Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Física IV-A – 2024/2 – P1- 30/09/2024
VERSÃO: A

Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

$\mu_0 = 1\times10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9)\times10^{-10}$ F/m; $c = 3\times10^{8}$ m/s; $h = 6\times10^{-34}$ J $\cdot$ s; $h = 3\times10^{-15}$ eV$\cdot$ s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV$\cdot$ nm; $e = 2\times10^{-19}$ C; 1 eV $= 2\times10^{-19}$ J; 1 J $= 5\times10^{18}$ eV; $m_pc^2 = 1000$ MeV; $m_ec^2 = 0{,}5$ MeV; 1μm $= 10^{-6}$ m; 1 nm $= 10^{-9}$ m; 1 Å $= 10^{-10}$ m; 1 pm $= 10^{-12}$ m; 1 GeV $= 10^3$ MeV $= 10^9$ eV; $\lambda_c = 1{,}8$ pm; $E_1 = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 a_0} = -25$ eV; $a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi)\times10^{-11}$ m; sen$(30^\circ) = 1/2$; sen$(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; sen$(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

div $\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; rot $\mathbf{E} = -\dfrac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; div $\mathbf{B} = 0$; rot $\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0\dfrac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$; $\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0\mathbf{E}\times\mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$; $I = I_0\left[\frac{\text{sen }(\beta/2)}{\beta/2}\right]^2\left[\frac{\text{sen }(N\phi/2)}{\text{sen}(\phi/2)}\right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}a\text{sen}(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d\text{sen}(\theta)$; $\text{sen}(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\text{sen}(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\text{sen}(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$; $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1{,}22\lambda}{D}$; $\langle\text{sen}^2\theta\rangle = 1/2$; $\langle\cos^2\theta\rangle = 1/2$; .

Seção 1. Questões objetivas (7×0,7 = 4,9 pontos)

1. Uma onda eletromagnética harmônica plana possui uma amplitude de campo magnético dada por $B_0 = 1{,}0\,\mu$T, um comprimento de onda $\lambda = 300$ nm e se propaga no vácuo no sentido positivo de x. Qual opção corresponde a uma possível expressão para o campo elétrico, considerando que o vetor campo magnético dessa onda está disposto ao longo do eixo y?

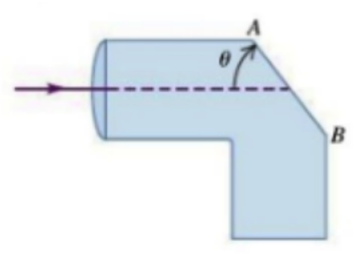
   (a) $\vec{E}(x,t) = 1\text{ V/m}\,\hat{x}\cos\left((\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m})\,x - (2\pi\times10^{14}\text{ rad/s})t\right)$

   (b) $\vec{E}(x,t) = 300\text{ V/m}\,\hat{z}\cos\left((\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m})\,x - (2\pi\times10^{15}\text{ rad/s})t\right)$

   (c) $\vec{E}(x,t) = 300\text{ V/m}\,\hat{z}\cos\left((\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m})\,x + (2\pi\times10^{14}\text{ rad/s})t\right)$

   (d) $\vec{E}(x,t) = 1\text{ V/m}\,\hat{x}\cos\left((\frac{2\pi}{150\times10^{-9}}\text{ rad/m})\,x + (2\pi\times10^{15}\text{ rad/s})t\right)$

2. Um feixe de luz entra num tudo sólido feito de plástico com índice de refração $n = 5/3$. A luz propaga paralelamente à superfície superior do tubo, como mostrado na figura abaixo. Você deseja cortar a face AB de tal forma que a luz seja totalmente refletida dentro do tubo após o primeiro contato com ela. Qual é o maior valor de θ para o tubo colocado em água ($n_a = 4/3$)?



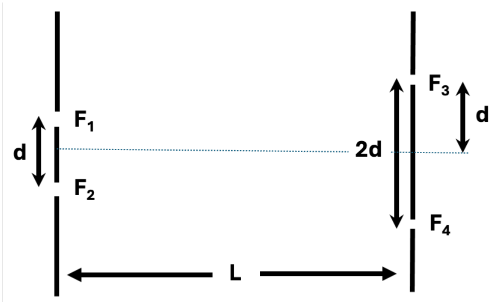
   (a) $\theta < 30^o$

   (b) $30^o < \theta \leq 45^o$

   (c) $45^o < \theta \leq 60^o$

   (d) $\theta > 60^o$

3. Uma fonte de luz coerente e monocromática de comprimento de onda λ é utilizada num experimento cuja montagem está esquematizada na figura abaixo. A distância entre o plano das fendas e o anteparo é L. Luz incide normalmente sobre o anteparo, que possui duas fendas F_1 e F_2, com a mesma abertura (desprezível) e separadas por uma distância d. A distância d é tal que os primeiros máximos laterais de interferência se localizam sobre as fendas F_3 e F_4 do segundo anteparo. Elas possuem a mesma abertura das fendas do anteparo A, mas estão separadas por uma distância $2d$. Qual opção corresponde à diferença de fase ϕ (em radianos) entre as ondas provenientes de F_1 e F_2 quando atingem as fendas F_3 e F_4 e ao valor da separação d?



(a) $\phi = 2\pi$ e $d = \sqrt{\lambda L}$

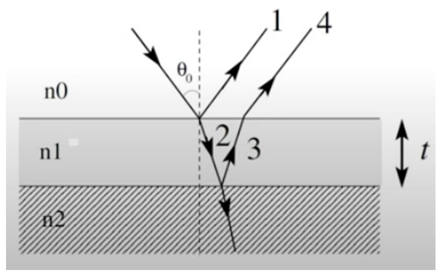
(b) $\phi =1{,}5\pi$ e $d = \sqrt{2\lambda L}$

(c) $\phi = 2\pi$ e $d = \sqrt{2\lambda L}$

(d) $\phi = 6\pi$ e $d = \sqrt{4\lambda L}$

(e) $\phi = 6\pi$ e $d = \sqrt{\lambda L}$

4. A figura abaixo mostra uma camada superior de índice de refração $n_1=$ 1,5 e espessura t, depositada sobre uma camada espessa de índice de refração $n_2 = 3$. O sistema está imerso em ar ($n_0 = 1$). Luz monocromática com comprimento de onda $\lambda_0 = 600$ nm, incide sobre a camada de espessura t com um ângulo de incidência θ_0 pequeno. Qual valor corresponde à mínima espessura t da camada superior para que ela funcione como uma camada anti-reflexo (mínima reflexão) para este comprimento de onda em incidência normal?



(a) $t = 100$ nm

(b) $t = 150$ nm

(c) $t = 200$ nm

(d) $t = 50$ nm

5. As microondas num forno de microndas tem um comprimento de onda $\lambda = 10$ cm. Qual deve ser o tamanho L mínimo do forno para que contenha no padrão de ondas estacionárias cinco planos antinodais do campo elétrico ao longo de seu comprimento ?

(a) $10 \text{ cm} \leq L < 20$ cm

(b) $20 \text{ cm} \leq L < 30$ cm

(c) $30 \text{ cm} \leq L < 40$ cm

(d) $40 \text{ cm} \leq L < 50$ cm

(e) $L \geq 50$ cm

6. Podemos modelar razoavelmente bem o bulbo de uma lâmpada incandescente por uma esfera de diâmetro d. Tipicamente, apenas 5% da energia vai para produção de luz visível, o restante vai para a região não visível do infravermelho. Podemos dizer sobre a amplitude do campo elétrico E_0 de uma onda harmônica com a mesma intensidade da luz visível produzida na superfície do bulbo de uma lâmpada incandescente que:

   (a) É proporcional a d

   (b) É proporcional a d^2

   (c) É proporcional a $1/d$

   (d) É proporcional a $1/d^2$

   (e) Não depende de d

7. Considere a luz solar que atravessa a janela de uma casa. Tanto a parte da frente quanto a parte de trás da janela é revestida por películas polarizadoras. A intensidade da radiação solar (não polarizada) que chega na janela é I. Qual deve ser o ângulo entre os eixos de polarização das películas para que a intensidade da luz solar no interior da casa seja de $I/4$?

