суті, сучасну версію *корпускулярної* природи світла. Було доведено, що в окремих фізичних ситуаціях світло поводить себе як потік частинок — *фотонів*. Отож Ньютон все ж таки мав рацію, вважаючи світло потоком корпускул. Але постала інша проблема — а

як розуміти експерименти Юнга, Френеля та інших, які наочно демонстрували хвильову природу світла. Або, інакше кажучи, що таке світло: хвиля чи частинки? Відповідь сучасної фізики звучить парадоксально: і хвиля і частинки. Цей парадокс було названо *дуалізмом*. Тобто світло має подвійну природу. При цьому в одних ситуаціях переважає його хвильова природа, в інших — корпускулярна. Зрештою вся наука про світло розпалась на дві великі частини. Перша з них — це класична *хвильова оптика*. Друга — *квантова оптика*.

Але в природі існують не тільки електромагнітні хвилі, а ще й механічні. До них належать звукові коливання і пов'язані з ними звукові хвилі, які ми можемо утворювати, наприклад під час розмови. Виявляється, що хвилі різної фізичної природи характеризуються спільними властивостями, такими як інтерференція та дифракція. Ці факти доводять єдність законів природи. Наслідком цієї єдності стає парадоксальний висновок: хвильові властивості притаманні й частинкам звичайної речовини! Це дивовижне положення було підтверджено експериментально, коли в 1927 році Девісон і Джермер відкрили дифракцію електронів на кристалічній решітці.

Отже, питання: «Що таке світло?» — частина загальної проблеми про будову речовини. Далі в цьому розділі, розглядатимемо лише хвильову оптику.

7. ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛОВИХ ХВИЛЬ

Електромагнітні хвилі залежно від довжини хвилі або частоти групують згідно з так званою **шкалою електромагнітних хвиль**:

γ - промені	$< 0,01 \dots 800 \text{ \AA}$	Ультрафіолетові промені	$< (3900-7500) \text{ \AA}$	$< 1 \dots 2 \text{ мм}$	Радіохвилі
	Рентгенівські Промені		Видимі промені, або світло		Інфрачервоні промені

Природа створила людину так, що електромагнітні хвилі, довжина яких від 3900 до 7500 \AA сприймаються людським оком, тобто ми їх бачимо. Тому цей діапазон довжин хвиль назвали **світлом**. Для вимірювання довжини хвилі світла в оптиці існує спеціальна одиниця — **Ангстрем**, що позначається \AA , $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$. Ультрафіолетові (у/ф), видимі та інфрачервоні промені утворюють разом **оптичний** діапазон електромагнітних хвиль. При цьому жодних різких переходів від одного виду випромінювання до іншого не існує, хоча електромагнітні хвилі різних довжин хвиль мають як схожі, так і відмінні властивості.

Хвильове рівняння для світлових хвиль має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}.$$

Фазова швидкість світлової хвилі в будь-якому середовищі визначається так:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}.$$

Для вакуума $\varepsilon = 1$ і $\mu = 1$, тоді фазова швидкість світла в вакуумі стала і дорівнює $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Отже, світлові хвилі на відміну від звукових (механічних) поширюються як у середовищі, так і у вакуумі.

Для плоскої світлової хвилі, яка поширюється вздовж осі x , перпендикулярної до напрямку поширення фронту хвилі, рівняння Максвелла мають вигляд:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad \text{і} \quad \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t};$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad \text{і} \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t};$$

$$\mu \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial x} = 0 \quad \text{і} \quad \mu \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = 0;$$

$$\varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial x} = 0 \quad \text{і} \quad \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} = 0.$$

Із цих рівнянь випливає, що вздовж осі Ox світлова хвиля не збуджується. Тобто електричне поле, створюване вздовж осі Oy , збуджує магнітне поле вздовж осі Oz і навпаки. **Світлові хвилі, звичайно, — поперечні.** (рис.7.1). Ці вектори утворюють правогвинтову систему: із кінця вектора v поворот на найменший кут від вектора \vec{E} до вектора \vec{H} бачимо проти годинникової стрілки.

