

Chương 34: Sóng điện từ

Sóng cơ (mechanical waves) đòi hỏi sự hiện diện của một môi trường trong khi đó sóng điện từ (electromagnetic waves) có thể truyền qua chân không. Các phương trình của Maxwell dựa vào lý thuyết sóng điện từ truyền trong không gian với vận tốc của ánh sáng. Herzt xác nhận những tiên đoán của Maxwell là đúng khi ông đã tạo ra và phát hiện ra sóng điện từ vào năm 1887. Sóng điện từ được tạo ra bằng cách dao động điện tích. Sóng phát ra từ những điện tích có thể dò được tại những nơi rất xa. Sóng điện từ vừa mang năng lượng, vừa mang động lượng.

35.1 Dòng điện dịch và dạng tổng quát của định luật Ampere

35.1.1 Sơ lược lịch sử

Nhà vật lý lý thuyết Scottish (1831–1879) đã phát triển lý thuyết sóng điện từ của ánh sáng, lý thuyết về động lực của khí và giải thích bản chất màu sắc tự nhiên và chu kỳ của sao Thổ.

Ông đã xây dựng thành công hệ phương trình về trường điện từ và được biết đến với tên gọi hệ phương trình Maxwell. Maxwell là người đã làm được một việc rất quan trọng là khái quát hóa định luật Ampere, đây là một đóng góp rất quan trọng.

Khả năng toán học đáng gờm kết hợp với cái nhìn sâu sắc tuyệt vời cho phép Maxwell dẫn đầu trong nghiên cứu về điện từ và lý thuyết động học. Ông chết vì ung thư trước khi ông 50 tuổi.



James Clerk Maxwell
(1831–1879)

35.1.2 Sự mở rộng định luật Ampere do Maxwell thực hiện

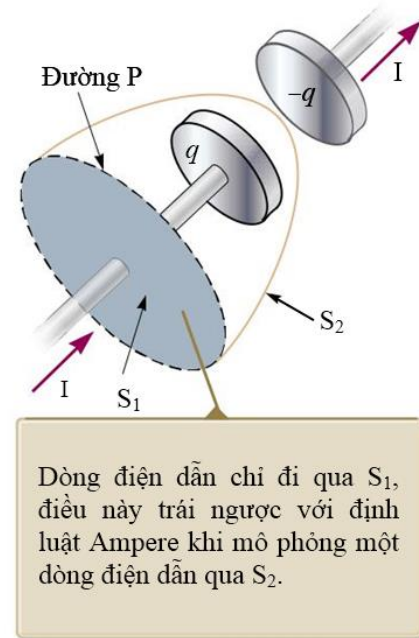
Trong chương 30, chúng ta đã sử dụng định luật Ampere để phân tích từ trường tạo bởi dòng điện:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

Trong phương trình này, tích phân đường qua bất kỳ đường cong khép kín có dòng điện chạy qua, dòng điện dẫn chạy qua vòng ampere được xác định: $I = dq/dt$ (Trong phần này, chúng ta sử dụng thuật ngữ “*dòng điện dẫn*” để chỉ dòng điện được mang bởi các hạt mang điện trong dây dẫn để phân biệt nó với một loại dòng điện khác sẽ được giới thiệu sau). Biểu thức trên chỉ đúng nếu điện trường là tĩnh, tức không phụ thuộc vào thời gian. Maxwell đã ghi nhận giới hạn của định luật Ampere và thay đổi biểu thức này trong trường hợp điện trường thay đổi theo thời gian.

Xét một tụ điện được tích điện như hình 34.1. Khi xuất hiện dòng điện dẫn thì điện tích trên bản dương của tụ thay đổi nhưng không có dòng điện nào tồn tại trong khe hở giữa hai bản tụ vì không xuất hiện các hạt mang điện. Bây giờ hãy xét hai mặt S_1 và S_2 được giới hạn bởi cùng một đường P, định luật Ampere nói rằng $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ xung quanh đường dẫn P này phải bằng $\mu_0 I$, trong đó I là cường độ dòng điện tổng cộng qua bất kỳ bề mặt nào được bao bọc bởi đường P.

Khi đường dẫn P được coi là ranh giới của S_1 thì $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$, trong đó I là dòng điện dẫn qua mặt S_1 . Khi đường dẫn P được coi là ranh giới của S_2 thì $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$, bởi vì không có dòng điện dẫn qua mặt S_2 . Do đó, một trường hợp mâu thuẫn có thể xảy ra từ sự gián đoạn của dòng điện. Maxwell đã giải quyết vấn đề này bằng cách đưa ra một số hạn bổ sung ở phía bên phải của định luật Ampere. Số hạn cộng thêm được gọi là dòng điện dịch (displacement current, I_d).



Hình 34.1: Hai mặt phẳng S_1 và S_2 gần một bản của tụ điện được giới hạn bởi đường P.

$$I_d \equiv \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (34.1)$$

trong đó, ϵ_0 là hằng số điện môi và $\Phi_E \equiv \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$ là thông lượng điện trường xuyên qua bề mặt được giới hạn bởi đường tích phân.

Khi tụ điện đang được tích điện (hoặc phóng điện), sự thay đổi điện trường giữa hai bản cực của tụ được coi là tương đương với dòng điện dẫn trong dây. Do đó, biểu thức dòng điện dịch (34.1) được thêm vào dòng điện dẫn trong định luật Ampere, để đi tới một định luật dạng hoàn thiện hơn mà ở đó từ trường được tạo bởi dòng điện dẫn và điện trường thay đổi theo thời gian (time-varying electric field). Biểu thức tổng quát của định luật Ampere (nhiều người gọi là định luật Ampere–Maxwell).

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (34.2)$$

Hình 34.2 mô tả sự thay đổi điện trường \vec{E} tồn tại giữa các bản của tụ điện tạo ra một thông lượng điện trường. Thông lượng điện trường qua bề mặt S được xác định: $\Phi_E \equiv \int \vec{E} \cdot d\vec{A} = EA$, trong đó A là diện tích của các bản của tụ điện và E là độ lớn của điện trường đều giữa hai

bản tụ: $E = q/(\epsilon_0 A)$, trong đó q là điện tích trên bản cực dương của tụ điện, A là diện tích bản cực. Khi đó, thông lượng electron:

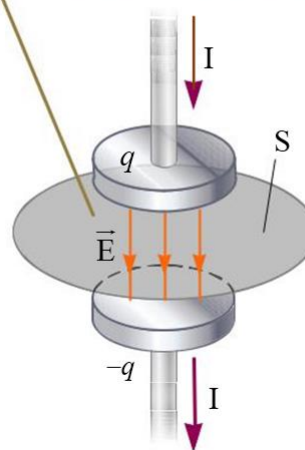
$$\Phi_E = EA = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Do đó, dòng điện dịch qua mặt S là:

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{dq}{dt} \quad (34.3)$$

Phương trình (34.3) cho thấy dòng điện dịch trong khe giữa các bản của tụ có cùng một giá trị. Bằng cách xét bề mặt S , chúng ta có thể xác định dòng điện dịch khi nguồn của từ trường trên bề mặt giới hạn. Dòng điện dịch có nguồn gốc vật lý từ điện trường thay đổi theo thời gian. Điểm chính của phần này là từ trường được tạo ra bởi dòng điện dẫn và điện trường thay đổi theo thời gian.

Điện trường giữa các bản tạo ra một thông lượng electron qua bề mặt S .



Hình 34.2: Khi dòng điện dẫn tồn tại trong các dây dẫn, sự thay đổi điện trường \vec{E} tồn tại giữa các bản của tụ điện.

Câu hỏi 34.1: Trong một mạch RC, tụ điện bắt đầu phóng điện.

- (i) Trong quá trình phóng điện, khoảng không gian giữa hai bản của tụ điện. Xuất hiện:
 - (a) Dòng điện dẫn nhưng không có dòng điện dịch
 - (b) Dòng điện dịch nhưng không có dòng điện dẫn
 - (c) Cả hai dòng điện dẫn và dòng điện dịch
 - (d) Không xuất hiện dòng điện
- (ii) Trong cùng một vùng không gian, xuất hiện:
 - (a) Điện trường nhưng không có từ trường
 - (b) Từ trường nhưng không có điện trường
 - (c) Cả hai điện và từ trường
 - (d) Không xuất hiện điện trường hay từ trường

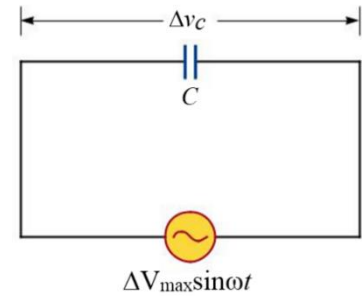
Bài tập mẫu 34.1: Dòng điện dịch trong tụ điện

Một điện áp thay đổi hình sin được áp vào hai đầu một tụ điện như trong hình 34.3. Điện dung của tụ điện là $C = 8,00 \mu\text{F}$, tần số của điện áp là $f = 3,00 \text{ kHz}$, biên độ điện áp là $\Delta V_{\text{max}} = 30,0 \text{ V}$. Hãy xác định dòng điện dịch giữa hai bản của tụ điện.

Giải:

Khái niệm: Hình 34.3 biểu diễn sơ đồ mạch điện trong trường hợp này. Hình 34.3 cho thấy chi tiết của tụ điện và điện trường giữa hai bản tụ.

Phân loại: Chúng ta xác định kết quả bằng cách sử dụng các phương trình được đưa ra trong phần này, vì vậy ví dụ này được xem như điển hình.