   (a) $0°$

   (b) $45°$

   (c) $30°$

   (d) $60°$

   (e) $90°$

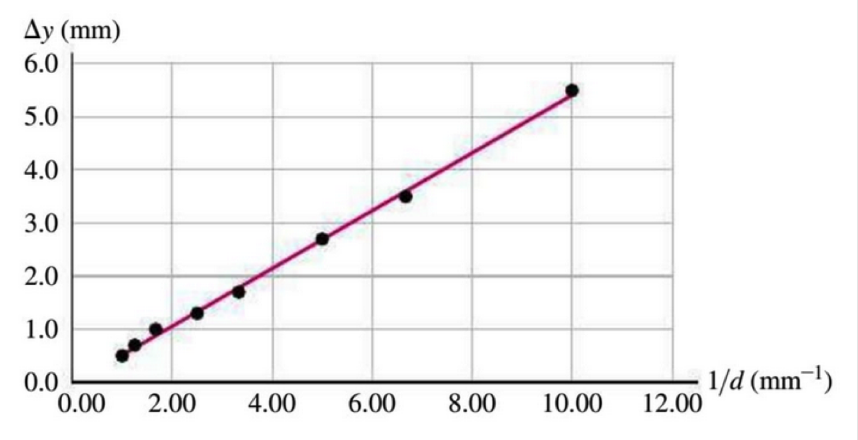
Seção 2. Questões discursivas ($1 \times 2{,}6 + 1 \times 2{,}5 = 5{,}1$)

1. [2,6 pontos]
   O campo elétrico de uma onda eltromagnética que se propaga no vácuo é dado por $\vec{E}(x,y,z,t) = (7,0\text{V/m})\cos(\frac{\pi}{50\times10^{-9}(m)}(z+ct))\hat{x}$. Em função dos dados do enunciado e das constantes fundamentais dadas no formulário, determine:

   (a) [0,4 ponto] A direção e o sentido de propagação da onda eletromagnética.

   (b) [0,4 ponto] A frequência da onda eletromagnética.
   (c) [1,0 ponto] O vetor campo magnético $\vec{B}(x,y,z,t)$ da onda eletromagnética.
   (d) [0,8 ponto] O vetor de Poynting associado a esta onda eletromagnética.

2. [2,5 pontos]
   Em seu trabalho numa empresa de ótica, você é encarregado de determinar o comprimento de onda λ da luz produzida por um laser. Para isso, você passa a luz do laser por duas fendas finas separadas por uma distância d. Você observa o padrão de interferência num anteparo distante $0,900$m das fendas e mede a separação Δy entre franjas claras adjacentes na porção do padrão próxima ao centro do anteparo. Usando um microscópio, você mede também d. Mas ambos Δy e d são pequenos e difíceis de medir precisamente, então você repete os experimentos para diferentes pares de fendas, cada um com um diferente valor de d. Seus resultados são mostrados na figura abaixo, onde você graficou Δy como função de $1/d$. A linha no gráfico corresponde à melhor reta que se ajusta aos resultados. Considere aproximação de pequenos ângulos: $\sin(\theta) \approx \theta$.



   (a) [1,0 ponto] Explique porque os resultados experimentais graficados como na figura podem ser representados por uma reta.

   (b) [1,5 pontos] Use a figura para determinar o comprimento de onda λ do laser.

Gabarito para Versão $\boxed{\text{A}}$

Seção 1. Questões objetivas (7×0,7 = 4,9 pontos)

1. (b)

2. (b)

3. (a)

4. (a)

5. (b)

6. (c)

7. (b)

Seção 2. Questões discursivas ($1 \times 2{,}6 + 1 \times 2{,}5 = 5{,}1$)

1. **Resolução:**

■

2. **Resolução:**

■

1. a) O termo $(z+ct)$ indica que a onda se propaga na direção negativa do eixo z, $-\hat{z}$

b) Como $\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right] = \cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}z + \frac{\pi c}{50\times10^{-9}}t\right]$

$$\vec{E} = 7\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}z + \frac{\pi c}{50\times10^{-9}}t\right]\hat{x}$$

Como a forma geral da onda é $\vec{E} = E_0\cos(kz - \omega t + \phi)$,

$\omega = 2\pi f = \frac{\pi c}{50\times10^{-9}} \Rightarrow f = \frac{3\times10^{8}}{100\times10^{-9}} = 3\times10^{15}\ Hz.$

c) $\vec{B} = \frac{1}{c}\hat{k}\times\vec{E}$, com $\hat{k} = -\hat{z}$ o vetor unitário na direção de propagação da onda.

$$\vec{B} = (-\hat{y})\frac{7}{c}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]$$

$$\vec{B} = -2{,}33\times10^{-8}\,\hat{y}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]$$

Alternativamente, pode ser justificado que a direção de $\vec{B}$ é $(-\hat{y})$ usando-se o fato que a direção de propagação da onda $(-\hat{z})$ é dada pelo produto vetorial $\vec{E}\times\vec{B}$ e que $\vec{E}$ está na direção $\hat{x}$.

d) $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left\{7\hat{x}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\times 2{,}33\times10^{-8}(-\hat{y})\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\right\}$$

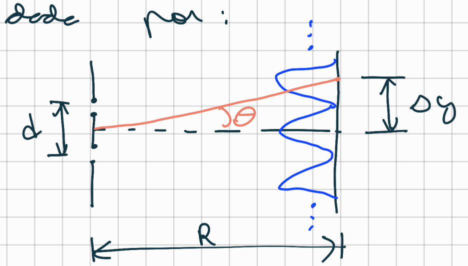
$$\vec{S} = \frac{7\times2{,}33\times10^{-8}}{10^{-6}}\cos^2\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right](-\hat{z})$$

$$\vec{S} = -0{,}16\cos^2\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\hat{z}$$

D2

a)

A separação Δy entre franjas claras num padrão de interferência de duas fendas finas é dada por:



$d\,\text{sen}\,\theta = \lambda$

$\text{sen}\,\theta \cong \frac{\Delta y}{R}$, para ângulos pequenos, assim:

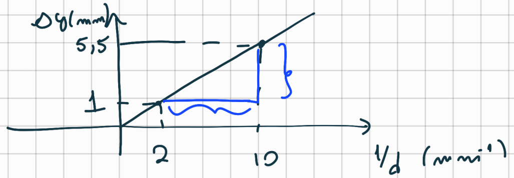
$d \frac{\Delta y}{R} = \lambda$

$\Delta y = (\lambda R)\, \frac{1}{d}$

Δy como função de $\frac{1}{d}$ é uma reta, com coeficiente angular dado por λR e coeficiente linear igual a zero.

b) Pelos dados da reta

$\Delta y = A \left(\frac{1}{d}\right) + B$



O coeficiente angular da reta é dado por:

$A = \frac{(5,5 - 1,0)\ mm}{(10 - 2)\ mm^{-1}}$

$A = \frac{4,5}{8}\ mm^2$

$A = \lambda R$; $\lambda = \frac{A}{R}$

$\lambda = \frac{4,5}{8} \frac{mm^2}{0,900\ m}$

$\lambda = \frac{\overset{1}{\cancel{4,5}} \times (10^{-3} m)^2}{8 \times 2\cancel{9} \times 10^{-1}\ m} = \frac{1}{16} \times \frac{10^{-6}}{10^{-1}}\ m$

$\lambda = \frac{1}{16} \times 10^{-5}\ m$

100 | 16
040 0,0625
080
00

$\lambda = 0{,}0625 \times 10^{-5}\ m$

$\lambda = 625 \times 10^{-9}\ m$

$\boxed{\lambda = 625\ nm}$

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Física IV-A – 2024/2 – P1- 30/09/2024
VERSÃO: $\boxed{\text{B}}$

Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

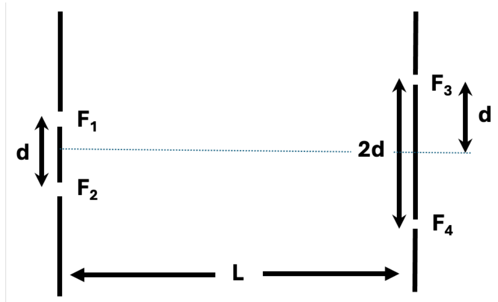
$\mu_0 = 1\times10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9)\times10^{-10}$ F/m; $c = 3\times10^8$ m/s; $h = 6\times10^{-34}$ J $\cdot$ s; $h = 3\times10^{-15}$ eV$\cdot$ s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV$\cdot$ nm; $e = 2\times10^{-19}$ C; 1 eV $= 2\times10^{-19}$ J; 1 J $= 5\times10^{18}$ eV; $m_pc^2 = 1000$ MeV; $m_ec^2 = 0{,}5$ MeV; 1μm $= 10^{-6}$ m; 1 nm $= 10^{-9}$ m; 1 Å $= 10^{-10}$ m; 1 pm $= 10^{-12}$ m; 1 GeV $= 10^3$ MeV $= 10^9$ eV; $\lambda_c = 1{,}8$ pm; $E_1 = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 a_0} = -25$ eV; $a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi)\times10^{-11}$ m; $\text{sen}(30^\circ) = 1/2$; $\text{sen}(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; $\text{sen}(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

$\text{div}\,\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\text{rot}\,\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; $\text{div}\,\mathbf{B} = 0$; $\text{rot}\,\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$; $\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0\mathbf{E}\times\mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$; $I = I_0\left[\frac{\text{sen}\,(\beta/2)}{\beta/2}\right]^2\left[\frac{\text{sen}\,(N\phi/2)}{\text{sen}(\phi/2)}\right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}a\text{sen}(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d\text{sen}(\theta)$; $\text{sen}(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; $\text{sen}(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; $\text{sen}(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$; $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1{,}22\lambda}{D}$; $\langle\text{sen}^2\theta\rangle = 1/2$; $\langle\cos^2\theta\rangle = 1/2$; .

Seção 1. Questões objetivas (7×0,7 = 4,9 pontos)

1. Uma fonte de luz coerente e monocromática de comprimento de onda λ é utilizada num experimento cuja montagem está esquematizada na figura abaixo. A distância entre o plano das fendas e o anteparo é L. Luz incide normalmente sobre o anteparo, que possui duas fendas F_1 e F_2, com a mesma abertura (desprezível) e separadas por uma distância d. A distância d é tal que os primeiros máximos laterais de interferência se localizam sobre as fendas F_3 e F_4 do segundo anteparo. Elas possuem a mesma abertura das fendas do anteparo A, mas estão separadas por uma distância $2d$. Qual opção corresponde à diferença de fase ϕ (em radianos) entre as ondas provenientes de F_1 e F_2 quando atingem as fendas F_3 e F_4 e ao valor da separação d?



(a) $\phi = 2\pi$ e $d = \sqrt{\lambda L}$

(b) $\phi =1{,}5\pi$ e $d = \sqrt{2\lambda L}$

(c) $\phi = 2\pi$ e $d = \sqrt{2\lambda L}$

(d) $\phi = 6\pi$ e $d = \sqrt{4\lambda L}$

(e) $\phi = 6\pi$ e $d = \sqrt{\lambda L}$

2. As microondas num forno de microndas tem um comprimento de onda $\lambda = 10$ cm. Qual deve ser o tamanho L mínimo do forno para que contenha no padrão de ondas estacionárias cinco planos antinodais do campo elétrico ao longo de seu comprimento ?

(a) 10 cm $\leq L <$ 20 cm

(b) 20 cm $\leq L <$ 30 cm

(c) 30 cm $\leq L <$ 40 cm

(d) 40 cm $\leq L <$ 50 cm

(e) $L \geq$ 50 cm

3. Considere a luz solar que atravessa a janela de uma casa. Tanto a parte da frente quanto a parte de trás da janela é revestida por películas polarizadoras. A intensidade da radiação solar (não polarizada) que chega na janela é I. Qual deve ser o ângulo entre os eixos de polarização das películas para que a intensidade da luz solar no interior da casa seja de $I/4$?

(a) $0°$

(b) $45°$

(c) $30°$

(d) $60°$

(e) $90°$

4. Uma onda eletromagnética harmônica plana possui uma amplitude de campo magnético dada por $B_0 = 1,0\,\mu$T, um comprimento de onda $\lambda = 300$ nm e se propaga no vácuo no sentido positivo de x. Qual opção corresponde a uma possível expressão para o campo elétrico, considerando que o vetor campo magnético dessa onda está disposto ao longo do eixo y?

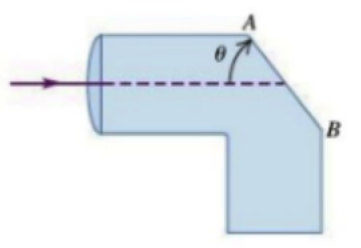
(a) $\vec{E}(x,t) = 1\,\text{V/m}\,\hat{x}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\ \text{rad/m}\right)x - (2\pi\times10^{14}\ \text{rad/s})t\right)$

(b) $\vec{E}(x,t) = 300\,\text{V/m}\,\hat{z}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\ \text{rad/m}\right)x - (2\pi\times10^{15}\ \text{rad/s})t\right)$

(c) $\vec{E}(x,t) = 300\,\text{V/m}\,\hat{z}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\ \text{rad/m}\right)x + (2\pi\times10^{14}\ \text{rad/s})t\right)$

(d) $\vec{E}(x,t) = 1\,\text{V/m}\,\hat{x}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{150\times10^{-9}}\ \text{rad/m}\right)x + (2\pi\times10^{15}\ \text{rad/s})t\right)$

5. Um feixe de luz entra num tudo sólido feito de plástico com índice de refração $n = 5/3$. A luz propaga paralelamente à superfície superior do tubo, como mostrado na figura abaixo. Você deseja cortar a face AB de tal forma que a luz seja totalmente refletida dentro do tubo após o primeiro contato com ela. Qual é o maior valor de θ para o tubo colocado em água ($n_a = 4/3$)?



(a) $\theta < 30^o$

(b) $30^o < \theta \leq 45^o$

(c) $45^o < \theta \leq 60^o$

(d) $\theta > 60^o$

6. Podemos modelar razoavelmente bem o bulbo de uma lâmpada incandescente por uma esfera de diâmetro d. Tipicamente, apenas 5% da energia vai para produção de luz visível, o restante vai para a região não visível do infravermelho. Podemos dizer sobre a amplitude do campo elétrico E_0 de uma onda harmônica com a mesma intensidade da luz visível produzida na superfície do bulbo de uma lâmpada incandescente que:

(a) É proporcional a d

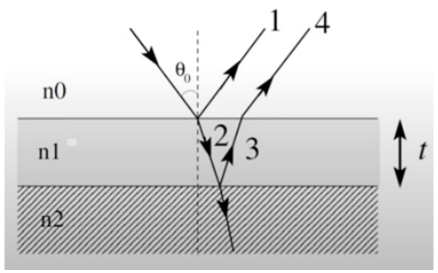
(b) É proporcional a d^2

(c) É proporcional a $1/d$

(d) É proporcional a $1/d^2$

(e) Não depende de d

7. A figura abaixo mostra uma camada superior de índice de refração $n_1 =$ 1,5 e espessura t, depositada sobre uma camada espessa de índice de refração $n_2 = 3$. O sistema está imerso em ar ($n_0 = 1$). Luz monocromática com comprimento de onda $\lambda_0 = 600$ nm, incide sobre a camada de espessura t com um ângulo de incidência θ_0 pequeno. Qual valor corresponde à mínima espessura t da camada superior para que ela funcione como uma camada anti-reflexo (mínima reflexão) para este comprimento de onda em incidência normal?