Вектор \vec{E} перпендикулярний до вектора \vec{H} і перпендикулярний до вектора швидкості v поширення світлових хвиль

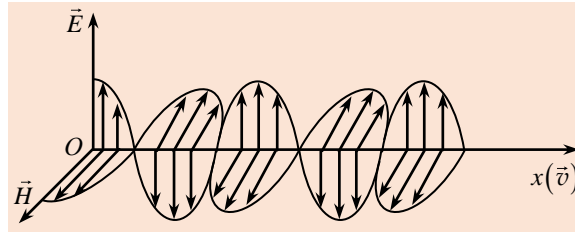


Рис. 7.1

Хвильове рівняння плоскої світлової хвилі, яка поширюється вздовж осі Ox , має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_y}{\partial x^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}_y}{\partial t^2};$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}_y}{\partial x^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}_y}{\partial t^2}.$$

Світлова хвиля називається **монохроматичною**, якщо проєкції векторів \vec{E} і \vec{H} на осі координат виконують гармонічні коливання однакової частоти, яка називається **частотою хвилі**. Для плоскої монохроматичної хвилі, поширюваної вздовж додатного напрямку осі Ox рівняння хвилі має вигляд:

$$E_y = A \sin(\omega t - kx + \alpha),$$

$$H_z = A \sin(\omega t - kx + \alpha).$$

У загальному випадку кінець вектора \vec{E} в кожній точці електромагнітного поля описує еліпс, який лежить у площині, перпендикулярній до осі Ox . Рівняння цього еліпса має вигляд:

$$\frac{E_y^2}{A_1^2} + \frac{E_z^2}{A_2^2} - \frac{2E_y E_z}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1).$$

де $(\varphi_2 - \varphi_1)$ — різниця фаз

Кінець вектора \vec{H} також описує еліпс, який лежить у тій самій площині, але повернутій навколо осі Ox на кут $\pi/2$. Така світлова хвиля називається **еліптично поляризованою**. Якщо $(\varphi_2 - \varphi_1) = \pm n\pi$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), то еліпс вироджується у два взаємно перпендикулярні відрізки прямої лінії. Така хвиля називається **лінійно поляризованою**. Отже, для лінійно поляризованої хвилі маємо:

$$E_y = E, E_z = 0, H_y = 0, H_z = H = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} E.$$

Рівняння лінійно поляризованої світлової хвилі таке:

$$E_y = A \cos(\omega t - kx + \alpha),$$

$$H_z = A \cos(\omega t - kx + \alpha).$$

Досліди показали, що фізіологічні, фотохімічні, фотоелектричні та інші дії світлових хвиль спричинені коливаннями вектора напруженості електричного поля світлової хвилі, тому надалі про вектор напруженості магнітного поля світлової хвилі не йтиметься.

Відношення швидкості світлової хвилі у вакуумі до фазової швидкості світла в будь-якому середовищі, називається **абсолютним показником заломлення** цього середовища і позначається

$$n = \frac{c}{v}.$$

А оскільки

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}},$$

то показник заломлення середовища

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}.$$

Для багатьох середовищ магнітна проникність $\mu = 1$, а тому відповідний показник заломлення

$$n = \sqrt{\varepsilon}.$$

Значення показника заломлення середовища характеризує оптичну густину середовища. Чим більше n , тим оптично густіше середовище.

Коли світлова хвиля переходить з одного середовища в інше, її частота не змінюється, змінюється швидкість поширення світла і довжина хвилі світла.

Частота світлової хвилі визначається за формулою:

$$\nu = \frac{c}{\lambda_0},$$

де λ_0 – довжина хвилі світла у вакуумі.

Коли світло поширюється в середовищі, його частота

$$\nu = \frac{v}{\lambda},$$

де λ – довжина хвилі світла в середовищі.

Із цих формул можна встановити зв'язок між довжиною хвилі світла у вакуумі і в середовищі:

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

Частота світлових хвиль становить $(0,39 \dots 0,76) \cdot 10^{15}$ Гц. Світло різних частот людина розрізняє як світло різних кольорів.