Hình 34.3 (bài tập 34.1)

Tần số góc của nguồn:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot (3,00 \cdot 10^3) = 1,88 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$$

Sự khác biệt về điện áp qua tụ điện như một hàm theo thời gian:

$$\Delta V_c = \Delta V_{\max} \sin \omega t = 30,0 \sin(1,88 \cdot 10^4 t)$$

Điện tích của tụ điện: $q = C\Delta V_c$

Từ phương trình (34.3) về định nghĩa dòng điện dịch:

$$i_d = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(C\Delta V_c) = C \frac{d}{dt}(\Delta V_{\max} \sin \omega t) = \omega C \Delta V \cos \omega t$$

Thay số:

$$i_d = (1,88 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1})(8,00 \cdot 10^{-6} \text{ C})(30,0 \text{ V}) \cos(1,88 \cdot 10^4 t) = 4,51 \cos(1,88 \cdot 10^4 t)$$

34.2 Phương trình Maxwell và phát minh của Hertz

Trong lý thuyết thống nhất của Maxwell về điện từ cho rằng, sóng điện từ là một hệ quả tự nhiên của những định luật cơ bản của điện từ học giống như các định luật Newton về chuyển động đối với cơ học. Tuy nhiên cũng có một sự khác nhau rất quan trọng. Einstein đưa ra thuyết tương đối hẹp vào năm 1905, khoảng 200 năm sau thì xuất hiện các định luật Newton và 40 năm sau thì xuất hiện các phương trình Maxwell. Sau khi có lý thuyết tương đối, các định luật Newton phải thay đổi rất nhiều khi tốc độ tương đối đạt đến giá trị xấp xỉ vận tốc ánh sáng. Tuy nhiên, đối với phương trình Maxwell thì không cần thay đổi gì, chúng hoàn toàn phù hợp với thuyết tương đối hẹp.

Các phương trình Maxwell đại diện cho các định luật về điện và từ tính mà chúng ta đã bàn luận, nhưng chúng có hệ quả rất quan trọng. Để đơn giản, các phương trình Maxwell áp dụng cho không gian trống, tức là không có bất cứ vật liệu điện môi hoặc từ tính nào sẽ được trình bày.

34.2.1 Phương trình Maxwell 1 – Định luật Gauss

Tổng thông lượng điện (electric flux) qua bề mặt kín bất kỳ bằng tổng điện tích bên trong bề mặt kín chia cho ϵ_0 . Định luật này liên quan đến sự phân bố điện tích để tạo ra điện trường.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (34.4)$$

34.2.2 Phương trình Maxwell 2 – Định luật Gauss trong từ trường

Từ thông (magnetic flux) toàn phần qua một mặt kín bằng không, có nghĩa là số đường sức từ đi vào phải bằng số đường sức từ đi ra khỏi một mặt kín. Điều này có nghĩa là các đường sức từ không thể bắt đầu hoặc kết thúc tại bất kỳ điểm nào. Nếu điều này đúng thì những đơn cực từ (isolated magnetic monopoles) sẽ được tìm thấy trong tự nhiên. Tuy nhiên, cho đến nay vẫn chưa tìm thấy được.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (34.5)$$

34.2.3 Phương trình Maxwell 3 – Định luật Faraday về cảm ứng

Phương trình này dùng để mô tả việc tạo ra điện trường bằng cách làm cho từ trường biến thiên theo thời gian. Theo điện động lực học, tích phân đường của điện trường dọc theo một đường cong khép kín bằng tốc độ biến thiên của từ thông gửi qua diện tích bề mặt được giới hạn bởi đường cong đó. Một hệ quả của định luật Faraday là tồn tại dòng điện dẫn trong vòng dây dẫn đặt trong một từ trường biến thiên theo thời gian.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (34.6)$$

34.2.4 Phương trình Maxwell 4 – Định luật Ampere-Maxwell

Định luật Ampere-Maxwell dùng để mô tả việc tạo ra từ trường bằng điện trường biến thiên và dòng điện. Tích phân đường của từ trường dọc theo một đường cong khép kín bằng tổng của μ_0 nhân với dòng điện và $\epsilon_0\mu_0$ nhân với tốc độ biến thiên từ thông gửi qua diện tích bề mặt được giới hạn bởi đường cong đó:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0\mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (34.7)$$

34.2.5 Lực Lorentz

Tại một điểm trong không gian tồn tại điện trường và từ trường, lực tác dụng lên một hạt mang điện tích q có thể được tính toán từ điện trường và từ trường của hạt như sau:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (34.8)$$

Những phương trình của Maxwell và lực Lorentz mô tả đầy đủ về tương tác điện từ trước đó. Cần chú ý tính đối xứng của hệ bốn phương trình Maxwell. Các phương trình (34.4) và (34.5) lần lượt là các tích phân mặt của \vec{E} và \vec{B} lấy trên một mặt kín. Phương trình (34.6) và (34.7) lần lượt là các tích phân đường của \vec{E} và \vec{B} lấy dọc theo một chu vi kín. Phương trình của Maxwell có tầm quan trọng cơ bản không chỉ đối với điện từ học nói riêng và ngành khoa học nói chung.

34.2.6 Thí nghiệm của Hertz

Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) là nhà Vật lý người Đức. Ông là người đầu tiên tạo ra sóng điện từ và phát hiện ra sóng điện từ tại phòng thí nghiệm vào năm 1887. Ông cũng chỉ ra một khía cạnh sóng khác của ánh sáng. Những tia lửa điện được cảm ứng qua khoảng trống của hai điện cực của mạch thu, khi hiệu chỉnh tần số của mạch thu trùng với mạch phát. Trong một loạt các thí nghiệm khác, Hertz cũng chỉ ra bức xạ được tạo ra bởi những thiết bị này có thể thể hiện bản chất sóng. Giao thoa, nhiễu xạ, phản xạ, khúc xạ và phân cực. Ông cũng đo được vận tốc bức xạ gần đúng bằng vận tốc của ánh sáng.



Heinrich Rudolf Hertz
(1857–1894)

Mô tả thí nghiệm: Một cuộn dây cảm ứng được nối với mạch phát. Mạch phát gồm 2 cực dạng hình cầu đặt cách nhau một khoảng rất nhỏ. Cuộn dây cung cấp một điện áp tăng vọt trong một khoảng thời gian ngắn đến các điện cực. Khi đó, không khí ở khoảng giữa 2 điện cực bị oxy hóa và trở thành một dây dẫn tốt hơn. Việc xả điện giữa các điện cực tạo thành một dao động có tần số rất cao, điều này tương đương mạch LC.

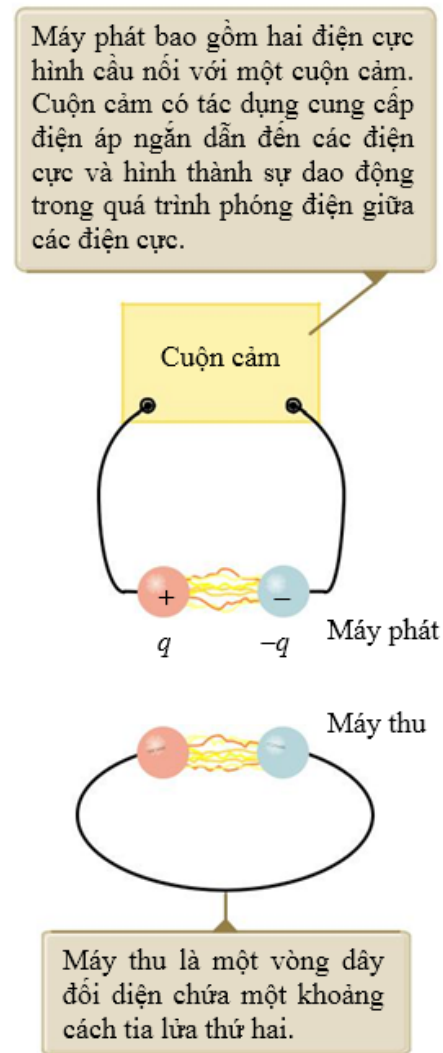
Vận tốc của bức xạ điện từ trong chân không là rất quan trọng không những đối với lý thuyết điện từ của Maxwell mà còn đối với cả lý thuyết của Einstein. Trong một không gian trống rỗng ($q = 0$ và $I = 0$), hai phương trình (34.6) và (34.7), Maxwell đã tiên đoán rằng ánh sáng là một dạng bức xạ điện từ (electromagnetic radiation). Thí nghiệm của Hertz cho ta một ví dụ về sự phát sóng điện từ (hình 34.4). Lõi của cuộn dây cung cấp một điện thế cho các điện cực electron, một điện cực dương và một điện cực âm. Trong thí nghiệm đó rõ ràng rằng là điện tích trên hai quả cầu biến thiên một cách tuần hoàn theo thời gian. Một tia lửa điện được tạo ra giữa hai quả cầu khi điện trường của các điện cực lớn hơn cường độ điện trường giữa hai quả cầu trong không khí ($3 \cdot 10^6$ V/m). Các electron tự do trong điện trường mạnh được gia tốc và tích đủ năng lượng để ion hóa các phân tử mà chúng va chạm. Sự ion hóa này tạo ra nhiều electron để gia tốc và gây ra các quá trình ion hóa khác. Khi không khí trong khe bị ion hóa trở thành một chất dẫn điện tốt và sự phóng điện giữa các điện cực làm xuất hiện trạng thái dao động ở tần số rất cao. Theo quan điểm mạch điện, mô hình thí nghiệm của Hertz tương đương với mạch LC, trong đó độ tự cảm của cuộn dây và điện dung của tụ điện được tạo ra từ các điện cực hình cầu.

Bởi vì giá trị của L và C trong thí nghiệm của Hertz là nhỏ và tần số dao động rất lớn, khoảng 100 MHz (với $\omega = 1/\sqrt{LC}$ cho mạch dao động LC). Sóng điện từ phát ra tại giá trị tần số này là kết quả của các electron tự do di chuyển trong mạch điện. Hertz đã ghi nhận các sóng này bằng cách sử dụng một vòng dây đơn với khoảng cách giữa các tia lửa điện (máy thu). Mạch nhận sóng, có độ tự cảm L , điện dung C và tần số dao động f , được đặt cách một vài mét từ máy phát. Trong thí nghiệm của Hertz, các tia lửa điện được tạo ra giữa khoảng không gian giữa hai điện cực của máy thu khi tần số của máy thu được điều chỉnh sao cho trùng với tần số của máy phát. Từ thí nghiệm này, Hertz đã chứng minh được rằng dòng điện trong máy thu được tạo ra bởi sóng điện từ được phát ra từ máy phát.