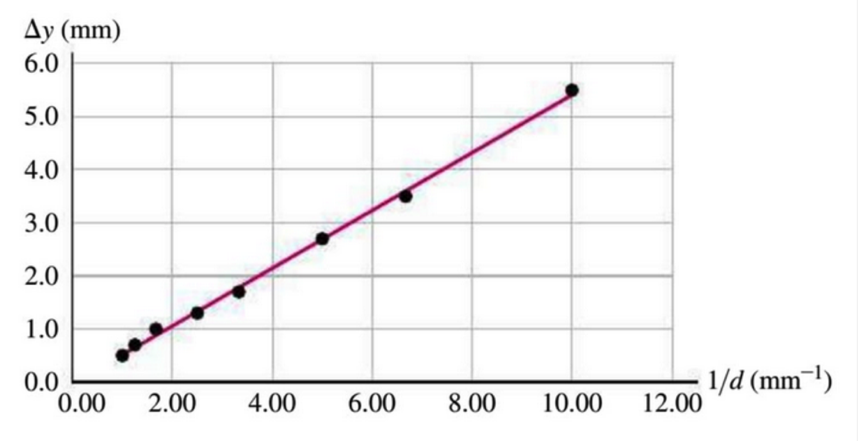
(a) $t = 100$ nm
(b) $t = 150$ nm
(c) $t = 200$ nm
(d) $t = 50$ nm

Seção 2. Questões discursivas (1 × 2,6 + 1 × 2,5 = 5,1)

1. [2,6 pontos]
O campo elétrico de uma onda eltromagnética que se propaga no vácuo é dado por $\vec{E}(x, y, z, t) = (7,0\text{V/m}) \cos(\frac{\pi}{50\times 10^{-9}(m)}(z + ct))\hat{x}$. Em função dos dados do enunciado e das constantes fundamentais dadas no formulário, determine:

(a) [0,4 ponto] A direção e o sentido de propagação da onda eletromagnética.
(b) [0,4 ponto] A frequência da onda eletromagnética.
(c) [1,0 ponto] O vetor campo magnético $\vec{B}(x, y, z, t)$ da onda eletromagnética.
(d) [0,8 ponto] O vetor de Poynting associado a esta onda eletromagnética.

2. [2,5 pontos]
Em seu trabalho numa empresa de ótica, você é encarregado de determinar o comprimento de onda λ da luz produzida por um laser. Para isso, você passa a luz do laser por duas fendas finas separadas por uma distância d. Você observa o padrão de interferência num anteparo distante $0,900$m das fendas e mede a separação Δy entre franjas claras adjacentes na porção do padrão próxima ao centro do anteparo. Usando um microscópio, você mede também d. Mas ambos Δy e d são pequenos e difíceis de medir precisamente, então você repete os experimentos para diferentes pares de fendas, cada um com um diferente valor de d. Seus resultados são mostrados na figura abaixo, onde você graficou Δy como função de $1/d$. A linha no gráfico corresponde à melhor reta que se ajusta aos resultados. Considere aproximação de pequenos ângulos: $\sin(\theta) \approx \theta$.



(a) [1,0 ponto] Explique porque os resultados experimentais graficados como na figura podem ser representados por uma reta.

(b) [1,5 pontos] Use a figura para determinar o comprimento de onda λ do laser.

Gabarito para Versão $\boxed{\mathsf{B}}$

Seção 1. Questões objetivas (7×0,7 = 4,9 pontos)

1. (a)
2. (b)
3. (b)
4. (b)
5. (b)
6. (c)
7. (a)

Seção 2. Questões discursivas (1 × 2,6 + 1 × 2,5 = 5,1)

1. **Resolução:**

■

2. **Resolução:**

■

1. a) O termo $(z+ct)$ indica que a onda se propaga na direção negativa do eixo z, $-\hat{z}$

b) Como $\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right] = \cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}z + \frac{\pi c}{50\times10^{-9}}t\right]$

$$\vec{E} = 7\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}z + \frac{\pi c}{50\times10^{-9}}t\right]\hat{x}$$

Como a forma geral da onda é $\vec{E} = E_0\cos(kz - \omega t + \phi)$,

$\omega = 2\pi f = \frac{\pi c}{50\times10^{-9}} \Rightarrow f = \frac{3\times10^{8}}{100\times10^{-9}} = 3\times10^{15}\ Hz.$

c) $\vec{B} = \frac{1}{c}\hat{k}\times\vec{E}$, com $\hat{k} = -\hat{z}$ o vetor unitário na direção de propagação da onda.

$$\vec{B} = (-\hat{y})\frac{7}{c}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]$$

$$\vec{B} = -2{,}33\times10^{-8}\,\hat{y}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]$$

Alternativamente, pode ser justificado que a direção de $\vec{B}$ é $(-\hat{y})$ usando-se o fato que a direção de propagação da onda $(-\hat{z})$ é dada pelo produto vetorial $\vec{E}\times\vec{B}$ e que $\vec{E}$ está na direção $\hat{x}$.

d) $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left\{7\hat{x}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\times 2{,}33\times10^{-8}(-\hat{y})\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\right\}$$

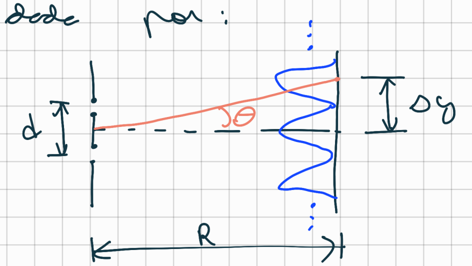
$$\vec{S} = \frac{7\times2{,}33\times10^{-8}}{10^{-6}}\cos^2\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right](-\hat{z})$$

$$\vec{S} = -0{,}16\cos^2\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\hat{z}$$

D2

a)

A separação Δy entre franjas claras num padrão de interferência de duas fendas finas é dada por:



$d \operatorname{sen}\theta = \lambda$

$\operatorname{sen}\theta \cong \frac{\Delta y}{R}$, para ângulos pequenos, assim:

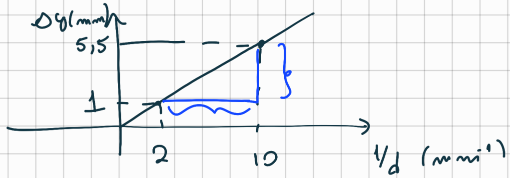
$$d \frac{\Delta y}{R} = \lambda$$

$$\Delta y = (\lambda R) \frac{1}{d}$$

Δy como função de $\frac{1}{d}$ é uma reta, com coeficiente angular dado por λR e coeficiente linear igual a zero.

b) Pelos dados da reta

$$\Delta y = A \left(\frac{1}{d}\right) + B$$



O coeficiente angular da reta é dado por:

$$A = \frac{(5,5 - 1,0)\ mm}{(10 - 2)\ mm^{-1}}$$

$$A = \frac{4,5}{8}\ mm^2$$

$$A = \lambda R \ ; \quad \lambda = \frac{A}{R}$$

$$\lambda = \frac{4,5}{8} \frac{mm^2}{0,900\ m}$$

$$\lambda = \frac{\cancel{4,5}^{\,1} \times (10^{-3} m)^2}{8 \times 2\cancel{9,0} \times 10^{-1}\ m} = \frac{1}{16} \times \frac{10^{-6}}{10^{-1}}\ m$$

$$\lambda = \frac{1}{16} \times 10^{-5}\ m$$

100 | 16
040   0,0625
080
00

$$\lambda = 0,0625 \times 10^{-5}\ m$$

$$\lambda = 625 \times 10^{-9}\ m$$

$$\boxed{\lambda = 625\ nm}$$

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Física IV-A – 2024/2 – P1- 30/09/2024
VERSÃO: C

Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

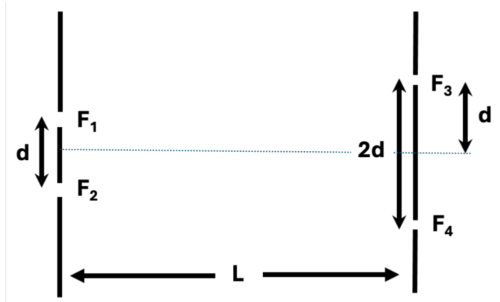
$\mu_0 = 1\times10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9)\times10^{-10}$ F/m; $c = 3\times10^8$ m/s; $h = 6\times10^{-34}$ J $\cdot$ s; $h = 3\times10^{-15}$ eV$\cdot$ s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV$\cdot$ nm; $e = 2\times10^{-19}$ C; 1 eV $= 2\times10^{-19}$ J; 1 J $= 5\times10^{18}$ eV; $m_pc^2 = 1000$ MeV; $m_ec^2 = 0{,}5$ MeV; 1μm $= 10^{-6}$ m; 1 nm $= 10^{-9}$ m; 1 Å $= 10^{-10}$ m; 1 pm $= 10^{-12}$ m; 1 GeV $= 10^3$ MeV $= 10^9$ eV; $\lambda_c = 1{,}8$ pm; $E_1 = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 a_0} = -25$ eV; $a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi)\times10^{-11}$ m; sen$(30°) = 1/2$; sen$(45°) = \sqrt{2}/2$; sen$(60°) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

div $\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; rot $\mathbf{E} = -\dfrac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; div $\mathbf{B} = 0$; rot $\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0\dfrac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$; $\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0\mathbf{E}\times\mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$; $I = I_0\left[\frac{\text{sen }(\beta/2)}{\beta/2}\right]^2\left[\frac{\text{sen }(N\phi/2)}{\text{sen}(\phi/2)}\right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}a\text{sen}(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d\text{sen}(\theta)$; sen$(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; sen$(\theta_m^{(d)}) = (m + n/N)(\lambda/d)$; sen$(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$; $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1{,}22\lambda}{D}$; $\langle\text{sen}^2\theta\rangle = 1/2$; $\langle\cos^2\theta\rangle = 1/2$; .

Seção 1. Questões objetivas (7×0,7 = 4,9 pontos)

1. Uma fonte de luz coerente e monocromática de comprimento de onda λ é utilizada num experimento cuja montagem está esquematizada na figura abaixo. A distância entre o plano das fendas e o anteparo é L. Luz incide normalmente sobre o anteparo, que possui duas fendas F_1 e F_2, com a mesma abertura (desprezível) e separadas por uma distância d. A distância d é tal que os primeiros máximos laterais de interferência se localizam sobre as fendas F_3 e F_4 do segundo anteparo. Elas possuem a mesma abertura das fendas do anteparo A, mas estão separadas por uma distância $2d$. Qual opção corresponde à diferença de fase ϕ (em radianos) entre as ondas provenientes de F_1 e F_2 quando atingem as fendas F_3 e F_4 e ao valor da separação d?



(a) $\phi = 2\pi$ e $d = \sqrt{\lambda L}$
(b) $\phi =1{,}5\pi$ e $d = \sqrt{2\lambda L}$
(c) $\phi = 2\pi$ e $d = \sqrt{2\lambda L}$
(d) $\phi = 6\pi$ e $d = \sqrt{4\lambda L}$
(e) $\phi = 6\pi$ e $d = \sqrt{\lambda L}$

2. Uma onda eletromagnética harmônica plana possui uma amplitude de campo magnético dada por $B_0 = 1,0\,\mu$T, um comprimento de onda $\lambda = 300$ nm e se propaga no vácuo no sentido positivo de x. Qual opção corresponde a uma possível expressão para o campo elétrico, considerando que o vetor campo magnético dessa onda está disposto ao longo do eixo y?

(a) $\vec{E}(x,t) = 1\text{ V/m}\,\hat{x}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m}\right)x - \left(2\pi\times10^{14}\text{ rad/s}\right)t\right)$

(b) $\vec{E}(x,t) = 300\text{ V/m}\,\hat{z}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m}\right)x - \left(2\pi\times10^{15}\text{ rad/s}\right)t\right)$

(c) $\vec{E}(x,t) = 300\text{ V/m}\,\hat{z}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m}\right)x + \left(2\pi\times10^{14}\text{ rad/s}\right)t\right)$

(d) $\vec{E}(x,t) = 1\text{ V/m}\,\hat{x}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{150\times10^{-9}}\text{ rad/m}\right)x + \left(2\pi\times10^{15}\text{ rad/s}\right)t\right)$

3. As microondas num forno de microndas tem um comprimento de onda $\lambda = 10$ cm. Qual deve ser o tamanho L mínimo do forno para que contenha no padrão de ondas estacionárias cinco planos antinodais do campo elétrico ao longo de seu comprimento ?

(a) $10\text{ cm} \leq L < 20\text{ cm}$

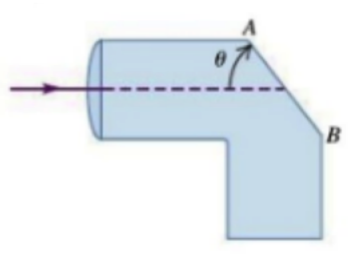
(b) $20\text{ cm} \leq L < 30\text{ cm}$

(c) $30\text{ cm} \leq L < 40\text{ cm}$

(d) $40\text{ cm} \leq L < 50\text{ cm}$

(e) $L \geq 50\text{ cm}$

4. Um feixe de luz entra num tudo sólido feito de plástico com índice de refração $n = 5/3$. A luz propaga paralelamente à superfície superior do tubo, como mostrado na figura abaixo. Você deseja cortar a face AB de tal forma que a luz seja totalmente refletida dentro do tubo após o primeiro contato com ela. Qual é o maior valor de θ para o tubo colocado em água ($n_a = 4/3$)?



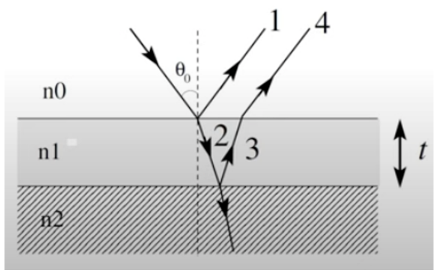
(a) $\theta < 30^o$

(b) $30^o < \theta \leq 45^o$

(c) $45^o < \theta \leq 60^o$

(d) $\theta > 60^o$

5. A figura abaixo mostra uma camada superior de índice de refração n_1= 1,5 e espessura t, depositada sobre uma camada espessa de índice de refração $n_2 = 3$. O sistema está imerso em ar ($n_0 = 1$). Luz monocromática com comprimento de onda $\lambda_0 = 600$ nm, incide sobre a camada de espessura t com um ângulo de incidência θ_0 pequeno. Qual valor corresponde à mínima espessura t da camada superior para que ela funcione como uma camada anti-reflexo (mínima reflexão) para este comprimento de onda em incidência normal?



(a) $t = 100$ nm
(b) $t = 150$ nm
(c) $t = 200$ nm
(d) $t = 50$ nm

6. Podemos modelar razoavelmente bem o bulbo de uma lâmpada incandescente por uma esfera de diâmetro d. Tipicamente, apenas 5% da energia vai para produção de luz visível, o restante vai para a região não visível do infravermelho. Podemos dizer sobre a amplitude do campo elétrico E_0 de uma onda harmônica com a mesma intensidade da luz visível produzida na superfície do bulbo de uma lâmpada incandescente que:

(a) É proporcional a d
(b) É proporcional a d^2
(c) É proporcional a $1/d$
(d) É proporcional a $1/d^2$
(e) Não depende de d

7. Considere a luz solar que atravessa a janela de uma casa. Tanto a parte da frente quanto a parte de trás da janela é revestida por películas polarizadoras. A intensidade da radiação solar (não polarizada) que chega na janela é I. Qual deve ser o ângulo entre os eixos de polarização das películas para que a intensidade da luz solar no interior da casa seja de $I/4$?