7.1. ФАЗОВА ШВИДКІСТЬ СВІТЛА

Припустимо, що фаза хвилі в момент часу t залишається сталою:

$$(\omega t - kx + \alpha_0) = \text{const.}$$

Продиференціювавши це рівняння за x і за t , дістанемо швидкість поширення хвилі v :

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu,$$

де ν — частота хвилі.

Швидкість v — це швидкість переміщення даного значення фази, і вона збігається зі швидкістю поширення хвилі. Тому цю швидкість називають **фазовою швидкістю** хвилі.

7.2. ГРУПОВА ШВИДКІСТЬ ХВИЛІ

Досі ми розглядали монохроматичну хвилю, яку легко уявити у вигляді косинусоїди, що біжить із фазовою швидкістю.

З таким самим успіхом у середовищі може поширюватися й одиночне збудження будь-якої форми, наприклад, у вигляді прямокутного імпульсу або серії імпульсів.

Відомо, що будь-яка періодична функція може бути розкладена в ряд Фур'є. Тому імпульс довільної форми, який поширюється, може бути замінений системою гармонічних хвиль різних частот.

У такому разі кажуть про ГРУПУ ХВИЛЬ, або ХВИЛЬОВИЙ ПАКЕТ. У хвильовому пакеті можуть бути представлені або хвилі окремих дискретних частот, або спектр частот може бути неперервним.

Швидкість поширення хвильового пакета, або групи хвиль, називається ГРУПОВОЮ ШВИДКІСТЮ.

На перший погляд не ясно, навіщо потрібно вводити поняття групової швидкості, адже ж ми раніше встановили, що фазова швидкість хвилі залежить тільки від властивостей середовища і вона має бути однаковою для хвиль будь-яких частот.

На жаль, досліди, які були проведені з хвилями високих частот, показали, що швидкість хвилі може залежати від її частоти або довжини.

Залежність фазової швидкості хвилі від частоти називається ДИСПЕРСИЄЮ.

Середовища, в яких спостерігається явище дисперсії, називаються ДИСПЕРГУЮЧИМИ.

Будемо шукати формулу для групової швидкості і формулу, яка зв'яже групову і фазову швидкості на прикладі одночасного поширення тільки двох хвиль із різними, але близькими частотами.

Рівняння першої хвилі:

$$E_1 = A \cos(\omega t - kx).$$

Рівняння другої хвилі:

$$E_2 = A \cos[(\omega + d\omega)t - (k + dk)x].$$

Згідно з принципом суперпозиції

$$E = E_1 + E_2 = 2A \cos\left(\frac{d\omega t - dkx}{2}\right) \cos(\omega t - kx).$$

Формула нагадує формулу додавання двох гармонічних коливань із близькими частотами. Там амплітуда сумарного коливання сама здійснювала гармонічні коливання, частота яких визначалась як різниця частот початкових коливань. Це була частота биття.

А тут амплітуда хвилі — це теж хвиля, частота якої дорівнює різниці частот $d\omega$, а хвильовий вектор дорівнює різниці хвильових векторів вихідних хвиль dk .

Нагадаємо, що фазова швидкість дорівнює відношенню частоти до хвильового числа

$$v = \frac{\omega}{k}.$$

Тому швидкість поширення амплітуди сумарної хвилі слід обчислювати, як відношення різниці частот $d\omega$ до різниці хвильових векторів dk

$$u = \frac{d\omega}{dk}.$$

Це і є **групова швидкість хвилі**. Оскільки

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi v}{\lambda}, \quad \text{а} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda},$$

то

$$u = \frac{d\omega}{dk} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

Це і є зв'язок **фазової і групової швидкостей**.