Ngoài ra, Hertz đã thực hiện một loạt các thí nghiệm liên quan đến bức xạ được tạo ra bởi thiết bị tia lửa của mình nhằm thể hiện các tính chất sóng của hiện tượng giao thoa, nhiễu xạ, phản xạ, khúc xạ và phân cực. Đó là tất cả các tính chất của ánh sáng như chúng ta đã được biết. Sóng vô tuyến mà Hertz đã tạo ra có các tính chất tương tự như sóng ánh sáng, tuy nhiên chúng khác nhau về tần số và bước sóng. Thí nghiệm thuyết phục nhất của ông là đo tốc độ của bức xạ này. Sóng có tần số đã biết được phản xạ từ một tấm kim loại và tạo ra mô hình giao thoa sóng. Bằng cách đo khoảng cách giữa hai điểm nút cho phép xác định được giá trị bước sóng λ . Sử dụng mối quan hệ $v = \lambda f$ trong quá trình lan truyền sóng, Hertz đã tính được vận tốc của sóng điện từ là $v = 3.10^8 \text{ m/s}$, giá trị này được biết đến như vận tốc của ánh sáng khả kiến.

34.3 Sóng điện từ phẳng

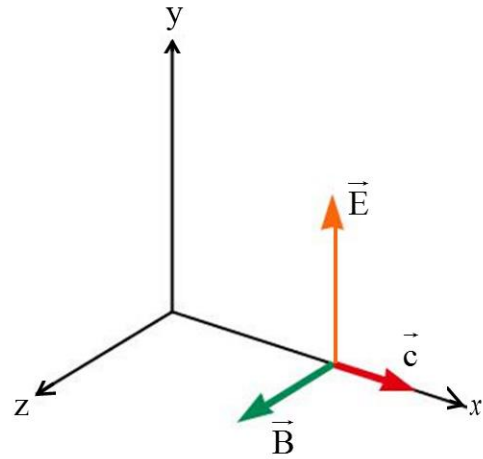
Giả sử rằng vector điện trường và từ trường của một sóng điện từ có quan hệ không – thời gian đặc biệt, phù hợp với các phương trình của Maxwell. Giả sử một sóng điện từ truyền theo phương x với \vec{E} và \vec{B} như được minh họa trong hình 34.5. Vector điện trường \vec{E} hướng theo phương y và từ trường \vec{B} hướng theo phương z . Sóng mà trong đó điện trường \vec{E} và từ trường \vec{B} bị hạn chế là song song với một cặp trục vuông góc được gọi là sóng phân cực tuyến



Hình 34.4: Sơ đồ thí nghiệm của Hertz để tạo ra và ghi nhận sóng điện từ.

tính (linearly polarized waves). Giả sử rằng tại bất kỳ mọi điểm trong không gian thì độ lớn của \vec{E} và \vec{B} chỉ phụ thuộc vào tọa độ x và thời gian t .

Giả sử nguồn phát sóng điện từ tại bất kỳ vị trí nào trong mặt phẳng yz . Nếu chúng ta định nghĩa tia (ray) là một đường thẳng mà sóng truyền đi thì tất cả các tia của sóng phân cực tuyến tính đều song song với nhau. Tập hợp của các sóng này được gọi là sóng phẳng (plane waves). Bề mặt nối những điểm cùng pha của tất cả các sóng phẳng gọi là mặt sóng (wave front) có dạng mặt phẳng. Tuy nhiên, khi một nguồn điểm bức xạ phát sóng theo mọi hướng thì bề mặt nối những điểm cùng pha của những vị trí này có dạng hình cầu, sóng này được gọi là sóng cầu (spherical wave).



Hình 34.5: Điện trường và từ trường của sóng điện từ truyền với vận tốc \vec{c} dọc theo chiều dương của trục x .

34.3.1 Điện trường cảm ứng

Bây giờ chúng ta bắt đầu với định luật Faraday từ phương trình (34.6) để chứng minh sự có mặt của sóng điện từ phẳng:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Xét hình chữ nhật rất nhỏ có chiều rộng dx và chiều dài ℓ cố định tại một điểm trên trục x (được biểu diễn trên hình 34.6). Để xác định tích phân đường $\vec{E} \cdot d\vec{s}$ ta lấy ngược chiều kim đồng hồ vòng quanh hình chữ nhật của hình 34.6. Do \vec{E} và $d\vec{s}$ vuông góc với nhau trên cạnh đỉnh và cạnh đáy của hình chữ nhật nên tích phân trên hai cạnh này không cho đóng góp gì. Tích phân do đó trở thành:

$$E(x+dx) \approx E(x) + \left. \frac{dE}{dx} \right|_{t=\text{hằng số}} dx = E(x) + \frac{\partial E}{\partial x} dx$$

trong đó, $E(x)$ là điện trường ở phía bên trái của hình chữ nhật. Khi đó, tích phân $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$ được xác định:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = [E(x+dx)]\ell - [E(x)]\ell \approx \ell \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) dx \quad (34.9)$$

Thông lượng từ trường xuyên qua hình chữ nhật ấy là $\Phi_B = B\ell dx$, trong đó B là độ lớn (trung bình) của từ trường trong hình chữ nhật và ℓdx là diện tích của hình chữ nhật. Lấy vi phân của thông lượng từ trường theo thời gian ta có:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \ell dx \left. \frac{dB}{dt} \right|_{x=\text{hằng số}} = \ell dx \frac{\partial B}{\partial t} \quad (34.10)$$

Nếu chúng ta thay phương trình (34.9) và (34.10) vào trong định luật cảm ứng Faraday (phương trình 34.6), chúng ta tìm được:

$$\begin{aligned} \ell \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) dx &= -\ell dx \frac{\partial B}{\partial t} \\ \frac{\partial E}{\partial x} &= -\frac{\partial B}{\partial t} \end{aligned} \quad (34.11)$$

34.3.2 Từ trường cảm ứng

Một cách tương tự, chúng ta có thể suy ra phương trình thứ hai để chứng minh sự tồn tại của sóng điện từ phẳng bằng cách xuất phát từ phương trình thứ tư của Maxwell (phương trình (34.7)).

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

tích phân $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ lấy ngược chiều kim đồng hồ vòng quanh hình chữ nhật nằm trên mặt phẳng xz , có chiều rộng dx và chiều dài ℓ như trên hình 34.7. Chú ý rằng độ lớn của từ trường thay đổi từ $B(x)$ đến $B(x + dx)$ theo chiều rộng dx và hướng lấy tích phân đường ngược chiều kim đồng hồ thì tích phân đường qua hình chữ nhật này có giá trị gần đúng:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = [B(x)]\ell - [B(x + dx)]\ell \approx -\ell \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) dx \quad (34.12)$$

Chúng ta thấy rằng sự thay đổi của thông lượng Φ_E sẽ cảm ứng một từ trường với các vector $\vec{B}(x)$ và $\vec{B}(x + dx)$ có hướng như được vẽ trong hình 34.7. Thông lượng electron xuyên qua hình chữ nhật ấy là $\Phi_E = E\ell dx$, lấy vi phân của thông lượng electron theo thời gian ta có:

$$\frac{\partial \Phi_E}{\partial t} = \ell dx \frac{\partial E}{\partial t} \quad (34.13)$$

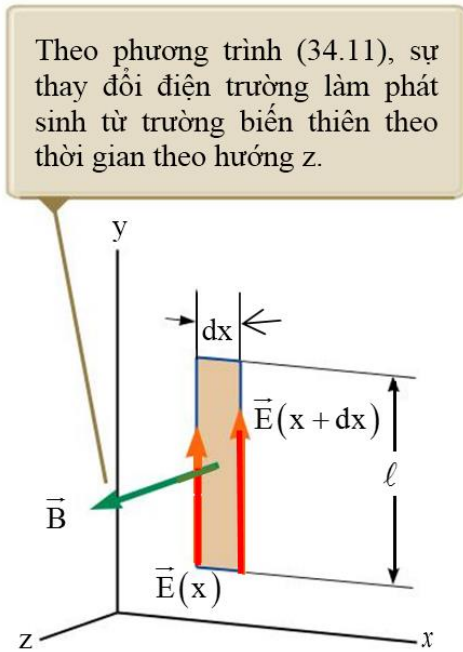
Nếu chúng ta thay phương trình (34.12) và (34.13) vào phương trình (34.7), chúng ta tìm được:

$$-\ell \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x} \right) dx = \mu_0 \epsilon_0 \ell dx \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

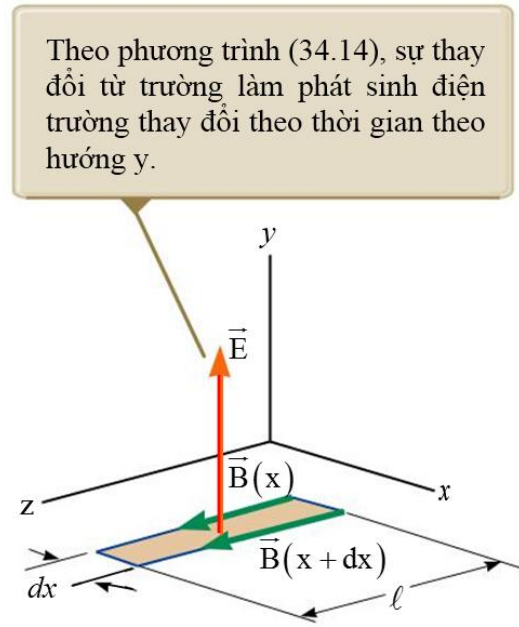
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \ell \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (34.14)$$

34.3.3 Sự truyền tải năng lượng

Bằng cách lấy đạo hàm phương trình (34.11) theo x sau đó kết hợp với phương trình (34.14) ta có:



Hình 34.6: Khi sóng đi qua các hình chữ nhật tại điểm P, sự thay đổi từ thông qua hình chữ nhật trong mặt phẳng xy cảm ứng một điện trường $\vec{E}(x)$ và $\vec{E}(x+dx)$ dọc theo các cạnh của hình chữ nhật ấy.