(a) 0°
(b) 45°
(c) 30°
(d) 60°
(e) 90°

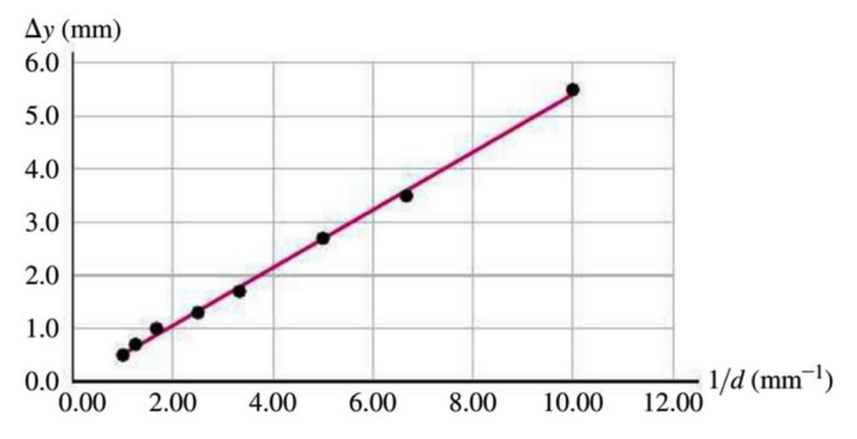
Seção 2. Questões discursivas (1 × 2,6 + 1 × 2,5 = 5,1)

1. [2,6 pontos]
O campo elétrico de uma onda eltromagnética que se propaga no vácuo é dado por $\vec{E}(x, y, z, t) = (7,0\text{V/m})\cos(\frac{\pi}{50\times10^{-9}(m)}(z+ct))\hat{x}$. Em função dos dados do enunciado e das constantes fundamentais dadas no formulário, determine:

(a) [0,4 ponto] A direção e o sentido de propagação da onda eletromagnética.
(b) [0,4 ponto] A frequência da onda eletromagnética.
(c) [1,0 ponto] O vetor campo magnético $\vec{B}(x, y, z, t)$ da onda eletromagnética.
(d) [0,8 ponto] O vetor de Poynting associado a esta onda eletromagnética.

2. [2,5 pontos]
Em seu trabalho numa empresa de ótica, você é encarregado de determinar o comprimento de onda λ da luz produzida por um laser. Para isso, você passa a luz do laser por duas fendas finas separadas por uma distância d. Você observa o padrão de interferência num anteparo distante 0,900m das fendas e mede a separação Δy entre franjas claras adjacentes na porção do padrão próxima ao centro do anteparo. Usando um microscópio, você mede também d. Mas ambos Δy e d são pequenos e difíceis de medir precisamente, então você repete os experimentos para diferentes pares de fendas, cada um com um diferente valor de d. Seus resultados são mostrados na figura abaixo, onde você graficou Δy

como função de $1/d$. A linha no gráfico corresponde à melhor reta que se ajusta aos resultados. Considere aproximação de pequenos ângulos: $\sin(\theta) \approx \theta$.



(a) [1,0 ponto] Explique porque os resultados experimentais graficados como na figura podem ser representados por uma reta.

(b) [1,5 pontos] Use a figura para determinar o comprimento de onda λ do laser.

Gabarito para Versão $\boxed{\mathsf{C}}$

Seção 1. Questões objetivas (7×0,7 = 4,9 pontos)

1. (a)

2. (b)

3. (b)

4. (b)

5. (a)

6. (c)

7. (b)

Seção 2. Questões discursivas (1 × 2,6 + 1 × 2,5 = 5,1)

1. **Resolução:**

■

2. **Resolução:**

■

1. a) O termo $(z+ct)$ indica que a onda se propaga na direção negativa do eixo z, $-\hat{z}$

b) Como $\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right] = \cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}z + \frac{\pi c}{50\times10^{-9}}t\right]$

$$\vec{E} = 7\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}z + \frac{\pi c}{50\times10^{-9}}t\right]\hat{x}$$

Como a forma geral da onda é $\vec{E} = E_0\cos(kz - \omega t + \phi)$,

$$\omega = 2\pi f = \frac{\pi c}{50\times10^{-9}} \Rightarrow f = \frac{3\times10^{8}}{100\times10^{-9}} = 3\times10^{15}\,Hz.$$

c) $\vec{B} = \frac{1}{c}\hat{k}\times\vec{E}$, com $\hat{k} = -\hat{z}$ o vetor unitário na direção de propagação da onda.

$$\vec{B} = (-\hat{y})\,\frac{7}{c}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]$$

$$\vec{B} = -2{,}33\times10^{-8}\,\hat{y}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]$$

Alternativamente, pode ser justificado que a direção de $\vec{B}$ é $(-\hat{y})$ usando-se o fato que a direção de propagação da onda $(-\hat{z})$ é dada pelo produto vetorial $\vec{E}\times\vec{B}$ e que $\vec{E}$ está na direção $\hat{x}$.

d) $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left\{7\hat{x}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\times 2{,}33\times10^{-8}(-\hat{y})\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\right\}$$

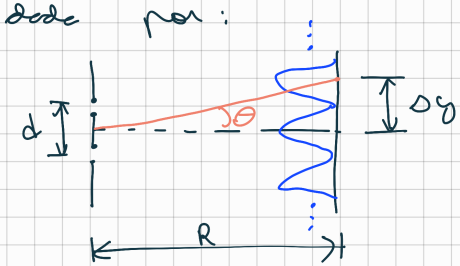
$$\vec{S} = \frac{7\times2{,}33\times10^{-8}}{10^{-6}}\cos^2\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right](-\hat{z})$$

$$\vec{S} = -0{,}16\cos^2\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\hat{z}$$

D2

a)

A separação Δy entre franjas claras num padrão de interferência de duas fendas finas é dada por:



$$d \,\text{sen}\, \theta = \lambda$$

$$\text{sen}\, \theta \cong \frac{\Delta y}{R}$$, para ângulos pequenos, assim:

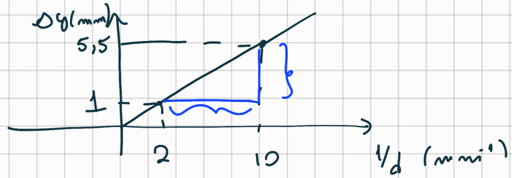
$$d \frac{\Delta y}{R} = \lambda$$

$$\boxed{\Delta y = (\lambda R) \frac{1}{d}}$$

Δy como função de $\frac{1}{d}$ é uma reta, com coeficiente angular dado por λR e coeficiente linear igual a zero.

b) Pelos dados da reta

$$\Delta y = A \left(\frac{1}{d}\right) + B$$



O coeficiente angular da reta é dado por:

$$A = \frac{(5,5 - 1,0)\ mm}{(10 - 2)\ mm\,m^{-1}}$$

$$A = \frac{4,5}{8}\ mm\,m^{2}$$

$$A = \lambda R \ ; \quad \lambda = \frac{A}{R}$$

$$\lambda = \frac{4,5}{8}\ \frac{mm^2}{0,900\ m}$$

$$\lambda = \frac{\cancel{4,5}^{\,1} \times (10^{-3} m)^2}{8 \times \cancel{9}\,2 \times 10^{-1}\ m} = \frac{1}{16}\ \frac{\times 10^{-6}}{10^{-1}}\ m$$

$$\lambda = \frac{1}{16} \times 10^{-5}\ m$$

$$\begin{array}{r|l} 100 & 16 \\ \hline 040 & 0,0625 \\ 080 & \\ 00 & \end{array}$$

$$\lambda = 0,0625 \times 10^{-5}\ m$$

$$\lambda = 625 \times 10^{-9}\ m \qquad \boxed{\lambda = 625\ nm}$$

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Física IV-A – 2024/2 – P1- 30/09/2024
VERSÃO: F