Оскільки $v = \frac{c}{n}$, то цю формулу легко перетворити на таку:

$$u = \frac{c}{n} \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right).$$

Зв'язок фазової і групової швидкостей можна записати ще й так:

$$u = \frac{c}{n + v \frac{dn}{d\lambda}} = \frac{v}{1 + \frac{v}{n} \frac{dn}{dv}}.$$

Якщо $n + v \frac{dn}{dv} < 1$, тоді $u > c$. Проте згідно з теорією відносності, що підтверджується й експериментальними даними, швидкість поширення світла в будь-якій речовині не може перевищувати швидкості світла у вакуумі. Як же розуміти здобутий результат? Виходить, що в області аномальної дисперсії групова швидкість не збігається із швидкістю перенесення енергії групою хвиль, тобто світлового сигналу. Поблизу смуг поглинання дисперсія світла в речовині настільки велика, що форма сигналу під час його поширення в речовині швидко змінюється - кажуть, що сигнал «розмивається» (рис. 7.2). Описувати світловий сигнал за допомогою групової швидкості можна лише тоді, коли світло, поширюючись у середовищі, зберігає форму сигналу. Така умова повністю виконується тільки для вакууму. Для всіх інших середовищ вона виконується з більшим чи меншим наближенням.

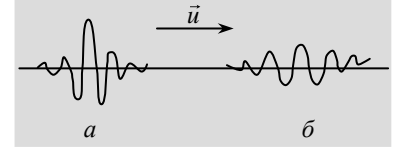


Рис. 7.2



Якщо фазова швидкість v не залежить від частоти ω , а це означає, що вона не залежить від довжини хвилі λ , то $dv/d\lambda = 0$ і фазова швидкість дорівнює груповій $u = v$. **Дисперсія відсутня.**

Якщо $dv/d\lambda \neq 0$, то $u \neq v$ — **дисперсія присутня.**

Розрізняють НОРМАЛЬНУ і АНОМАЛЬНУ ДИСПЕРСІЇ.

Якщо дисперсія нормальна, то $\frac{dv}{d\lambda} > 0$ або $\frac{dn}{dv} > 0$ і $u < v$.

Якщо дисперсія аномальна, то $\frac{dv}{d\lambda} < 0$ або $\frac{dn}{dv} < 0$ і $u > v$.

Зауваження.  Групова швидкість має ще й таке значення. У квантовій механіці вважається, що будь-яке рухоме матеріальне тіло поводить себе у багатьох явищах як хвиля. Точніше, частинку можна уявити собі як рухомий ХВИЛЬОВИЙ ПАКЕТ, причому істинна швидкість частинки дорівнюватиме груповій швидкості хвильового пакета. 



8. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА

Інтерференцією світла називається явище посилення або послаблення інтенсивності світла при накладанні когерентних хвиль у деяких точках простору. Когерентними називаються хвилі з однаковою частотою і сталою різницею фаз, вектори напруженості електричного поля яких коливаються в одній площині.

Нехай дві хвилі з однаковою частотою накладаються в просторі:

$$\begin{aligned} E_1 &= A_1 \cos(\omega t - kx + \alpha), \\ E_2 &= A_2 \cos(\omega t - kx + \alpha). \end{aligned}$$

Амплітуда результуючої хвилі:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos \Delta\varphi, \tag{8.1}$$

де $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

Розглянемо результат додавання некогерентних і когерентних хвиль.

1. При накладанні двох некогерентних світлових хвиль, тобто $\Delta\varphi \neq \text{const}$, амплітуда A результуючої хвилі змінюється з часом, а її середнє значення:

$$\langle A^2 \rangle = \langle A_1^2 \rangle + \langle A_2^2 \rangle.$$

2. При накладанні когерентних хвиль, тобто коли $\Delta\varphi = \text{const}$, у точках простору, для яких $\cos \Delta\varphi = 1$, результуюча амплітуда має найбільше значення. Нехай $A_1 = A_2$ (саме за таких умов інтерференція спостерігається найкраще), тоді:

$$A^2 = 2A_1^2 + 2A_1^2 = 4A_1^2.$$

Ураховуючи, що інтенсивність світла прямо пропорційна до амплітуди хвилі в квадраті ($I \sim A^2$), результуюча інтенсивність світла в цих точках простору збільшується у чотири рази:

$$I = 4I_1.$$

Отже, хвилі підсилюють одна одну і спостерігається **максимум** (max) інтерференції світла. Розв'язуючи тригонометричне рівняння, дістаємо значення різниці фаз між хвилями, що додаються, для точок простору, в яких досягається **максимум** інтерференції:

$$\Delta\varphi = 2\pi k, \text{ де } k = 0, 1, 2, \dots$$

У точках простору, для яких різниця фаз між хвилями дорівнює $\cos \Delta\varphi = -1$, результуюча амплітуда хвилі дорівнює нулю ($A = 0$) і інтенсивність хвилі теж дорівнює нулю ($I = 0$). Тобто хвилі послаблюють одна одну і спостерігається **мінімум** (min) інтерференції світла. Аналогічно, розв'язавши тригонометричне рівняння, можна дістати значення різниці фаз між хвилями, що додаються, для точок простору, в яких досягається **мінімум** інтерференції:

$$\Delta\varphi = (2k + 1)\pi, \text{ де } k = 0, 1, 2, \dots$$

Із рівняння хвиль можна визначити різницю фаз:

$$\Delta\varphi = k(x_2 - x_1) + (\alpha_1 - \alpha_2).$$

Нехай різниця початкових фаз хвиль дорівнює нулю ($\alpha_1 - \alpha_2 = 0$), тоді

$$\Delta\varphi = k(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta x,$$

де λ_0 — довжина хвилі світла у вакуумі; Δx — **геометрична різниця** ходу двох хвиль.

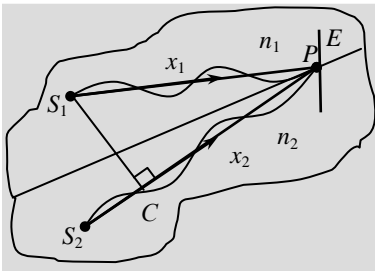


Рис. 8.2

На рис. 8.2 зображено два джерела когерентних хвиль S_1 і S_2 , які випромінюють світло у простір. Там, де світлові пучки накладаються, розташовано екран E , а на ньому взято точку P , в якій спостерігається інтерференція. Сполучивши кожне джерело світла з точкою P , дістанемо відстані x_1 і x_2 від цих джерел до досліджуваної точки. Відстані x_1 і x_2 називаються **геометричним шляхом світла**. Якщо побудувати перпендикуляр із x_1 до x_2 , то відстань S_2C і буде геометричною різницею ходу між двома хвилями. Але якщо світло поширюється в середовищах з показниками заломлення n_1 і n_2 і точка спостереження P міститься на межі поділу цих середовищ, необхідно враховувати їхні оптичні властивості. Отож у такому разі говорять про **оптичний шлях світла** n_2x_2 і n_1x_1 і **оптичну різницю ходу** Δ світла:

$$\Delta = n_2x_2 - n_1x_1.$$

Із формул (8.2)—(8.4) можна визначити оптичну різницю ходу, при якій виконуються умови максимуму і мінімуму інтерференції світла:

$$\max \Delta = 2k \frac{\lambda}{2}, \tag{8.6}$$

$$\min \Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \tag{8.7}$$

У формулах (8.6) і (8.7) λ — довжина хвилі світла в середовищі.

8.1. РОЗРАХУНОК КАРТИНИ ВІД ДВОХ КОГЕРЕНТНИХ ДЖЕРЕЛ (ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ВИВЧЕННЯ)

Розглянемо дві когерентні світлові хвилі, що їх випромінюють джерела S_1 і S_2 (рис. 8.3). Область, в якій ці хвилі накладаються, називається **полем інтерференції**, і в ній спостерігається чергування смуг із максимальною і мінімальною інтенсивністю світла. Екран розміщено саме в цій області на відстані $l \gg d$. Положення точки P на екрані, в якій утворюється максимум або мінімум інтерференції, характеризуватимемо координатою y , яка визначається в напрямі, перпендикулярному до лінії S_1S_2 . Початок відліку міститься в точці O , відносно якої джерела S_1 і S_2 симетричні.

