

7.4. Інтерференція хвиль. Стоячі хвилі

При розповсюдженні в середовищі двох хвиль, які йдуть від різних джерел, вони поширюються так, якби вони існували поодиноку. Це явище є підтвердженням принципу суперпозиції.

В області перекриття хвиль відбувається додавання (інтерференція) хвиль.

**Когерентні хвилі.
Інтерференція**

Якщо хвилі мають однакову частоту, однаковий напрямок розповсюдження і сталу різницю фаз, то вони називаються **когерентними**. Джерела когерентних хвиль називаються когерентними джерелами.

При додаванні когерентних хвиль спостерігається **явище інтерференції**: коливання в одних точках підсилюються, а в інших послабляються. В цьому випадку результуюче коливання в кожній точці середовища має сталу за часом амплітуду, яка залежить від відстані точки середовища до джерела коливань.

**Стоячі
хвилі**

Особливим прикладом результату інтерференції двох хвиль є стоячі хвилі, що утворюються в результаті накладання двох зустрічних плоских хвиль з однаковими амплітудами. Це може спостерігатись при відбитті хвиль від перепони. Падаюча на перепону хвиля і біжуча їй назустріч відбита хвиля, накладаючись одна на одну, створюють стоячу хвилю.

Розглянемо такі дві хвилі, що рухаються в протилежних напрямках назустріч одна одній (початкові фази дорівнюють нулю):

$$E_1(x,t) = E_0 \cos(\omega t - kx);$$

$$E_2(x,t) = E_0 \cos(\omega t + kx),$$

$$\text{тоді } E(x,t) = E_1(x,t) + E_2(x,t) = 2E_0 \cos kx \cdot \cos \omega t,$$

тобто рівняння стоячої хвилі має вигляд

$$E(x,t) = 2E_0 \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cdot \cos \omega t. \quad (7.22)$$

Ми одержали коливання тієї ж частоти, що і у зустрічних хвиль, а амплітуда хвилі:

$$A = 2E_0 \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}, \quad (7.23)$$

залежить від координати x , що визначає положення точок середовища. В

деяких точках амплітуда стоячої хвилі дорівнює сумі амплітуд додаваних коливань – точки мають назву **пучностей** (рис.7.5), в інших точках результуюча амплітуда дорівнює нулю – це **вузли** стоячої хвилі.

**Вузли і
пучності**

Координати пучностей знайдемо з (7.23) за умови

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi; \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$x_{\text{пучн.}} = \pm n \frac{\lambda}{2}; \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Координати вузлів такі:

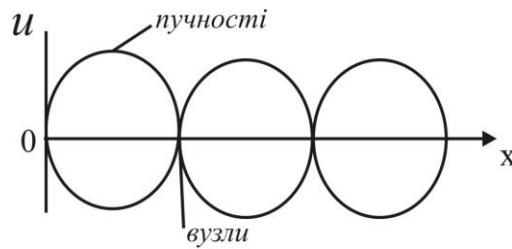


Рисунок 7.5

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm(2n+1) \frac{\pi}{2}; \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$x_{\text{вузл.}} = \pm(2n+1) \frac{\lambda}{4}; \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Відстані між сусідніми пучностями і вузлами дорівнює

$$x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2}.$$

Тобто довжина стоячої хвилі $\lambda_{\text{ст.}} = \frac{\lambda}{2}$. Відстань між сусідніми вузлом і пучністю дорівнює $\frac{\lambda_{\text{ст.}}}{2} = \frac{\lambda}{4}$.

В стоячій хвилі всі точки між двома вузлами коливаються з різною амплітудою та в однаковій фазі ($\cos \omega t$ не залежить від координати).

При переході через вузол фаза коливань стрибком змінюється на π (тобто на протилежну), тому що $\cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$, що визначає амплітуду, при переході через нуль у вузлі змінює знак.

Як вже було сказано, утворення стоячих хвиль відбувається звичайно при інтерференції біжучої вперед і відбитої хвиль

В цьому випадку на границі відбиття може утворюватись або вузол, або пучність – це залежить від співвідношення густин середовищ.

