

6ª LISTA DE EXERCÍCIOS

**Disciplina:** TE069 - Física de Semicondutores

**Professor:** César Augusto Dartora<sup>1</sup>

---

- 1 Uma onda eletromagnética monocromática é descrita pela equação a seguir:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}, \quad (1)$$

onde  $\mathbf{E}_0$  é um vetor complexo porém constante. Uma fonte de radiação não-coerente emite radiação com diferentes amplitudes, direções de propagação e frequência, em cada instante de tempo, caracterizando assim que o sinal eletromagnético produzido tem certa largura espacial e também uma largura de banda. A onda produzida resultante é uma superposição das diversas componentes emitidas pela fonte. Vamos simplificar um pouco esse panorama, considerando uma fonte que emite ondas polarizadas na direção  $x$ , de frequência  $\omega$  e propagando-se ao longo de  $z$  mas com uma incerteza na fase da onda  $\theta$ :

$$\mathbf{E}(\theta) = E_0(\theta) \hat{\mathbf{a}}_x e^{i(\omega t - kz + \theta)}. \quad (2)$$

A superposição de ondas com fases diferentes resulta em:

$$\mathbf{E} = \int E_0(\theta) \hat{\mathbf{a}}_x e^{i(\omega t - kz + \theta)} d\theta. \quad (3)$$

Explique com base na expressão acima, porque uma fonte de luz coerente (como um laser) é capaz de produzir radiação muito mais intensa do que uma fonte de luz incoerente (como um led). Qual é a diferença essencial?

- 2 O primeiro dispositivo baseado nas leis da Mecânica Quântica capaz de emitir radiação altamente coerente foi o MASER de amônia, que rendeu o prêmio Nobel de 1964 a Townes, Basov e Prokhorov. Descreva o princípio de funcionamento do MASER de amônia.
- 3 O que são semicondutores de gap direto e gap indireto? Por que usualmente se deseja operação com gap direto? Descreva as relações de conservação de energia e momento para transições de gap direto e indireto, considerando-se no problema o par elétron-buraco, o fóton e o fônon no caso indireto.
- 4 Descreva os processos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada de fótons. Quais os princípios físicos estão envolvidos? O que são regras de seleção de uma transição? Qual a transição mais provável em um átomo de hidrogênio inicialmente no estado fundamental  $1s$  para estados no número quântico principal  $n = 1, 1s \rightarrow 2s$  ou  $1s \rightarrow 2p$ ? Quais as condições para que ocorra uma transição  $1s \rightarrow 2s$  pela absorção de um fóton?

---

<sup>1</sup>cadartora@eletrica.ufpr.br

- 5 A partir da lei de Planck, demonstre a lei de Stefan-Boltzmann para radiação do corpo negro. O que é a lei de deslocamento de Wien? Encontre a relação de deslocamento de Wien.
- 6 Determine a densidade de potência emitida pelo Sol (valor médio do vetor de Poynting) que chega à Terra, a partir da lei de Stefan-Boltzmann. São necessários o conhecimento da distância Terra-Sol, temperatura da superfície do Sol e raio do Sol, basicamente.
- 7 Descreva o funcionamento de um fotodetector. O que é o limite quântico de fotodetecção? Descreva os fotodetectores principais: diodo PIN e APD(avalanche).
- 8 Faça uma descrição qualitativa dos princípios de funcionamento de um laser de poço quântico. O que é um laser DFB?
- 9 Qual é a condição de inversão de populações para que haja efeito de emissão estimulada em uma junção pn semicondutora?
- 10 A cavidade conhecida como ressoador de Fabri-Perot e constituída de dois espelhos paralelos tem importantes aplicações em óptica, na obtenção do efeito laser. Para haver *lasing* (poder gerar um feixe de luz intenso e coerente) um dos requisitos é que o meio material entre os espelhos apresente ganho suficiente para compensar as perdas no comprimento de ondas de interesse e esse meio é dito ativo. Consideremos que o meio entre dois espelhos satisfaça esse primeiro requisito, ou seja, apresente ganho numa faixa de comprimentos de onda de interesse. Dessa forma a seleção da frequência (ou comprimento de onda) correta de laser deverá ser feita através do ajuste da distância  $d$  entre os espelhos. Entre os espelhos haverá a propagação de ondas eletromagnéticas em ambos os sentidos (onda propagante e onda refletida). Um dos espelhos é sempre um refletor perfeito  $R \approx 1$  enquanto o outro tem uma refletividade menor, cerca de  $R = 0.7$ , para deixar uma parte da energia contida na cavidade passar para fora, constituindo o feixe de laser desejado. Para fins de análise, consideremos que o ganho do meio ativo compense exatamente as perdas condutivas no material e as perdas nos espelhos, de forma que possamos tratar ambos os espelhos como condutores perfeitos  $\sigma \rightarrow \infty$ ,  $R = 1$ . Adota-se um sistema de coordenadas em que o eixo  $z$  é o eixo de propagação das ondas entre os dois espelhos perfeitamente paralelos entre si. O primeiro espelho é o plano  $z = 0$  e o segundo espelho é o plano  $z = d$  e podemos representar o campo elétrico entre os espelhos na forma