Визначимо оптичну різницю ходу між променями, що їх посиляють у точку P джерела S_1 і S_2 . Із прямокутних трикутників S_1PD_1 і S_2PD_2 визначимо x_1 і x_2 :

$$x_1^2 = l^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$x_2^2 = l^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$x_2^2 - x_1^2 = (x_2 + x_1)(x_2 - x_1) = 2yd.$$

Зазвичай доволі чітка інтерференційна картина спостерігається тільки поблизу середини екрана, а отже, можна вважати, що $y \ll l$ і $x_1 + x_2 \approx 2l$. Тоді

$$x_2 - x_1 = \frac{yd}{l}.$$

Оптична різниця ходу дорівнює:

$$\Delta = n(x_2 - x_1) = \frac{ydn}{l}.$$

Скориставшись формулами (8.5)—(8.7), визначимо координати максимумів і мінімумів інтерференції на екрані:

$$y_{\max} = \pm k \frac{l}{d} \lambda, \tag{8.10}$$

$$y_{\min} = \pm (2k + 1) \frac{l}{d} \frac{\lambda}{2}, \text{ де } k = 0, 1, 2, \dots$$

Відстань між сусідніми мінімумами інтенсивності називається **шириною інтерференційної смуги** і визначається так:

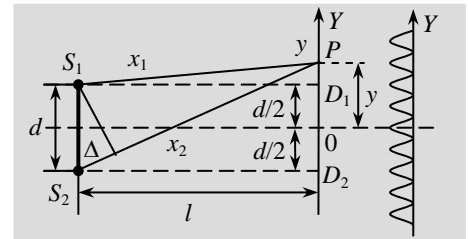
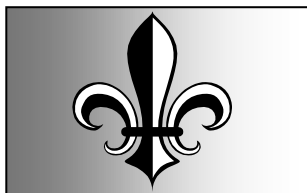


Рис. 8.3



ЗМІСТ

Модуль III. Коливання і хвилі. Оптика	3
План організації навчального процесу з курсу фізики	4
Основні позначення фізичних величин	5
<i>Теоретичне ядро (Аудиторний лекційний матеріал та матеріал для самостійного вивчення)</i>	<i>6</i>
Коливання	6
Вступ	6
1. Вільні незгасаючі коливання	6
1.1. Механічні коливання	6
1.2. Електричні коливання	9
1.3. Векторна і показникова форми зображення коливань (для самостійного вивчення)	12
1.4. Додавання гармонічних коливань (для самостійного вивчення)	12
2. Вільні загасаючі коливання	16
2.1. Механічні коливання	16
2.2. Електричні коливання	18
3. Вимушені коливання	20
3.1. Механічні коливання	20
3.2. Електричні коливання (для самостійного вивчення)	23
4. Змінний струм (для самостійного вивчення)	26
4.1. Вимушені коливання сили струму	26
4.2. Закон Ома для змінного струму	27
4.3. Спади напруги на елементах кола змінного струму	28
4.4. Векторна діаграма для спадів напруги	29
4.5. Втрати в колі змінного струму	29
Хвилі	30
Вступ	30
5. Механічні хвилі	31
5.1. Загальні положення	31
5.2. Характеристики монохроматичної хвилі	31
5.3. Рівняння плоскої хвилі	32
5.4. Рівняння сферичної хвилі (для самостійного вивчення)	34
5.5. Хвильове рівняння	34
5.6. Фазова швидкість хвилі	35
5.7. Групова швидкість хвилі	42
5.8. Енергія пружної хвилі (для самостійного вивчення)	44
5.9. Інтерференція хвиль	47
5.10. Стояча хвиля	47
5.11. Звукові хвилі (для самостійного вивчення)	49
5.12. Ефект Доплера	50
Г.1-6. Електромагнітні хвилі	51