Якщо середовище, від якого відбувається відбиття, має більшу густину, ніж те середовище, в якому розповсюджується хвиля, то на границі буде вузол. Якщо середовище, від якого відбивається хвиля, має меншу густину, ніж середовище, в якому розповсюджується хвиля, то на границі буде пучність.

В першому випадку хвиля в місті відбиття змінює фазу на протилежну, що називається «втратою половини хвилі».

В другому випадку хвиля не змінює фази в місті відбиття, тому втрати половини хвилі не буде.

7.5. Отримання електромагнітних хвиль. Шкала ЕМХ.

Випромінювання диполя

Для того, щоб поширювались електромагнітні хвилі необхідно створити змінне електричне або магнітне поле.

Відомо, що коли заряд рухається прямолінійно і рівномірно він створює постійне магнітне поле. Отже для випромінювання заряд повинен рухатись з прискоренням.

В випромінюючих радіотехнічних пристроях, наприклад в антенах, електрони коливаються відносно іонів речовини. Елементарною коливальною системою (елементарним осцилятором) є система з електрона і позитивного заряду, що дорівнює заряду електрона і вважається нерухомим. Випромінювання всієї антени складається з випромінювання таких осциляторів.

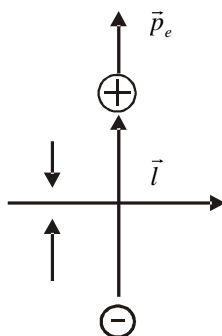


Рисунок 7.6

Розглянемо випромінювання осцилятора (рис. 7.6), яким є диполь, дипольний момент якого змінюється за гармонічним законом (диполь Герца)

$$\vec{p}_e = q\vec{l} = \vec{p}_{oe} \sin \omega t, \quad (7.24)$$

де \vec{p}_{oe} – амплітудне значення \vec{p}_e . Тоді і електричне і магнітне поля, що створюються цим диполем, теж будуть змінюватись з тією ж частотою ω і рухаючись із швидкістю світла, відриваються від диполя.

Розглянемо випромінювання диполя в **хвильовій зоні диполя**, тобто на відстанях $r > \lambda$ (λ – довжина хвилі, що випромінює диполь). Це пов'язано з наявністю в хвильовій зоні тільки хвиль, що вже відірвались від диполя і вільно поширюються, в той час, як поля, пов'язані з диполем мають складну структуру і зосереджені в області $r \leq \lambda$.

Діаграма направленості

Диполь випромінює не однаково в різних напрямках. Інтенсивність випромінювання диполя в хвильовій зоні

$$I(\theta) \approx \frac{1}{r^2} \sin^2 \theta,$$

де θ – кут між віссю диполя і напрямком випромінювання (рис.7.7).

Така діаграма має назву **полярної діаграми направленості випромінювання диполя**.

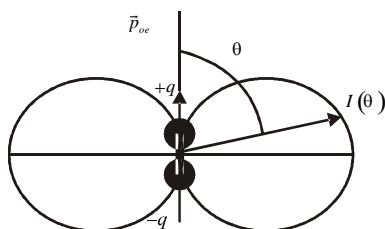


Рисунок 7.7

При напрямках $\theta=0^\circ$ або 180° диполь не випромінює, а при $\theta=90^\circ$ або 270° інтенсивність випромінювання максимальна.

Відповідний розрахунок показує, що **потужність випромінювання диполя** P пропорційна другій похідній дипольного моменту за часом

$$P \approx \ddot{p}_e^2 \approx p_{0e}^2 \omega^4 \sin^2 \omega t. \quad (7.25)$$

Середнє значення потужності випромінювання за часом

$$\langle P \rangle \approx p_e^2 \omega^4.$$

Таким чином **середня потужність випромінювання диполя пропорційна частоті в четвертій степені.**

З (7.24) маємо

$$\vec{p} = q\vec{l} = q\vec{a},$$

де \vec{a} – прискорення заряду, що коливається.

Тоді з (12.35) випливає

$$P \approx q^2 \vec{a}^2. \quad (7.26)$$

З цієї формули можна зробити висновок, що **будь-який заряд, що рухається з прискоренням збуджує електромагнітні хвилі.** А якщо електрон рухається рівномірно, він не повинен випромінювати електромагнітні хвилі.