Formulário

CONSTANTES NUMÉRICAS

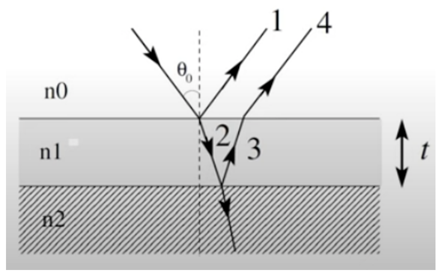
$\mu_0 = 1\times10^{-6}$ H/m; $\varepsilon_0 = (1/9)\times10^{-10}$ F/m; $c = 3\times10^8$ m/s; $h = 6\times10^{-34}$ J $\cdot$ s; $h = 3\times10^{-15}$ eV$\cdot$ s; $\hbar = h/(2\pi)$; $hc = 900$ eV$\cdot$ nm; $e = 2\times10^{-19}$ C; 1 eV $= 2\times10^{-19}$ J; 1 J $= 5\times10^{18}$ eV; $m_pc^2 = 1000$ MeV; $m_ec^2 = 0{,}5$ MeV; 1μm $= 10^{-6}$ m; 1 nm $= 10^{-9}$ m; 1 Å $= 10^{-10}$ m; 1 pm $= 10^{-12}$ m; 1 GeV $= 10^3$ MeV $= 10^9$ eV; $\lambda_c = 1{,}8$ pm; $E_1 = \frac{-e^2}{8\pi\varepsilon_0 a_0} = -25$ eV; $a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m_e e^2} = (9/\pi)\times10^{-11}$ m; sen$(30^\circ) = 1/2$; sen$(45^\circ) = \sqrt{2}/2$; sen$(60^\circ) = \sqrt{3}/2$

FORMULÁRIO GERAL

div $\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$; rot $\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$; div $\mathbf{B} = 0$; rot $\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$; $\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mu_0$; $\mathbf{p} = \varepsilon_0\mathbf{E}\times\mathbf{B}$; $u = \varepsilon_0E^2/2 + B^2/(2\mu_0)$; $\mathcal{P} = S/c$; $F = \mathcal{P}A$; $I = I_0\left[\frac{\text{sen }(\beta/2)}{\beta/2}\right]^2\left[\frac{\text{sen }(N\phi/2)}{\text{sen}(\phi/2)}\right]^2$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}a\text{sen}(\theta)$; $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d\text{sen}(\theta)$; sen$(\theta_m^{(d)}) = m(\lambda/a)$; sen$(\theta_m^{(d)}) = (m+n/N)(\lambda/d)$; sen$(\theta_m^{(c)}) = m(\lambda/d)$; $R = mN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; $\theta_R = \frac{1{,}22\lambda}{D}$; $\langle\text{sen}^2\theta\rangle = 1/2$; $\langle\cos^2\theta\rangle = 1/2$; .

Seção 1. Questões objetivas (7×0,7 = 4,9 pontos)

1. A figura abaixo mostra uma camada superior de índice de refração $n_1 =$ 1,5 e espessura t, depositada sobre uma camada espessa de índice de refração $n_2 = 3$. O sistema está imerso em ar ($n_0 = 1$). Luz monocromática com comprimento de onda $\lambda_0 = 600$ nm, incide sobre a camada de espessura t com um ângulo de incidência θ_0 pequeno. Qual valor corresponde à mínima espessura t da camada superior para que ela funcione como uma camada anti-reflexo (mínima reflexão) para este comprimento de onda em incidência normal?

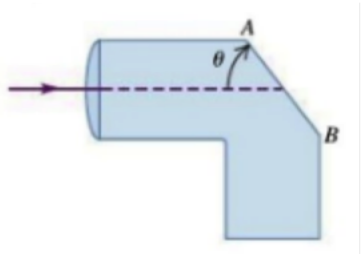


(a) $t = 100$ nm
(b) $t = 150$ nm
(c) $t = 200$ nm
(d) $t = 50$ nm

2. Podemos modelar razoavelmente bem o bulbo de uma lâmpada incandescente por uma esfera de diâmetro d. Tipicamente, apenas 5% da energia vai para produção de luz visível, o restante vai para a região não visível do infravermelho. Podemos dizer sobre a amplitude do campo elétrico E_0 de uma onda harmônica com a mesma intensidade da luz visível produzida na superfície do bulbo de uma lâmpada incandescente que:

(a) É proporcional a d
(b) É proporcional a d^2
(c) É proporcional a $1/d$
(d) É proporcional a $1/d^2$
(e) Não depende de d

3. Um feixe de luz entra num tudo sólido feito de plástico com índice de refração $n = 5/3$. A luz propaga paralelamente à superfície superior do tubo, como mostrado na figura abaixo. Você deseja cortar a face AB de tal forma que a luz seja totalmente refletida dentro do tubo após o primeiro contato com ela. Qual é o maior valor de θ para o tubo colocado em água ($n_a = 4/3$)?



(a) $\theta < 30^o$

(b) $30^o < \theta \leq 45^o$

(c) $45^o < \theta \leq 60^o$

(d) $\theta > 60^o$

4. Uma onda eletromagnética harmônica plana possui uma amplitude de campo magnético dada por $B_0 = 1,0\,\mu$T, um comprimento de onda $\lambda = 300$ nm e se propaga no vácuo no sentido positivo de x. Qual opção corresponde a uma possível expressão para o campo elétrico, considerando que o vetor campo magnético dessa onda está disposto ao longo do eixo y?

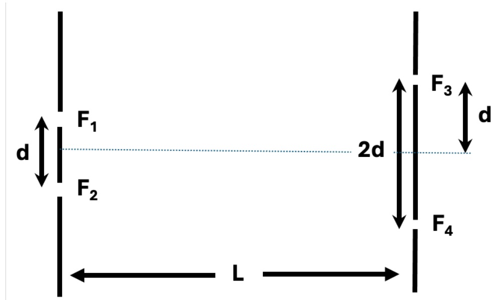
(a) $\vec{E}(x,t) = 1\text{ V/m}\,\hat{x}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m}\right)x - (2\pi\times10^{14}\text{ rad/s})t\right)$

(b) $\vec{E}(x,t) = 300\text{ V/m}\,\hat{z}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m}\right)x - (2\pi\times10^{15}\text{ rad/s})t\right)$

(c) $\vec{E}(x,t) = 300\text{ V/m}\,\hat{z}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{300\times10^{-9}}\text{ rad/m}\right)x + (2\pi\times10^{14}\text{ rad/s})t\right)$

(d) $\vec{E}(x,t) = 1\text{ V/m}\,\hat{x}\cos\left(\left(\frac{2\pi}{150\times10^{-9}}\text{ rad/m}\right)x + (2\pi\times10^{15}\text{ rad/s})t\right)$

5. Uma fonte de luz coerente e monocromática de comprimento de onda λ é utilizada num experimento cuja montagem está esquematizada na figura abaixo. A distância entre o plano das fendas e o anteparo é L. Luz incide normalmente sobre o anteparo, que possui duas fendas F_1 e F_2, com a mesma abertura (desprezível) e separadas por uma distância d. A distância d é tal que os primeiros máximos laterais de interferência se localizam sobre as fendas F_3 e F_4 do segundo anteparo. Elas possuem a mesma abertura das fendas do anteparo A, mas estão separadas por uma distância $2d$. Qual opção corresponde à diferença de fase ϕ (em radianos) entre as ondas provenientes de F_1 e F_2 quando atingem as fendas F_3 e F_4 e ao valor da separação d?



(a) $\phi = 2\pi$ e $d = \sqrt{\lambda L}$

(b) $\phi =1{,}5\pi$ e $d = \sqrt{2\lambda L}$

(c) $\phi = 2\pi$ e $d = \sqrt{2\lambda L}$

(d) $\phi = 6\pi$ e $d = \sqrt{4\lambda L}$

(e) $\phi = 6\pi$ e $d = \sqrt{\lambda L}$

6. As microondas num forno de microndas tem um comprimento de onda $\lambda = 10$ cm. Qual deve ser o tamanho L mínimo do forno para que contenha no padrão de ondas estacionárias cinco planos antinodais do campo elétrico ao longo de seu comprimento ?

(a) 10 cm $\leq L <$ 20 cm

(b) 20 cm $\leq L <$ 30 cm

(c) 30 cm $\leq L <$ 40 cm

(d) 40 cm $\leq L <$ 50 cm

(e) $L \geq$ 50 cm

7. Considere a luz solar que atravessa a janela de uma casa. Tanto a parte da frente quanto a parte de trás da janela é revestida por películas polarizadoras. A intensidade da radiação solar (não polarizada) que chega na janela é I. Qual deve ser o ângulo entre os eixos de polarização das películas para que a intensidade da luz solar no interior da casa seja de $I/4$?