Теоретичне ядро	68
Г.1-6.1. Хвильове рівняння	52
Г.1-6.2. Характеристики електромагнітних хвиль.	55
Г.1-6.3. Енергія електромагнітної хвилі (для самостійного вивчення)	55
Г.1-6.4. Випромінювання електромагнітних хвиль	56
Г.2. Практичні заняття	58
Г.2-1. Приклади розв'язування задач.	58
Г.2-2. Задачі для самостійного та індивідуального розв'язування	64
Г.3. Лабораторні роботи	68
Г.3-1. Експериментальні лабораторні роботи	68
Лабораторна робота Г-1	68
Лабораторна робота Г-2	72
Г.3-2. Віртуальні лабораторні роботи.	74
Лабораторна робота Г-1В	75
Лабораторна робота Г-2В	79
Лабораторна робота Г-3В	81
Лабораторна робота Г-4В	83
Г.4. Модульний контроль	86
Г.4-1. Питання для поточного і модульного контролю (теоретичний матеріал).	86
Г.4-2. Питання для поточного комп'ютерного тестування.	86
Розділ Д. Оптика	90
Модуль V. Оптика	90
Д.1. Теоретичне ядро	94
Вступ.	94
Д.1-1. Інтерференція світла	94
Д.1-1.1. Розрахунок картини від двох когерентних джерел (для самостійного вивчення)	96
Д.1-1.2. Методи утворення когерентних джерел світла	97
Д.1-1.3. Практичне застосування інтерференції світла	100
Д.1-2. Дифракція світла	102
Д.1-2.1. Метод зон Френеля	103
Д.1-2.2. Дифракція сферичних хвиль на круглому отворі	104
Д.1-2.3. Дифракція сферичних хвиль на непрозорому диску	105
Д.1-2.4. Дифракція плоских хвиль на щілині	106
Д.1-2.5. Дифракційна решітка.	107
Д.1-2.6. Практичне використання дифракції.	110
Д.1-3. Поляризація світла	112
Д.1-3.1. Способи утворення поляризованого світла	112
Д.1-3.2. Властивості поляризованого світла	114
Д.1-3.3. Штучна оптична анізотропія.	115
Д.1-4. Поглинання світла (для самостійного вивчення)	117
Д.1-5. Розсіяння світла (для самостійного вивчення)	118
Д.1-6. Дисперсія світла (для самостійного вивчення)	118
Д.2. Практичні заняття	121
Д.2-1. Приклади розв'язування задач.	121
Д.2-2. Задачі для самостійного та індивідуального розв'язування	125
Д.3. Лабораторні роботи	129
Д.3-1. Експериментальні лабораторні роботи	129
Лабораторна робота Д-1	129
Лабораторна робота Д-2	133

Теоретичне ядро	69
Лабораторна робота Д-3	137
Лабораторна робота Д-4	141
Лабораторна робота Д-5	142
Д.3-2 Віртуальні лабораторні роботи.	147
Лабораторна робота Д-1В	148
Лабораторна робота Д-2В	152
Лабораторна робота Д-3В	153
Лабораторна робота Д-4В	156
Д.4. Модульний контроль	158
Д.4-1. Питання для поточного і модульного контролю (теоретичний матеріал).	158
Д.4-2. Питання для поточного комп'ютерного тестування.	158
Розділ Е. Квантова та атомна фізика	163
Модуль VI. Квантова та атомна фізика	163
Е.1. Теоретичне ядро	171
Вступ.	171
Е.-1. Квантова оптика	172
Е.1-1.1. Теплове випромінювання	172
Е.1-1.1.1. Характеристика теплового випромінювання.	172
Е.1-1.1.2. Закони теплового випромінювання	174
Е.1-1.1.3. Теорія теплового випромінювання	175
Е.1-1.1.4. Застосування законів теплового випромінювання.	176
Е.1-1.2. Фотоелектричний ефект	177
Е.1-1.2.1. Закони фотоелектричного ефекту.	177
Е.1-1.2.2. Теорія фотоелектричного ефекту	179
Е.1-1.2.3. Дослідна перевірка рівняння Ейнштейна.	180
Е.1-1.2.4. Характеристики фотона	181
Е.1-1.2.5. Практичне застосування фотоефекту	181
Е.1-1.3. Інші докази квантових властивостей світла	182
Е.1-1.3.1. Суцільне рентгенівське випромінювання (для самостійного вивчення)	182
Е.1-1.3.2. Тиск світла (для самостійного вивчення).	183
Е.1-1.3.3. Ефект Комптона.	183
Е.1-2. Корпускулярно-хвильовий дуалізм речовини	186
Е.1-2.1. Гіпотеза де Бройля	186
Е.1-2.2. Хвильова функція	190
Е.1-2.3. Рівняння Шредінгера	190
Е.1-3. Теорія випромінювання	198
Е.1-3.1. Спектр атома водню	198
Е.1-3.2. Теорія Бора для атома водню	199
Е.1-3.3. Атом водню в квантовій механіці (для самостійного вивчення).	204
Е.1-3.4. Просторове квантування. Спін електрона	208
Е.1-3.5. Квантові числа.	211
Е.1-3.6. Принцип Паулі	213
Е.1-3.7. Періодична система елементів Д. І. Менделєєва (для самостійного вивчення)	214
Е.1-3.8. Спектри багатоелектронних атомів	216
Е.1-3.8.1. Ефект Зесмана	216
Е.1-3.8.2. Характеристичні рентгенівські спектри атомів	218
Е.1-3.9. Спонтанне і вимушене випромінювання. Квантові генератори	219
Е.1-3.10. Енергія і спектри молекул (для самостійного вивчення)	222
Е.1-4. Конденсований стан речовини	224
Вступ.	224
Е.1-4.1. Кристали	225
Е.1-4.1.1. Класифікація кристалів.	225
Е.1-4.1.2. Структурні особливості кристалів.	227
Е.1-4.2. Реальні кристали (для самостійного вивчення)	228