Hình 34.7: Khi sóng đi qua các hình chữ nhật tại điểm P, sự thay đổi điện thông qua hình chữ nhật trong mặt phẳng xz cảm ứng một từ trường $\vec{B}(x)$ và $\vec{B}(x+dx)$ dọc theo các cạnh của hình chữ nhật ấy.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (34.15)$$

Tương tự, lấy đạo hàm phương trình (34.14) theo x sau đó kết hợp với phương trình (34.11) ta có:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (34.16)$$

Phối hợp phương trình (34.15) và (34.16) ta có kết quả cuối cùng:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (34.17)$$

Thay số vào ta được:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A})(8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2)}} = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Chúng ta đã chứng minh rằng phương trình Maxwell (34.6) và (34.7) có nghiệm dạng sóng, với hai thành phần \mathbf{E} và \mathbf{B} cùng thỏa mãn một phương trình sóng. Sóng điện từ truyền đi với vận tốc bằng vận tốc ánh sáng.

Nghiệm của phương trình (34.15) và (34.16) là sóng dạng hình sin, có độ lớn của vector điện trường và từ trường thay đổi theo x và t theo các biểu thức:

$$\mathbf{E} = E_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (34.18)$$

$$\mathbf{B} = B_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (34.19)$$

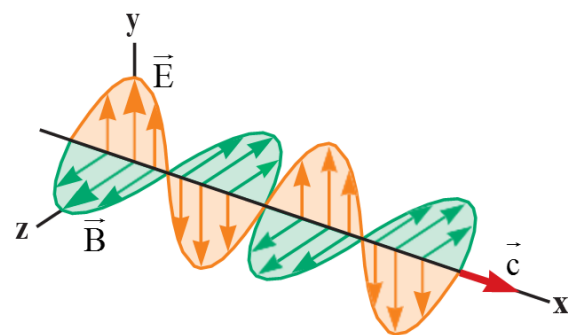
trong đó: E_{\max} và B_{\max} là các giá trị cực đại của điện trường và từ trường. Số sóng $k = 2\pi/\lambda$, với λ là bước sóng. Tần số góc $\omega = 2\pi f$, với f là tần số sóng (Hz). Trong quá trình truyền sóng điện từ, tỷ số ω/k bằng tốc độ của sóng điện từ:

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda f = c$$

Mối quan hệ giữa vận tốc, tần số và bước sóng của một sóng hình sin được xác định theo biểu thức: $v = c = \lambda f$. Do đó, trong quá trình lan truyền sóng điện từ thì bước sóng và tần số có mối liên hệ với nhau như sau:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{f} \quad (34.20)$$

Hình 34.8 biểu diễn sóng điện từ phân cực tuyến tính hình sin tại một thời điểm di chuyển theo chiều dương của trục x .



Hình 34.8: Sóng điện từ hình sin di chuyển theo chiều dương của trục x với vận tốc c .

Bằng việc lấy đạo hàm phương trình (34.18) theo x và phương trình (34.19) theo t , chúng ta có thể biểu diễn toán học quá trình di chuyển của sóng điện từ như sau:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -kE_{\max} \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \omega B_{\max} \sin(kx - \omega t)$$

Thay các kết quả đạo hàm vừa tìm được vào phương trình (34.11) ta được:

$$kE_{\max} = \omega B_{\max}$$

$$\frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\omega}{k} = c$$

Kết hợp phương trình (34.18) và (34.19):

$$\frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{E}{B} = c \quad (34.21)$$

Trong quá trình lan truyền sóng điện từ, tỷ lệ giữa độ lớn cường độ điện trường và cường độ từ trường bằng với tốc độ của ánh sáng. Cuối cùng, cần chú ý rằng sóng điện từ vẫn tuân theo nguyên lý chồng chất như sóng cơ học, bởi vì các phương trình vi phân liên quan đến E và B là các phương trình tuyến tính.

Người ta đã chứng minh được rằng đối với sóng điện từ phẳng đơn sắc:

1. Hai vector \vec{E} và \vec{B} luôn vuông góc với nhau.
2. Ba vector \vec{E} , \vec{B} và \vec{c} , theo thứ tự đó, hợp thành một tam diện thuận ba mặt vuông góc.

Câu hỏi 34.2: Một sóng điện từ lan truyền theo chiều âm của trục y . Điện trường tại một điểm trong không gian được định hướng theo chiều dương của trục x . Từ trường tại điểm đó hướng theo chiều nào?

- (a) chiều âm của trục x
 - (b) chiều dương của trục y
 - (c) chiều dương của trục z
 - (d) chiều âm của trục z
-

Bài tập mẫu 34.2: Sóng điện từ

Một sóng điện từ hình sin có tần số 40,0 kHz truyền trong không gian tự do theo trục x như hình 34.9.

(A) Hãy xác định bước sóng và chu kỳ của sóng.

Giải

Khái niệm: Hãy tưởng tượng sóng điện từ trong hình 34.9 truyền theo chiều dương của trục x, với điện trường và từ trường dao động cùng pha.

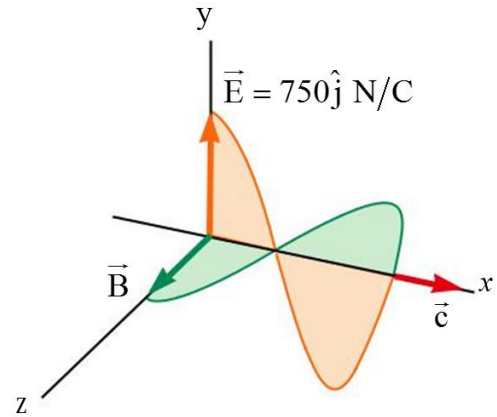
Phân loại: Chúng ta sử dụng biểu thức toán học của mô hình truyền sóng cho sóng điện từ.

Phân tích: Sử dụng phương trình (34.20) để tìm độ dài bước sóng:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{40,0 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 7,50 \text{ m}$$

Chu kỳ của sóng là nghịch đảo của tần số:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40,0 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 2,50 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$



Hình 34.9: (bài tập 34.2)

(B) Tại cùng một vị trí và cùng thời gian, điện trường có giá trị cực đại là 750 N/C hướng theo chiều dương của trục y. Hãy xác định cường độ và hướng của từ trường tại vị trí này.

Giải

Sử dụng phương trình (34.21) để xác định độ lớn của từ trường:

$$B_{\text{max}} = \frac{E_{\text{max}}}{c} = \frac{750 \text{ N/C}}{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 2,50 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

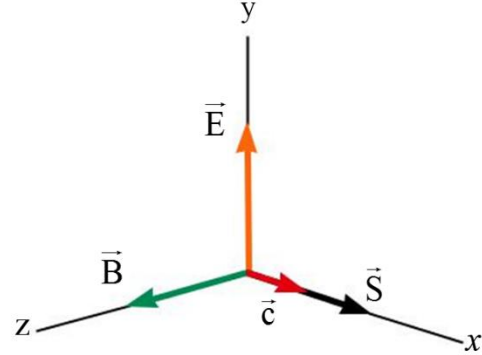
Bởi vì \vec{E} và \vec{B} phải vuông góc với nhau và vuông góc với phương truyền sóng như trên hình 34.9 nên từ trường phải hướng theo trục z.

34.4 Năng lượng sóng điện từ

Trong mô hình hệ không đồng nhất về năng lượng, chúng ta đã xác định bức xạ sóng điện từ như là một phương pháp truyền năng lượng qua mặt giới hạn của một hệ. Phần năng lượng sóng điện từ truyền qua được ký hiệu là T_{ER} . Tốc độ truyền năng lượng của sóng điện từ được mô tả bởi vector \vec{S} , gọi là vector Poynting, được xác định bởi biểu thức:

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (34.22)$$

Độ lớn của vector Poynting cho biết tốc độ truyền năng lượng xuyên qua một đơn vị diện tích vuông góc với phương truyền sóng. Do đó, độ lớn của \vec{S} đại diện cho năng lượng trên một đơn vị diện tích. Hướng của vector này dọc theo phương truyền sóng (hình 34.10). Đơn vị của vector \vec{S} trong hệ SI là $\text{J/s.m}^2 = \text{W/m}^2$.



Hình 34.10: Vector Poynting \vec{S} của sóng điện từ phẳng dọc theo phương truyền sóng.

Đối với sóng điện từ phẳng: $|\vec{E} \times \vec{B}| = EB$
khi đó độ lớn của \vec{S} được xác định như sau:

$$S = \frac{EB}{\mu_0} \quad (34.23)$$

Bởi vì $B = E/c$, khi đó biểu thức (34.23) được viết lại như sau:

$$S = \frac{E^2}{\mu_0 c} = \frac{cB^2}{\mu_0}$$

Biểu thức độ lớn của S áp dụng tại bất kỳ thời điểm nào và biểu thị cho tốc độ tức thời của năng lượng xuyên qua một đơn vị diện tích ứng với giá trị tức thời của E và B . Đối với sóng điện từ phẳng hình sin thì trung bình theo thời gian S qua một hoặc nhiều chu kỳ được gọi là *cường độ sóng* I . (Cường độ của sóng âm đã được nhắc đến trong chương 17.) Khi thực hiện tính giá trị trung bình này, chúng ta sẽ thu được một công thức miêu tả giá trị trung bình theo thời gian của $\cos^2(kx - \omega t)$ và bằng $1/2$. Khi đó, giá trị trung bình của S (hay nói cách khác là cường độ sóng) là:

$$I = S_{\text{avg}} = \frac{E_{\text{max}} B_{\text{max}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{cB_{\text{max}}^2}{2\mu_0} \quad (34.24)$$

Cường độ của sóng điện từ tỷ lệ với bình phương biên độ của cường độ điện trường hay cường độ từ trường.