**Шкала
електромагнітних
хвиль**

Електромагнітне випромінювання або електромагнітні хвилі генеруються і реєструються в широкому діапазоні частот. Окремі ділянки спектру мають свої назви, що наведені в табл.7.1 яка дає уяву про шкалу електромагнітних хвиль.

Таблиця 7.1.

Назва діапазону	Довжина хвилі λ , м	Частота ν , Гц	Джерела. Основні методи збудження
Низькочастотні хвилі (інфранизькі, низькі, промислові, звукові частоти)	$3 \cdot 10^5$ і більше	Менш 10^3	Змінні струми, генератори
Радіохвилі: наддовгі, довгі, середні, короткі (низькі, середні і високі частоти)	$10^5 \div 1$	$3 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^8$	Генератори радіочастот

Продовження Таблиці 7.1

Радіохвилі ультракороткі: дециметрові, сантиметрові, міліметрові, субміліметрові (ультрависокі і надвисокі частоти)	$1 \div 10^{-4}$	$3 \cdot 10^8 \div 10^{12}$	Генератори надвисоких частот
Інфрачервоні промені (теплові)	$10^{-4} \div 7,6 \cdot 10^{-4}$	$10^{12} \div 4 \cdot 10^{14}$	Теплове випромінювання тіл
Світлові промені (видимі)	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{14} \div 7,5 \cdot 10^{14}$	Випромінюва ння атомів та молекул при нагріванні тіл і при електричних розрядах.
Ультрафіолетові промені	$4 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16}$	Випромінюва ння тіл при високих температурах та атомів при дії на них швидких електронів.
Рентгенівські промені	$10^{-8} \div 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{19}$	Випромінюва ння електронів при гальмуванні на аноді; Випромінюва ння атомів при збудженні електронів на внутрішніх оболонках (гальмівне і характеристичне рентгенівське випромінювання).
Гамма – промені	10^{-12}	$3 \cdot 10^{19} \div 3 \cdot 10^{21}$	Ядерні процеси, радіоактивний розпад.
Космічні промені	10^{-13} і менше	10^{21} і більше	Космічні процеси.

7.6. Енергія електромагнітної хвилі. Імпульс електромагнітного поля.

Густина енергії
електромагнітного
поля

Електромагнітні хвилі несуть з собою у просторі енергію, яка міститься в електричному і магнітному полях. При поширенні електромагнітної хвилі у вакуумі ($\varepsilon=1$, $\mu=1$) *об'ємна густина енергії електричного поля дорівнює*

$$w_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2,$$

а магнітного

$$w_m = \frac{1}{2} \mu_0 H^2.$$

Повна густина енергії електромагнітного поля

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H^2. \quad (7.27)$$

Енергія електромагнітного поля дорівнює $W = \int w dV$.

E і H змінюються з однаковою фазою, тому співвідношення (12.28) для амплітудних значень буде таким же і для миттєвих значень E і H :

$$E\sqrt{\varepsilon_0} = H\sqrt{\mu_0}.$$

Це означає, що густина енергії електричного і магнітного полів в кожний момент часу однакова:

$$w_e = w_m,$$

тоді (7.27) можна записати у вигляді:

$$w = \varepsilon_0 E^2,$$

а з урахуванням, що $E = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} H$, *об'ємна густина енергії*

електромагнітного поля така:

$$w = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} EH = \frac{1}{c} EH \quad (7.28)$$

Тоді *модуль густини потоку енергії електромагнітного випромінювання* (енергія, що переноситься хвилею через одиничну площу за одиницю часу):

$$\Pi = w \cdot v, \text{ або } \Pi = w \cdot c = EH.$$

Вектор Умова
– Пойнтінга

Напрямок вектора $\vec{\Pi}$ збігається з напрямком швидкості \vec{v} , яка перпендикулярна \vec{E} і \vec{H} , тому для вектора Умова – Пойнтінга $\vec{\Pi}$ можна записати

$$\vec{\Pi} = [\vec{E}, \vec{H}]. \quad (7.29)$$

Формула (7.29) дає *миттєве значення густини потоку енергії електромагнітної хвилі*.