Теоретичне ядро	70
Е.1-4.3. Рідкі кристали (для самостійного вивчення)	229
Е.1-4.4. Елементи квантової фізики кристалів.	230
Е.1-4.5. Елементи квантової статистики	231
Е.1-4.5.1. Виродження системи квантових частинок	233
Е.1-4.6. Деякі властивості металів	234
Е.1-4.6.1. Спектр електронів у металі	234
Е.1-4.6.2. Теплоємність	235
Е.1-4.6.3. Електропровідність металів (для самостійного вивчення)	237
Е.1-4.6.4. Надпровідність	240
Е.1-4.6.5. Теплопровідність (для самостійного вивчення)	241
Е.1-4.7. Елементи зонної теорії кристалів	242
Е.1-4.7.1. Утворення енергетичних зон у кристалах	242
Е.1-4.7.2. Види енергетичних спектрів (для самостійного вивчення)	244
Е.1-4.8. Напівпровідники	246
Е.1-4.8.1. Власні напівпровідники (для самостійного вивчення)	246
Е.1-4.8.2. Домішкові напівпровідники	249
Е.1-4.8.3. Контактні явища.	251
Е.1-5. Ядро атома. Елементарні частинки	257
Е.1-5.1. Характеристики ядра	257
Е.1-5.2. Ядерні сили	258
Е.1-5.3. Енергія зв'язку.	259
Е.1-5.4. Будова ядра	260
Е.1-5.5. Ядерні реакції (для самостійного вивчення)	261
Е.1-5.6. Радіоактивний розпад.	264
Е.1-5.7. Елементарні частинки	268
Е.1-5.8. Будова елементарних частинок. Кварки	270
Е.1-5.9. Характеристики і взаємодія кварків.	271
Е.2. Практичні заняття.	275
Е.2-1. Приклади розв'язування задач.	275
Е.2-2. Задачі для самостійного та індивідуального розв'язування	289
Е.3. Лабораторні роботи	300
Е.3-1. Експериментальні лабораторні роботи	300
Лабораторна робота Е-1	300
Лабораторна робота Е-2	305
Лабораторна робота Е-3	310
Лабораторна робота Е-4	314
Лабораторна робота Е-5	317
Лабораторна робота Е-6	322
Лабораторна робота Е-7	327
Лабораторна робота Е-8	333
Лабораторна робота Е-9	336
Д.3-2 Віртуальні лабораторні роботи.	341
Лабораторна робота Е-1В	342
Лабораторна робота Е-2В	346
Лабораторна робота Е-3В	349
Лабораторна робота Е-4В	351
Е.4. Модульний контроль	353
Е.4-1. Питання для поточного і модульного контролю (теоретичний матеріал).	353
Е.4-2. Питання для поточного комп'ютерного тестування.	354
Використана література	363
Довідковий матеріал	364
Відповіді	371
Предметний покажчик	375