Cần nhắc lại rằng năng lượng trên một đơn vị thể tích gắn liền với điện trường, được gọi là mật độ năng lượng tức thời:

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

và mật độ năng lượng tức thời gắn liền với từ trường:

$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Do E và B thay đổi theo thời gian đối với sóng điện từ nên mật độ năng lượng cũng thay đổi theo thời gian. Sử dụng mối liên hệ $B = E/c$ và $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, biểu thức của u_B được viết lại như sau:

$$u_B = \frac{(E/c)^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0\epsilon_0}{2\mu_0} E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

So sánh kết quả này với biểu thức của u_E , ta có:

$$u_B = u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Cuối cùng, mật độ năng lượng tức thời của sóng điện từ gắn liền với từ trường bằng với mật độ năng lượng tức thời gắn liền với điện trường. Do đó, đối với một thể tích nhất định thì năng lượng của sóng điện từ được chia đều cho hai thành phần điện trường và từ trường.

Tổng mật độ năng lượng tức thời u của sóng điện từ bằng tổng mật độ năng lượng của điện trường và từ trường:

$$u = u_B + u_E = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

Khi giá trị mật độ năng lượng tức thời của sóng điện từ này được tính trung bình trong một hoặc nhiều chu kỳ,

$$u_{\text{avg}} = \epsilon_0 (E^2)_{\text{avg}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{\text{max}}^2 = \frac{B_{\text{max}}^2}{2\mu_0} \quad (34.25)$$

So sánh kết quả này với biểu thức (34.24) ta có:

$$I = S_{\text{avg}} = cu_{\text{avg}} \quad (34.26)$$

Nói cách khác, cường độ của sóng điện từ bằng mật độ năng lượng trung bình nhân với vận tốc của ánh sáng.

Mở rộng:

Mặt trời cung cấp khoảng 10^3 W/m^2 năng lượng đến bề mặt Trái đất thông qua bức xạ điện từ. Hãy tính toán tổng công suất chiếu lên mái nhà, kích thước mái nhà là $8,00\text{m} \times 20,0\text{m}$. Giả sử rằng độ lớn trung bình của vector Poynting đối với bức xạ mặt trời ở bề mặt Trái đất

là $S_{\text{avg}} = 1000 \text{ W/m}^2$. Giá trị trung bình này đại diện cho công suất trên một đơn vị diện tích, còn được gọi là cường độ sáng. Khi đó, bức xạ đến mái nhà có công suất:

$$P_{\text{avg}} = S_{\text{avg}} A = (1000 \text{ W/m}^2)(8,00 \text{ m} \times 20,0 \text{ m}) = 1,60 \cdot 10^5 \text{ W}$$

Giá trị công suất trên là lớn hơn so với công suất yêu cầu của một ngôi nhà điển hình. Nếu công suất này có thể được hấp thụ và cung cấp cho các thiết bị điện thì nó có thể cung cấp nhiều hơn năng lượng trung bình cho một ngôi nhà. Tuy nhiên, năng lượng mặt trời không dễ dàng khai thác để sản xuất điện và phát triển quy mô lớn như tính toán trong bài toán này. Ví dụ, hiệu suất chuyển đổi của pin quang điện từ năng lượng Mặt trời vào khoảng 12–18% nên công suất tiêu thụ giảm đáng kể. Mặt khác, phụ thuộc vào vị trí, bức xạ không thể chiếu đến mái nhà cả ngày mà nó chỉ tồn tại trong thời gian nửa ngày. Không có năng lượng cung cấp cho hệ thống vào ban đêm và những ngày nhiều mây, điều này làm giảm đi một phần năng lượng được tích trữ trước đó. Cuối cùng, trong khi năng lượng đến với tốc độ lớn vào giữa ngày thì chúng sẽ được lưu trữ lại để sử dụng dần, cần có pin hoặc các thiết bị lưu trữ khác. Nhìn chung, sự vận hành năng lượng mặt trời trên mái nhà hiện tại không hiệu quả về chi phí cho hầu hết các ngôi nhà.

Bài tập mẫu 34.3:

Hãy xác định độ lớn cực đại của điện trường và từ trường của ánh sáng khả kiến từ chiếc đèn để bàn chiếu đến một mặt giấy. coi bóng đèn như một nguồn bức xạ điện từ có hiệu suất phát sáng là 5%.

Giải

Khái niệm: Dây tóc bóng đèn phát ra bức xạ điện từ. Ánh sáng càng mạnh thì cường độ của điện trường và từ trường càng lớn.

Phân loại: coi dây tóc bóng đèn như một nguồn sáng điểm phát ra theo mọi hướng. Quá trình lan truyền bức xạ điện từ có thể được mô hình hóa như sóng cầu.

Phân tích: Cường độ sóng tại một điểm cách nguồn một khoảng r được xác định: $I = P_{\text{avg}} / 4\pi r^2$, trong đó P_{avg} là công suất trung bình của nguồn và $4\pi r^2$ là diện tích của hình cầu bán kính r từ nguồn. Khi đó, cường độ của sóng điện từ được cho bởi công thức (34.24):

$$I = \frac{P_{\text{avg}}}{4\pi r^2} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2\mu_0 c}$$

Giải phương trình trên để xác định cường độ điện trường cực đại:

$$E_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\mu_0 c P_{\text{avg}}}{2\pi r^2}}$$

Giả sử công suất bức xạ của bóng đèn là 60 W, với hiệu suất là 5% là 3 W (phần năng lượng hao phí do dẫn nhiệt và bức xạ không nhìn thấy). Khoảng cách từ bóng đèn đến mặt cầu là 0,3 m. Thay số ta được:

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{(4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A})(3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s})(3,0 \text{ W})}{2\pi(0,30 \text{ m})^2}} = 45 \text{ V/m}$$

Sử dụng biểu thức (34.21) để xác định độ lớn của cường độ từ trường:

$$B_{\max} = \frac{E_{\max}}{c} = \frac{45 \text{ V/m}}{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

Kết luận: Giá trị này của cường độ từ trường là nhỏ hơn hai bậc so với từ trường của Trái đất.

34.5 Động lượng và áp suất bức xạ

Sóng điện từ vận chuyển động lượng cũng như năng lượng. Khi động lượng này hấp thụ bởi những bề mặt thì áp lực sẽ tác dụng lên các bề mặt này. Giả sử sóng vận chuyển với tổng năng lượng T_{ER} đến bề mặt trong một khoảng thời gian Δt thì tổng động lượng \vec{p} (trường hợp hấp thụ hoàn toàn) được xác định:

$$p = \frac{T_{\text{ER}}}{c} \quad (34.27)$$

trong đó c là vận tốc ánh sáng. Chiều của sự biến thiên động lượng là chiều của chùm tia tới. Áp suất P gây ra trên một bề mặt được xác định bằng lực tác dụng trên một đơn vị diện tích: F/A , kết hợp với định luật II Newton, ta có:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{dp}{dt}$$

Thay phương trình (34.27) vào biểu thức tính áp suất:

$$P = \frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{A} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_{\text{ER}}}{c} \right) = \frac{1}{c} \frac{(dT_{\text{ER}}/dt)}{A}$$

$(dT_{\text{ER}}/dt)/A$ là tốc độ năng lượng đến bề mặt trên một đơn vị diện tích, được gọi là độ lớn của vector Poynting. Do đó, áp suất bức xạ P gây ra trên bề mặt hấp thụ hoàn toàn được xác định:

$$P = \frac{S}{c} \quad (34.28)$$

Nếu như bề mặt phản xạ toàn phần (như gương) và bức xạ được chiếu tới thẳng góc thì độ lớn của sự biến thiên động lượng của vật dịch chuyển trong khoảng thời gian Δt sẽ có giá trị lớn gấp hai lần giá trị động lượng trong công thức (34.27). Điều này có nghĩa, động lượng được truyền trên một bề mặt bởi ánh sáng tới và ánh sáng phản xạ có giá trị bằng nhau là $p = T_{ER}/c$. Vì vậy,

$$p = \frac{2T_{ER}}{c} \quad (34.29)$$

Áp suất bức xạ gây ra trên một bề mặt phản xạ toàn phần khi bức xạ được chiếu tới thẳng góc là:

$$P = \frac{2S}{c} \quad (34.30)$$

Đối với bề mặt xảy ra phản xạ một phần, sự thay đổi áp suất nằm giữa S/c và $2S/c$. Đối với ánh sáng mặt trời trực tiếp, áp suất bức xạ khoảng 5.10^{-6} N/m^2 .

Bài tập mẫu 34.4: Quét ngang Hệ Mặt trời

Một lượng lớn bụi tồn tại trong không gian. Mặc dù trên lý thuyết những hạt bụi này có thể thay đổi về kích thước từ kích thước phân tử tới kích thước lớn hơn, nhưng rất ít bụi trong hệ mặt trời nhỏ hơn $0,2 \mu\text{m}$. Giải thích tại sao?

Giải

Các hạt bụi chịu tác dụng của 2 lực chính: lực hấp dẫn kéo chúng về phía Mặt Trời và lực áp suất-bức xạ đẩy chúng ra xa khỏi Mặt Trời. Lực hấp dẫn tỷ lệ thuận với bậc 3 của bán kính của các hạt bụi hình cầu bởi vì nó tỷ lệ với khối lượng và vì vậy tỷ lệ với thể tích của hạt $4\pi r^3/3$. Áp suất bức xạ tỷ lệ thuận với bình phương bán kính bởi vì nó phụ thuộc vào tiết diện cắt ngang của hạt. Đối với các hạt lớn, lực hấp dẫn sẽ lớn hơn lực áp suất bức xạ. Đối với các hạt có bán kính nhỏ hơn $0,2 \mu\text{m}$ lực gây ra từ áp suất-bức xạ sẽ lớn hơn lực hấp dẫn. Do đó, các hạt bị quét ra khỏi hệ mặt trời bởi ánh sáng mặt trời.