   (a) $0°$

   (b) $45°$

   (c) $30°$

   (d) $60°$

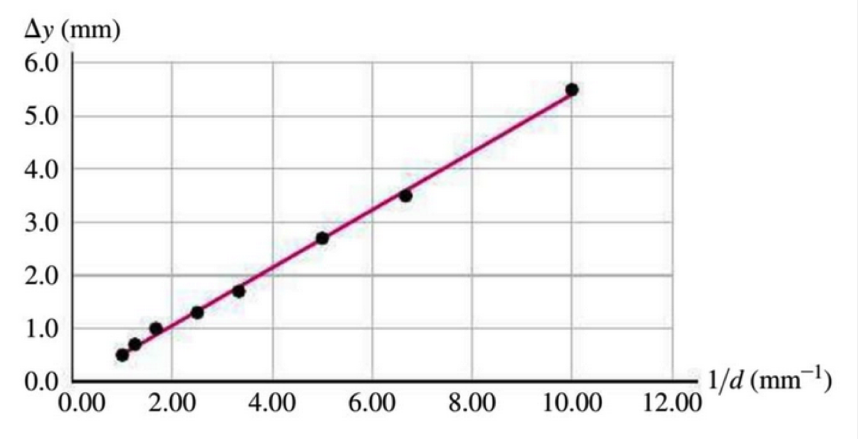
   (e) $90°$

Seção 2. Questões discursivas ($1 \times 2{,}6 + 1 \times 2{,}5 = 5{,}1$)

1. [2,6 pontos]
   O campo elétrico de uma onda eltromagnética que se propaga no vácuo é dado por $\vec{E}(x,y,z,t) = (7{,}0\text{V/m})\cos(\frac{\pi}{50\times10^{-9}(m)}(z+ct))\hat{x}$. Em função dos dados do enunciado e das constantes fundamentais dadas no formulário, determine:

   (a) [0,4 ponto] A direção e o sentido de propagação da onda eletromagnética.
   (b) [0,4 ponto] A frequência da onda eletromagnética.
   (c) [1,0 ponto] O vetor campo magnético $\vec{B}(x,y,z,t)$ da onda eletromagnética.
   (d) [0,8 ponto] O vetor de Poynting associado a esta onda eletromagnética.

2. [2,5 pontos]
   Em seu trabalho numa empresa de ótica, você é encarregado de determinar o comprimento de onda λ da luz produzida por um laser. Para isso, você passa a luz do laser por duas fendas finas separadas por uma distância d. Você observa o padrão de interferência num anteparo distante $0,900$m das fendas e mede a separação Δy entre franjas claras adjacentes na porção do padrão próxima ao centro do anteparo. Usando um microscópio, você mede também d. Mas ambos Δy e d são pequenos e difíceis de medir precisamente, então você repete os experimentos para diferentes pares de fendas, cada um com um diferente valor de d. Seus resultados são mostrados na figura abaixo, onde você graficou Δy como função de $1/d$. A linha no gráfico corresponde à melhor reta que se ajusta aos resultados. Considere aproximação de pequenos ângulos: $\sin(\theta) \approx \theta$.



   (a) [1,0 ponto] Explique porque os resultados experimentais graficados como na figura podem ser representados por uma reta.

   (b) [1,5 pontos] Use a figura para determinar o comprimento de onda λ do laser.

Gabarito para Versão $\boxed{\text{F}}$

Seção 1. Questões objetivas (7×0,7 = 4,9 pontos)

1. (a)

2. (c)

3. (b)

4. (b)

5. (a)

6. (b)

7. (b)

Seção 2. Questões discursivas (1 × 2,6 + 1 × 2,5 = 5,1)

1. **Resolução:**

$\blacksquare$

2. **Resolução:**

$\blacksquare$

1. a) O termo $(z+ct)$ indica que a onda se propaga na direção negativa do eixo z, $-\hat{z}$

b) Como $\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right] = \cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}z + \frac{\pi c}{50\times10^{-9}}t\right]$

$$\vec{E} = 7\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}z + \frac{\pi c}{50\times10^{-9}}t\right]\hat{x}$$

Como a forma geral da onda é $\vec{E} = E_0\cos(kz-\omega t+\phi)$,

$\omega = 2\pi f = \frac{\pi c}{50\times10^{-9}} \Rightarrow f = \frac{3\times10^{8}}{100\times10^{-9}} = 3\times10^{15}$ Hz.

c) $\vec{B} = \frac{1}{c}\hat{k}\times\vec{E}$, com $\hat{k} = -\hat{z}$ o vetor unitário na direção de propagação da onda.

$$\vec{B} = (-\hat{y})\frac{7}{c}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]$$

$$\vec{B} = -2{,}33\times10^{-8}\,\hat{y}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]$$

Alternativamente, pode ser justificado que a direção de $\vec{B}$ é $(-\hat{y})$ usando-se o fato que a direção de propagação da onda $(-\hat{z})$ é dada pelo produto vetorial $\vec{E}\times\vec{B}$ e que $\vec{E}$ está na direção $\hat{x}$.

d) $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left\{7\hat{x}\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\times 2{,}33\times10^{-8}(-\hat{y})\cos\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\right\}$$

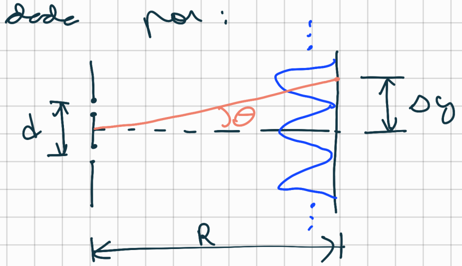
$$\vec{S} = \frac{7\times2{,}33\times10^{-8}}{10^{-6}}\cos^2\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right](-\hat{z})$$

$$\vec{S} = -0{,}16\cos^2\left[\frac{\pi}{50\times10^{-9}}(z+ct)\right]\hat{z}$$

D2

a)

A separação Δy entre franjas claras num padrão de interferência de duas fendas finas é dada por:



$d\,\text{sen}\,\theta = \lambda$

$\text{sen}\,\theta \cong \frac{\Delta y}{R}$, para ângulos pequenos, assim:

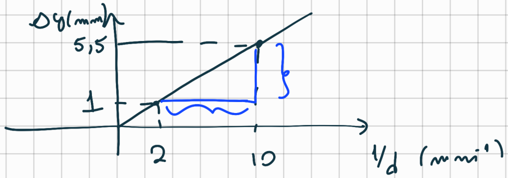
$$d\,\frac{\Delta y}{R} = \lambda$$

$$\Delta y = (\lambda R)\,\frac{1}{d}$$

Δy como função de $\frac{1}{d}$ é uma reta, com coeficiente angular dado por λR e coeficiente linear igual a zero.

b) Pelos dados da reta

$$\Delta y = A\left(\frac{1}{d}\right) + B$$



O coeficiente angular da reta é dado por:

$$A = \frac{(5,5 - 1,0)\ mm}{(10 - 2)\ mm^{-1}}$$

$$A = \frac{4,5}{8}\ mm^2$$

$$A = \lambda R \ ; \quad \lambda = \frac{A}{R}$$

$$\lambda = \frac{4,5}{8}\ \frac{mm^2}{0,900\ m}$$

$$\lambda = \frac{\cancel{4,5}^{\,1} \times (10^{-3} m)^2}{8 \times \cancel{9}^{\,2} \times 10^{-1}\ m} = \frac{1}{16}\ \times \frac{10^{-6}}{10^{-1}}\ m$$

$$\lambda = \frac{1}{16} \times 10^{-5}\ m$$

$$\begin{array}{r|l} 100 & 16 \\ \hline 040 & 0,0625 \\ 080 & \\ 00 & \end{array}$$

$$\lambda = 0,0625 \times 10^{-5}\ m$$

$$\lambda = 625 \times 10^{-9}\ m$$

$$\boxed{\lambda = 625\ nm}$$