Щоб знайти її *середнє* значення візьмемо до уваги, що при зміні E і B за синусоїдальним законом їх середньоквадратичні значення дорівнюють

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{2} E_0^2; \quad \langle H^2 \rangle = \frac{1}{2} H_0^2,$$

Тоді середнє значення вектора Умова – Пойнтінга дорівнює $\langle \Pi \rangle = \frac{1}{2} E_0 H_0$, тобто інтенсивність електромагнітної хвилі

$$I = \langle \Pi \rangle = \frac{1}{2} E_0 H_0. \quad (7.30)$$

**Тиск і імпульс
електромагнітних
хвиль**

Якщо на шляху електромагнітної хвилі з'явиться будь-яка перешкода, хвиля передасть цій перешкоді деякий імпульс, тобто буде на неї тиснути.

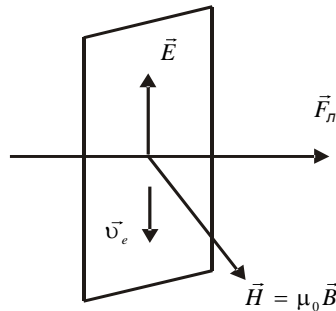


Рисунок 7.8

Нехай плоска електромагнітна хвиля падає нормально на поверхню зі слабкою провідністю (рис. 7.8). Під дією електричної складової поля електрони починають рухатись у бік протилежний напрямку електричного поля \vec{E} зі швидкістю \vec{v}_e . Тоді з боку магнітного поля на електрон буде діяти сила Лоренца $\vec{F}_L = e[\vec{v}_e, \vec{B}]$, направлена всередину зразка перпендикулярно його поверхні. Ця сила, що діє на одиницю поверхні і буде визначати тиск електромагнітної хвилі.

Максвелл показав (1873 р.), що **тиск на поверхню дорівнює**

$$p = \langle w \rangle (1 + \rho) \cos^2 \alpha,$$

де $\langle w \rangle$ – середнє значення об'ємної густини енергії електромагнітного поля хвилі, ρ – коефіцієнт відбиття, α – кут падіння хвилі на поверхню.

Існування тиску світлових хвиль було експериментально доведено П.М. Лебедевим. Ці дослідження були дуже важливі для підтвердження висновків теорії Максвелла про електромагнітну природу світла.

Природно, що електромагнітне поле має також імпульс, який дорівнює

$$G = \frac{W}{c},$$

де W – енергія електромагнітного поля.

Густина електромагнітного імпульсу

$$g = \frac{dG}{dV} = \frac{1}{c} w,$$

де w – густина енергії, що пов'язана з вектором Пойнтінга

$$P = w \cdot c, \text{ звідки } w = \frac{P}{c}.$$

Напрямки вектора імпульсу і вектора Пойнтінга однакові, тоді **вектор густини електромагнітного імпульсу дорівнює**

$$\vec{g} = \frac{1}{c^2} \vec{P} = \frac{1}{c^2} [\vec{E}, \vec{H}].$$

Контрольні запитання і завдання до розділу 6. Електромагнітні хвилі:

1. Рівняння плоскої хвилі.
2. Що таке хвильовий пакет?
3. Як довжина хвилі пов'язана з частотою коливань?
4. Що таке хвильове число? Його фізичний смисл.
5. Принцип суперпозиції хвиль.
6. Які дві складові є в ЕМХ? Їх взаємозв'язок?
7. Що таке фазова швидкість?
8. Що таке поздовжні хвилі і поперечні?
9. Як відрізняються швидкості ЕМХ у вакуумі та в речовині?
10. Що таке стояча хвиля?
11. Хвильове рівняння в одновимірному випадку.
12. Що таке густина потоку енергії ЕМХ?
13. Що таке довжина хвилі?
14. Що таке групова швидкість?
15. Що таке хвиля?
16. Рівняння плоскої електромагнітної хвилі.
17. Що таке хвильова поверхня?
18. Що таке хвильовий фронт?