Bài tập mẫu 34.5: Áp suất của bút chiếu Lazer

Khi trình bày báo cáo, nhiều người sử dụng bút laser để hướng sự chú ý của người theo dõi tới thông tin trên màn hình. Nếu một bút laser $3,0 \text{ mW}$ tạo ra một điểm sáng trên màn hình có đường kính $2,0 \text{ mm}$, xác định áp suất bức xạ trên màn hình phản xạ 70% ánh sáng đập vào nó. Công suất $3,0 \text{ mW}$ là giá trị được lấy trung bình theo thời gian.

Giải

Khái niệm: Tưởng tượng các sóng đập vào màn hình và truyền một áp suất bức xạ lên nó. Áp suất này không quá lớn.

Phân loại: Bài tập này liên quan đến việc tính toán áp suất bức xạ sử dụng một cách tiếp cận giống với cách tiếp cận được sử dụng để dẫn ra phương trình (34.28) hoặc (34.30), nhưng nó phức tạp bởi sự phản xạ ngược trở lại 70%.

Phân tích: Chúng ta bắt đầu bằng việc xác định độ lớn của vector Poynting của chùm tia. Chia công suất trung bình theo thời gian được truyền thông qua sóng điện từ cho tiết diện của chùm tia:

$$S_{\text{avg}} = \frac{P_{\text{avg}}}{A} = \frac{P_{\text{avg}}}{\pi r^2} = \frac{3,0 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{\pi \left(\frac{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2} \right)^2} = 955 \text{ W/m}^2$$

Bây giờ chúng ta hãy xác định áp suất bức xạ từ chùm laser. Phương trình (34.30) cho thấy một chùm tia phản xạ hoàn toàn sẽ gây ra một áp suất trung bình $P_{\text{avg}} = 2S_{\text{avg}}/c$. Chúng ta có thể mô hình hoá sự phản xạ thật sự như sau. Tưởng tượng rằng bề mặt hấp thụ chùm tia, gây nên một áp suất $P_{\text{avg}} = S_{\text{avg}}/c$. Sau đó bề mặt phát chùm tia, gây ra thêm một áp suất $P_{\text{avg}} = S_{\text{avg}}/c$. Nếu bề mặt chỉ phát một phần f của chùm tia (để f là một phần của chùm tia tới bị phản xạ), áp suất gây bởi chùm tia được phát ra là $P_{\text{avg}} = f S_{\text{avg}}/c$.

Sử dụng mô hình này để tìm áp suất tổng cộng gây ra bởi sự hấp thụ và sự phản xạ trên bề mặt:

$$P_{\text{avg}} = \frac{S_{\text{avg}}}{c} + f \frac{S_{\text{avg}}}{c} = (1 + f) \frac{S_{\text{avg}}}{c}$$

Sử dụng chùm tia có 70% bị phản xạ, áp suất này đạt giá trị:

$$P_{\text{avg}} = (1 + 0,70) \frac{955 \text{ W/m}^2}{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$$

Tổng kết: Áp suất gây ra có một giá trị rất nhỏ đúng như dự đoán. (Áp suất khí quyển vào khoảng 10^5 N/m^2) Độ lớn của vector Poynting $S_{\text{avg}} = 955 \text{ W/m}^2$. Giá trị này gần bằng với cường độ ánh sáng mặt trời tại bề mặt Trái Đất. Vì vậy, sẽ không an toàn khi chiếu một bút laser vào mắt người, điều này có thể nguy hiểm hơn là nhìn trực tiếp vào Mặt Trời.

Mở rộng: Điều gì xảy ra nếu bút laser di chuyển ra xa, cách màn hình 2 lần khoảng cách ban đầu? Điều đó có ảnh hưởng đến áp suất mà bức xạ gây ra trên màn hình?

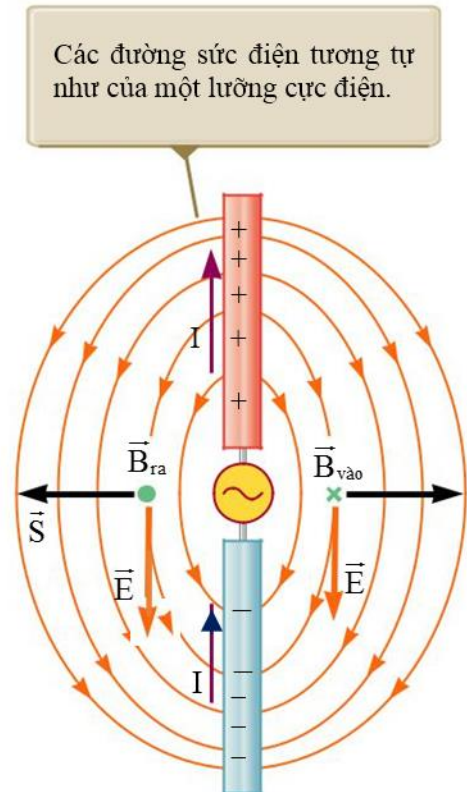
Trả lời: Bởi vì chùm laser thường được xem như là một chùm ánh sáng với tiết diện không đổi, có thể nghĩ rằng cường độ bức xạ, và vì vậy áp suất bức xạ độc lập với khoảng cách từ màn hình. Tuy nhiên một chùm laser, không có tiết diện cố định tại mọi khoảng cách từ nguồn; ngược lại, có một sự phân tán nhỏ nhưng có thể đo được. Nếu chùm tia laser di chuyển ra xa hơn từ màn hình, vùng diện tích bị chiếu trên màn hình tăng lên làm cường độ giảm đi. Do đó,

áp suất bức xạ bị giảm đi. Bên cạnh đó, việc gia tăng khoảng cách từ màn hình lên gấp đôi sẽ làm gia tăng sự mất mát năng lượng từ chùm tia do bởi sự tán xạ từ các phân tử khí và các hạt bụi khi ánh sáng laser di chuyển từ nguồn tới màn hình. Sự mất năng lượng này sẽ làm giảm áp suất bức xạ gây ra trên màn hình.

34.6 Cách tạo ra sóng điện từ bằng Ăng-ten

Các điện tích tĩnh và các dòng đều không thể tạo thành sóng điện từ. Nếu dòng điện trong một sợi dây thay đổi theo thời gian, sợi dây phát sóng điện từ. Cơ chế cơ bản cho sự phát bức xạ này là *sự tăng tốc của các hạt mang điện*. **Khi các hạt mang điện tăng tốc, năng lượng được truyền đi từ hạt mang điện dưới dạng bức xạ điện từ.**

Chúng ta hãy khảo sát sự tạo thành sóng điện từ bởi một ăng-ten nửa sóng. Trong mô hình này, hai thanh dẫn điện được nối với một nguồn điện có điện thế thay đổi (ví dụ như máy dao động LC) được minh họa trên hình 34.11. Độ dài của mỗi thanh bằng $1/4$ bước sóng của bức xạ được phát ra khi máy phát hoạt động ở tần số f . Máy phát làm cho các điện tích gia tốc qua lại giữa 2 thanh. Hình 34.11 miêu tả cấu hình của điện trường và từ trường tại thời điểm khi dòng điện đi lên. Sự tách biệt của các điện tích trong phần trên và phần dưới của ăng-ten làm cho các đường sức của điện trường trông giống như một lưỡng cực điện. (Vì vậy loại ăng-ten này còn được gọi là ăng-ten lưỡng cực.) Bởi vì các điện tích dao động liên tục giữa hai thanh nên ăng-ten có thể được xem như một lưỡng cực điện dao động. Dòng điện đại diện cho sự chuyển động của các điện tích giữa hai đầu của ăng-ten tạo ra các đường sức từ hình thành các vòng tròn đồng tâm xung quanh ăng-ten, vuông góc với các đường sức điện tại tất cả các điểm. Từ trường bằng 0 tại tất cả các điểm dọc theo trục ăng-ten. Hơn nữa, \vec{E} và \vec{B} có pha sai khác nhau 90° .



Hình 34.11: Một ăng-ten nửa sóng gồm hai thanh kim loại nối với một nguồn điện áp xoay chiều. Hình ảnh này cho thấy hướng của \vec{E} và \vec{B} tại một điểm khi cường độ dòng điện hướng lên trên.

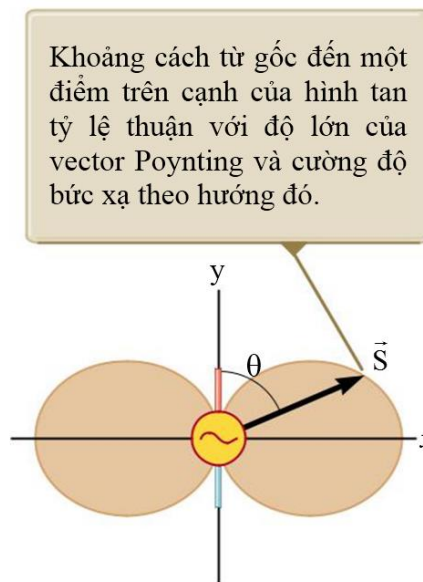
Tại 2 điểm có từ trường được chỉ ra trên hình 34.11. Vector Poynting \vec{S} được định hướng từ trong ra ngoài cho thấy năng lượng truyền ra xa từ ăng-ten tại thời điểm đó. Sau đó,

điện trường, từ trường và vector Poynting đổi hướng vì dòng điện thay đổi. Vì \vec{E} và \vec{B} có pha lệch nhau 90° tại các điểm gần lưỡng cực nên dòng năng lượng bằng 0. Từ điều này, chúng ta có thể kết luận (một cách không chính xác) rằng không có năng lượng được phát ra bởi lưỡng cực.

Tuy nhiên, năng lượng thật sự được phát ra. Bởi vì các trường lưỡng cực giảm theo qui luật $1/r^3$ (như đã thấy trong ví dụ 23.6 đối với điện trường của một lưỡng cực tĩnh), chúng có thể bỏ qua ở các khoảng cách lớn từ ăng-ten. Tại các khoảng cách lớn này, một vài nguyên nhân khác gây ra một loại bức xạ khác với bức xạ gần ăng-ten. Nguồn bức xạ này là do sự tạo thành liên tục của điện trường bởi từ trường thay đổi theo thời gian và sự tạo thành từ trường bởi điện trường thay đổi theo thời gian, được dự đoán bởi phương trình (34.6) và (34.7). Điện trường và từ trường được tạo ra trong trạng thái này đồng pha nhau và thay đổi theo qui luật $1/r$. Kết quả là có một dòng năng lượng đi ra tại mọi lúc.