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r = (E_i e^{i(\omega t - kz)} + E_r e^{i(\omega t + kz)}) \hat{\mathbf{a}}_x$$

onde  $E_i$  é a amplitude do campo propagante no sentido positivo do eixo  $z$  e  $E_r$  do campo propagante no sentido oposto.

a) Lembrando que o campo elétrico tangencial à uma superfície condutora perfeita deve se anular sobre a superfície, encontre as relações entre  $E_i$  e  $E_r$  e as condições sobre o número de onda  $k = 2\pi/\lambda$  para satisfazer às condições de contorno impostas. Uma vez encontrada a forma do campo elétrico, determine o campo magnético na cavidade.

b) Para uma junção pn laser semicondutor de índice de refração  $n = \sqrt{\epsilon_r} = 4$  ativo na faixa de  $632.00nm < \lambda_0 < 633.20nm$  com cavidade óptica de dimensão  $d = 1mm$ , determine quantos e quais são os comprimentos de onda excitados na cavidade assumindo que todos os comprimentos de onda possíveis entre o mínimo e o máximo da faixa ativa sejam excitados.

Obs.:  $1nm = 10^{-9}m$

- 11 Excitações Elementares em Semicondutores: Exciton. Descreva o que é um exciton. A atração de um elétron por um buraco num semicondutor pode ser descrita pelo potencial coulombiano,

da forma:

$$U(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon r}$$

onde  $\epsilon$  é a permissividade dielétrica do meio material. O par elétron-buraco forma um "átomo" hidrogenóide, mas ao contrário do átomo de hidrogênio, onde o núcleo é muito mais massivo do que o elétron, o elétron e a lacuna tem aproximadamente a mesma massa, devendo ser caracterizados pela massa reduzida

$$m_r = \frac{m_c^* m_h^*}{m_c^* + m_h^*}.$$

Os níveis de energia, relativos ao mínimo da banda de condução ficam então quantizados na forma

$$E_n = E_c - \frac{m_r e^4}{2\hbar^2 (4\pi\epsilon)^2 n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

a) Encontre os níveis de energia excitônicos do silício, considerando-se a massa efetiva de elétrons e buracos no silício e também o  $\epsilon$  característico do mesmo.

b) Qual é a frequência do fóton absorvido para quebrar um par elétron-buraco cujo nível de energia é  $n = 1$ .

c) Qual o raio aproximado da órbita do elétron em relação ao buraco, no nível  $n = 1$ ?

d) O que são excitons de Mott e excitons de Frenkel?

**12** Escreva as equações de taxa de um laser e descreva o significado de cada termo. Além disso encontre a solução estacionária do sistema.

**13** Faça uma listagem de diodos laser, leds, fototransistores e fotodetectores comerciais.

**14** Descreva o efeito Raman e o efeito Brillouin. O que são linhas de Stokes e Anti-Stokes no espectro de um material?

**15** O que é eficiência quântica?

**16** Quantos fótons são emitidos por um laser de potência óptica 100mW operando em  $\lambda = 632.8\text{nm}$  (o laser vermelho comum) em um intervalo de 1s? E quantos fótons são emitidos por uma estação FM operando em 100.7MHz com potência de 1kW no mesmo intervalo de 1s?