Sự phụ thuộc vào góc của cường độ bức xạ được tạo ra bởi ăng-ten lưỡng cực được thể hiện trong hình 34.12. Chú ý rằng cường độ và công suất được tạo ra đạt cực đại trong mặt phẳng vuông góc với ăng-ten và đi qua điểm giữa của nó. Hơn nữa công suất phát ra bằng 0 dọc theo trục ăng-ten. Lời giải của phương trình Maxwell cho trường hợp ăng-ten lưỡng cực cho thấy rằng cường độ của bức xạ thay đổi theo qui luật $(\sin^2 \theta)/r^2$, ở đây θ được xác định từ trục của ăng-ten.

Sóng điện từ cũng có thể tạo ra dòng điện trong một ăng-ten thu. Sự đáp ứng của một ăng-ten thu lưỡng cực tại một vị trí được cho sẵn là cực đại khi trục ăng-ten song song với điện trường tại điểm đó và bằng 0 khi trục vuông góc với điện trường.



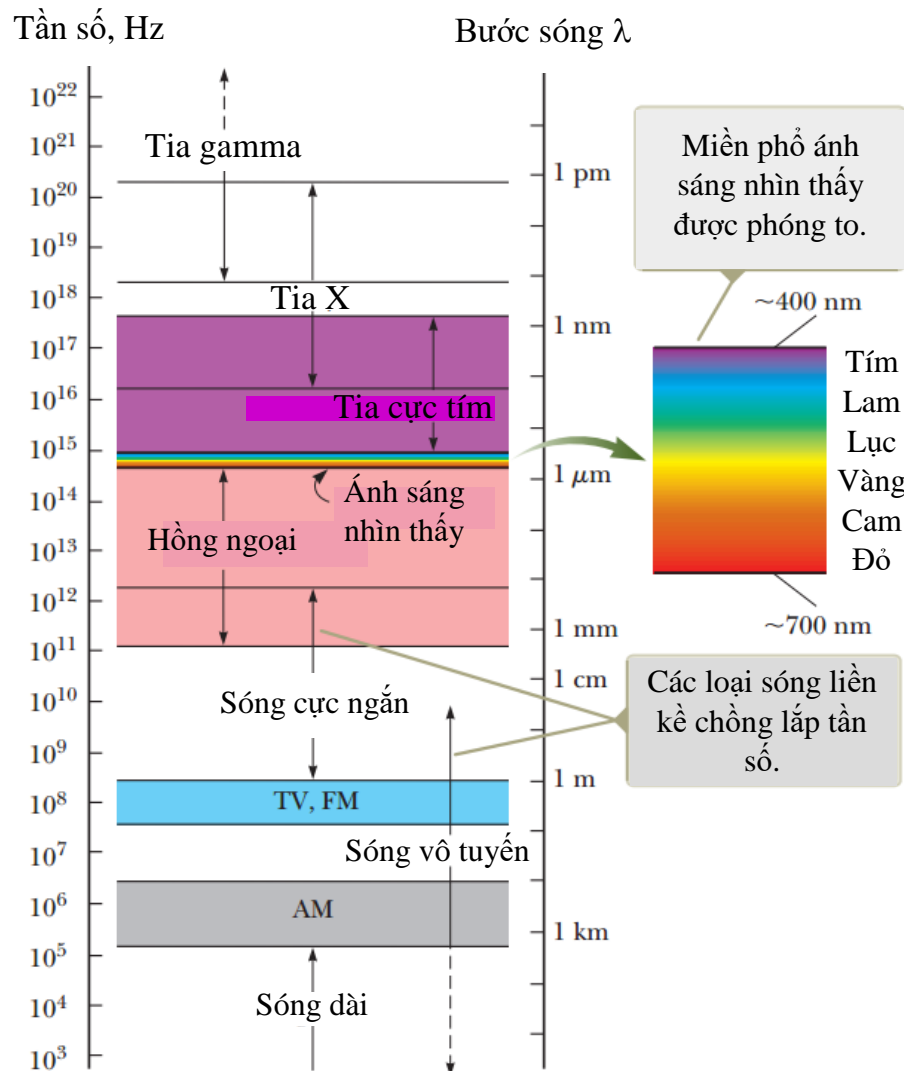
Hình 34.12: Sự phụ thuộc của cường độ bức xạ vào góc được tạo ra bởi một lưỡng cực điện dao động.

Câu hỏi 34.3: Nếu ăng-ten trong hình 34.11 đại diện cho nguồn phát của một trạm radio ở xa, hướng nào sẽ là tốt nhất cho một ăng-ten di động của bạn được đặt bên phải của hình? (a) lên-xuống dọc theo trang giấy, (b) trái-phải dọc theo trang giấy, (c) vuông góc với trang giấy.

34.7 Phổ sóng điện từ

Sóng điện từ đơn sắc là sóng điện từ phát ra từ một nguồn có tần số (chu kỳ) xác định. Kết quả trong một môi trường nhất định, sóng điện từ đơn sắc có một bước sóng xác định.

Người ta phân loại các sóng điện từ (đơn sắc) theo độ lớn của tần số (tính ra đơn vị Hertz) hay bước sóng trong chân không. Ta có thể lập một bảng giá trị trong đó ghi tên các loại sóng điện từ ứng với những bước sóng điện từ lớn đến nhỏ gọi là *thang sóng điện từ*.



Hình 34.13: Phổ sóng điện từ.

Lưu ý về phổ điện từ:

Sóng vô tuyến

- Bước sóng lớn hơn 1 km đến khoảng 0,1 m
- Sử dụng trong hệ thống truyền thông truyền hình và truyền thanh

Sóng cực ngắn

- Bước sóng từ khoảng 0,3 m đến 0,1 mm

- Phù hợp với hệ thống radar
- Lò vi sóng là một ứng dụng

Sóng hồng ngoại

- Bước sóng khoảng 10^{-3} m đến 7.10^{-7} m
- Còn được gọi là sóng nhiệt
- Được phát ra bởi những vật nóng và những phân tử
- Dễ bị hấp thụ bởi hầu hết các vật liệu

Ánh sáng nhìn thấy

- Một phần của phổ được mắt người nhìn thấy được
- Các bước sóng khác nhau tương ứng với các màu khác nhau. Phạm vi từ màu đỏ ($\lambda \sim 7.10^{-7}$ m) đến màu tím ($\lambda \sim 4.10^{-7}$ m).

Bảng 34.1: Bảng giá trị bước sóng ánh sáng nhìn thấy và màu sắc tương ứng.

Bước sóng (nm)	Màu sắc
400 – 430	Màu tím
430 – 485	Màu lam
485 – 560	Màu lục
560 – 590	Màu vàng
590 – 625	Màu cam
625 – 700	Màu đỏ
<i>Chú ý:</i> Khoảng giá trị bước sóng mang tính ước lượng.	

Tia cực tím

- Bước sóng khoảng 4.10^{-7} m đến 6.10^{-10} m
- Mặt trời là nguồn phát ra tia cực tím
- Hầu hết các tia cực tím từ mặt trời bị hấp thụ trong tầng ôzon.

Tia X

- Bước sóng khoảng 10^{-8} m đến 10^{-12} m
- Hầu hết những nguồn này là khi gia tốc những hạt electron năng lượng cao để bắn vào một bia kim loại
- Được sử dụng như là một công cụ chuẩn đoán y học

Tia gamma

- Bước sóng khoảng 10^{-10} m đến 10^{-14} m
- Phát xạ bởi các hạt nhân phóng xạ
- Tính đâm xuyên cao và gây hậu quả nghiêm trọng khi bị hấp thụ bởi các mô sống.

Tóm tắt chương 34

Định nghĩa

Ta định nghĩa dòng điện dịch do một điện trường biến thiên như sau:

$$I_d \equiv \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (34.1)$$

trong đó, ϵ_0 là hằng số điện môi và $\Phi_E \equiv \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$ là thông lượng điện trường.

Tốc độ truyền tải năng lượng trên một đơn vị diện tích được biểu diễn bằng vector \vec{S} , gọi là **vector Poynting**, được định nghĩa như sau:

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (34.22)$$

Khái niệm và nguyên lý

Khi sử dụng biểu thức định luật Lorentz, $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$, các phương trình của Maxwell mô tả tất cả hiện tượng của điện từ trường:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (34.4)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (34.6)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (34.5)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (34.7)$$

Sóng điện từ, được dự đoán bằng các phương trình của Maxwell, có các tính chất và được mô tả bằng các phương trình toán học trong quá trình lan truyền sóng điện từ.

▪ Mỗi một điện trường và từ trường đều thỏa mãn một phương trình sóng. Hai phương trình sóng này được suy ra từ phương trình thứ hai và thứ ba của Maxwell.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (34.15)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (34.16)$$

▪ Sóng điện từ lan truyền trong chân không với vận tốc bằng vận tốc của ánh sáng:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (34.17)$$

- Tốc độ của sóng điện từ trong chân không là 3.10^8 m/s .
- Bước sóng và tần số của sóng điện từ có mối quan hệ với nhau bởi:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00.10^8 \text{ m/s}}{f} \quad (34.20)$$

▪ Vector điện trường và từ trường vuông góc với nhau và vuông góc với phương truyền sóng.

- Độ lớn tức thời của \vec{E} và \vec{B} trong sóng điện từ có liên hệ với nhau bằng biểu thức:

$$\frac{E}{B} = c \quad (34.21)$$

- Sóng điện từ mang năng lượng.
- Sóng điện từ mang động lượng.
- Do sóng điện từ mang động lượng nên nó gây ra áp suất lên các bề mặt. Nếu sóng điện từ có vector Poynting \vec{S} bị hấp thụ hoàn toàn bởi mặt phẳng tới thì áp suất bức xạ lên bề mặt đó được xác định như sau:

$$P = \frac{S}{c} \quad (34.28)$$

Nếu bề mặt phản xạ toàn phần với bước sóng chiếu tới theo phương vuông góc thì áp suất bức xạ gây ra trên bề mặt đó lớn gấp hai lần.

Điện trường và từ trường của sóng điện từ phẳng hình sin truyền theo chiều dương của trục x được biểu diễn như sau:

$$E = E_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (34.18)$$

$$B = B_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (34.19)$$

trong đó, k là số sóng và ω là tần số góc. Các phương trình trên là nghiệm đặc biệt của cho các phương trình sóng của E và B.

Giá trị trung bình của vector Poynting cho sóng điện từ phẳng có độ lớn được xác định:

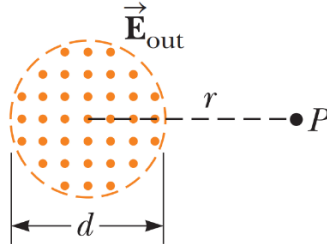
$$S_{\text{avg}} = \frac{E_{\max} B_{\max}}{2\mu_0} = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c B_{\max}^2}{2\mu_0} \quad (34.24)$$

Cường độ của sóng điện từ phẳng hình sin bằng với giá trị trung bình của vector Poynting trong một hoặc nhiều chu kỳ.

Phổ sóng điện từ bao gồm các sóng bao phủ một phạm vi bước sóng rộng, từ sóng vô tuyến có bước sóng dài hơn 10^4 m đến tia gamma có bước sóng nhỏ hơn 10^{-14} m.

Bài tập chương 34

34.1. Xét một trường hợp trong hình 34.1. Điện trường 300 V/m được giới hạn trong một diện tích hình tròn có đường kính $d = 10,0$ cm, có chiều hướng ra ngoài và vuông góc với mặt phẳng hình vẽ. Nếu tăng cường độ điện trường lên 20,0 V/m thì hướng và độ lớn của từ trường tại điểm P (cách tâm của đường trong một khoảng $r = 15,0$ cm) là bao nhiêu?



Hình 34.1

ĐS: Từ trường tại P có chiều đi lên, độ lớn: $1,85 \cdot 10^{-18} \text{T}$

34.2. Một người quan sát ở cách một nguồn sáng điểm có công suất P bằng 250W là 1,8 m. Tính các giá trị hiệu dụng của điện trường và từ trường do nguồn sáng gây ra tại vị trí của người quan sát. Thừa nhận rằng nguồn bức xạ đều đặn theo mọi hướng.

ĐS: $E = 48,1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$, $B = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{T}$

34.3. Khi nạp điện vào một tụ điện phẳng song song bản cực tròn đường kính 20 cm, mật độ dòng điện dịch trong miền giữa hai bản cực là đồng đều và bằng 20 A/m^2 .

(a) Tính độ lớn B của từ trường tại khoảng cách $r = 50$ mm so với trục đối xứng của miền này.

(b) Tính dE/dt trong miền này.

ĐS: (a) $0,63 \mu\text{T}$, (b) $2,3 \cdot 10^{12} \text{ V/m.s}$

34.4. Một electron di chuyển qua một điện trường không đều $\vec{E} = (2,50\hat{i} + 5,00\hat{j}) \text{ V/m}$ và một từ trường không đều $\vec{B} = 0,400\hat{k} \text{ T}$. Hãy xác định gia tốc của electron khi nó di chuyển với vận tốc $\vec{v} = 10,0\hat{i} \text{ m/s}$.

ĐS: $\vec{a} = (-4,39\hat{i} - 1,76\hat{j}) \cdot 10^{11} \text{ m/s}^2$

34.5. Giả sử bạn đang đứng ở vị trí cách trạm phát sóng vô tuyến là 180 m. (a) Bạn đứng cách trạm phát bao nhiêu lần giá trị bước sóng khi chúng phát ra sóng vô tuyến với tần số 1150 AM? (Tần số bằng tần AM được tính bằng kilohertz.) (b) Nếu trạm phát này có tần số là 98,1 FM thì giá trị này là bao nhiêu? (Tần số bằng tần FM được tính bằng megahertz.)

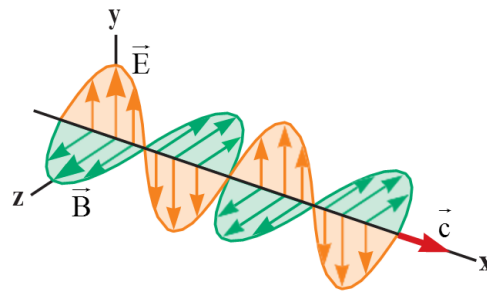
ĐS: (a) 0,690 lần giá trị bước sóng, (b) 58,9 lần giá trị bước sóng.

34.6. Máy đo nhiệt độ được sử dụng trong vật lý trị liệu phát ra bức xạ điện từ mang lại hiệu quả cao trong việc hấp thụ trong mô. Tần số của máy là 27,33 MHz. Giá trị bước sóng mà máy phát ra là bao nhiêu?

ĐS: 11,0 m

34.7. Hình 34.7 biểu diễn quá trình lan truyền sóng điện từ phẳng theo phương x. Giả sử bước sóng của sóng điện từ là 50,0 m và điện trường dao động trong mặt phẳng xy với biên độ 22,0 V/m. Hãy tính:

- (a) Tần số của sóng.
- (b) Từ trường \vec{B} khi điện trường có giá trị cực đại hướng theo chiều âm của trục y.
- (c) Viết biểu thức của \vec{B} theo vector đơn vị, với các giá trị của B_{\max} , k và ω và độ lớn của \vec{B} dưới dạng biểu thức: $B = B_{\max} \cos(kx - \omega t)$



Hình 34.7

ĐS: (a) $6,00 \cdot 10^6$ Hz, (b) 73,3 nT, hướng theo chiều âm của trục z,

(c) $\vec{B} = -73,3\mathbf{k} \cos(0,126x - 3,77 \cdot 10^7 t)$ nT

34.8. Ở khoảng cách nào so với Mặt trời thì cường độ ánh sáng mặt trời gấp ba lần giá trị so với tại mặt đất. (Khoảng cách trung bình từ Mặt trời đến Trái đất là $1,496 \cdot 10^{11}$ m.)

ĐS: $8,64 \cdot 10^{10}$ m

34.9. Một tia laser có công suất cao được sử dụng trong bầu khí quyển của Trái đất, điện trường của tia laser có thể làm ion hóa không khí, biến nó thành một dạng plasma dẫn phản xạ ánh sáng laser. Trong không khí khô ở 0°C và 1 atm, sự cố về điện xảy ra khi điện trường có biên độ trên khoảng 3,00 MV/m.

- (a) Cường độ chùm tia laser là bao nhiêu để tạo ra một điện trường cực đại như trên?
- (b) Ở cường độ cực đại này, giá trị công suất nào được cung cấp cho một chùm tia hình trụ với đường kính 5,00 mm?

ĐS: (a) $1,19 \cdot 10^{10}$ W/m², (b) $2,34 \cdot 10^5$ W

34.10. Chùm tia laser công suất cao trong các nhà máy được sử dụng để cắt xuyên qua vải và kim loại. Một tia laser như vậy có đường kính chùm tia là 1,00 mm và tạo ra điện trường có biên độ 0,700 MV/m tại bia vật liệu. Hãy xác định:

- (a) Biên độ từ trường được tạo ra.

(b) Cường độ của chùm tia laser.

(c) Công suất của chùm tia laser.

ĐS: (a) 2,33 mT, (b) 650 MW/m², (c) 511 W

34.11. Một sóng vô tuyến lan truyền với công suất 25,0 W/m². Mặt phẳng diện tích A vuông góc với phương truyền sóng. Giả sử bề mặt là một chất hấp thụ sóng hoàn toàn, hãy xác định áp suất bức xạ trên mặt phẳng đó.

ĐS: 83,3 nPa

34.12. Một đèn laser neon-helium có công suất 15,0 mW phát ra chùm tia tiết diện tròn có đường kính 2,00 mm.

(a) Hãy tìm điện trường cực đại trong chùm tia.

(b) Tổng năng lượng chứa trong 1,00 m chiều dài của chùm tia là bao nhiêu?

(c) Tìm động lượng trên 1,00 m chiều dài của chùm tia.

ĐS: (a) 1,90 kN/C, (b) 50,0 pJ, (c) 1,67.10⁻¹⁹ kg.m/s

34.13. Sóng tần số cực thấp (ELF) có thể xuyên qua đại dương là phương tiện duy nhất được dùng để liên lạc với các tàu ngầm ở xa. Hãy tính độ dài một phần tư bước sóng của ăng-ten để tạo ra sóng ELF có tần số 75,0 Hz vào không khí.

ĐS: 4,00.10⁶ m

34.14. Hãy xác định độ lớn của tần số và phân loại sóng điện từ có độ dài bước sóng bằng:

(a) Chiều cao của một người 1,7 m.

(b) Độ dày của một tờ giấy: 6.10⁻⁵ m.

ĐS: (a) ~ 10⁸ Hz (sóng vô tuyến), (b) ~ 10¹³ Hz (hồng ngoại)

34.15. Hãy xác định giá trị bước sóng của sóng điện từ trong chân không tương ứng với các tần số (a) 5,00.10¹⁹ Hz, (b) 4,00.10⁹ Hz.

ĐS: (a) 6,00 pm, (b) 7,50 cm

34.16. Một thông báo tin tức quan trọng được phát ra từ sóng vô tuyến đến những người ngồi cạnh đài phát thanh cách nhà ga 100 km và sóng âm được phát ra từ người ngồi bên trong phòng phát tin tức cách đài phát thanh 3,00 m. Lấy tốc độ âm thanh trong không khí là 343 m/s, người nghe sẽ nhận được tin tức đầu tiên từ đâu? Giải thích.

ĐS: Người nghe sẽ nhận tin từ người ngồi trong phòng tin tức.