

Teste 2

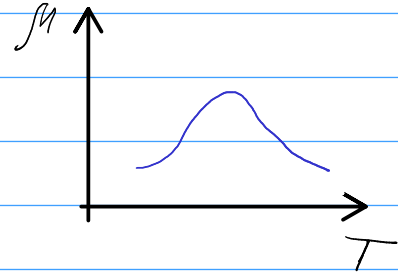
1. Quais são os principais mecanismos de difusão de portadores de carga em semicondutores (explique o processo físico subjacente)? Qual é a dependência da mobilidade com a temperatura, característica para cada um deles?

(2 v)

Os principais mecanismos são:

- (i) difusão por iões de impureza (interacção do eletrão com um ião, pela lei de Coulomb);
 (ii) difusão por fónes acústicos (que produzem uma dilatação da rede cristalina, a qual afeta o espectro eletrónico).

Para o mecanismo (i) a mobilidade $\mu \sim T^{-3/2}$, para o mecanismo (ii) $\mu \sim T^{-1/2}$.

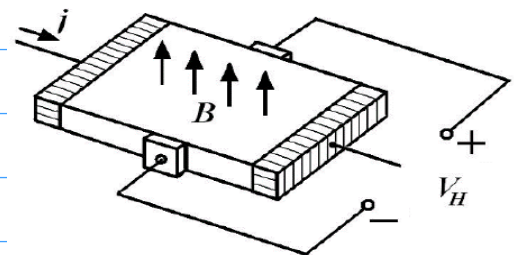


2. a) A figura mostra um esquema de medição do efeito de Hall. Para a situação mostrada na figura diga, justificando, quais são os portadores de carga maioritários (elétrons ou lacunas?).

(1 v) b) Determine a constante de Hall numa amostra de InSb dopado com aceitadores com concentração $N_a = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ sabendo que o factor de Hall é $r_H = 1.95$ quer para os electrões quer para as lacunas e o quociente entre as suas mobilidades é $\nu = \mu_e / \mu_h = 80$. Admita que $T = 300 \text{ K}$, $n_i = 1.6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e os aceitadores são completamente ionizados. Comente o resultado.

(2 v)

a) Pelo sentido dos vetores \vec{J} , \vec{B} e pela polaridade de V_H indicada, são elétrons.



b) Admitindo $p \approx N_a$, temos:*)

$$n \approx n_i^2 / N_A \approx 0.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

e

$$R_H = -\frac{r_H}{e} \frac{\nu^2 n - p}{(\nu n + p)^2} \approx -2 \cdot 10^3 \text{ cm}^3 \text{ C}^{-1}$$

*) Uma consideração mais rigorosa requer resolução da equação de neutralidade, $n + N_A = \frac{n^2}{i}$, o que dá: $n = \frac{1}{2} (\sqrt{N_A^2 + 4n_i^2} - N_A) \approx 0.47 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

ESTE RESULTADO é natural pela sinal negativo de R_H , apesar de se tratar dum SC do tipo p , o que é o resultado da mobilidade dos eletrões ser muito maior.

3. Em que consiste o efeito de Shubnikov - de Haas? Em que condições ele pode ser observado?

(1.5 v)

O efeito de Shubnikov - de Haas consiste em dependência oscilatória da condutividade em função da inversa da campo magnética aplicada. Deve-se à variação do nível de Fermi relativamente aos níveis de Landau.

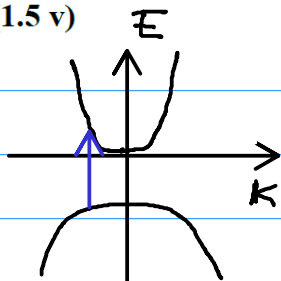
É observada em semicondutores com gás eletrónico degenerado e em campos magnéticos suficientemente fortes, $\hbar\omega_c \gg k_B T$; $\omega_c = eB/m^*$.

4. a) Determine as energias do electrão e da lacuna criados no processo de absorção dum fóton com energia $\hbar\omega > E_g$ num semiconductor com um gap direto, as bandas de condução e de valência não degeneradas, parabólicas e isotrópicas, com as massas efectivas $m_e = 0.07 m_0$ e $m_h = 0.4 m_0$, respetivamente. Tome $\hbar\omega = 1.52 \text{ eV}$ e $E_g = 1.42 \text{ eV}$.

(2 v)

b) Avalie o momento linear do electrão e do fóton (tome $\eta = 3.2$ para o índice de refração) e comente sobre a validade da aproximação usada na alínea anterior.

(1.5 v)



Considerando a transição como vertical no espaço \vec{k} , a conservação de energia dá:

$$E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h} + \hbar\omega = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}$$

de onde

$$k = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(\hbar\omega - E_g)}; \quad f_n = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}$$

A energia cinética do electrão: $E_e = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} = \frac{f_n}{m_e}(\hbar\omega - E_g)$

A energia cinética da lacuna: $E_h = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h} = \frac{\hbar}{m_h} (\hbar\omega - E_g)$.

Os valores numéricos:

$$E_e \approx 0.086 \text{ eV}; \quad E_h \approx 0.014 \text{ eV}.$$

b) O momento linear da eletrão é:

$$p_e = \hbar k = \sqrt{2m_e(\hbar\omega - E_g)} \approx 4.2 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

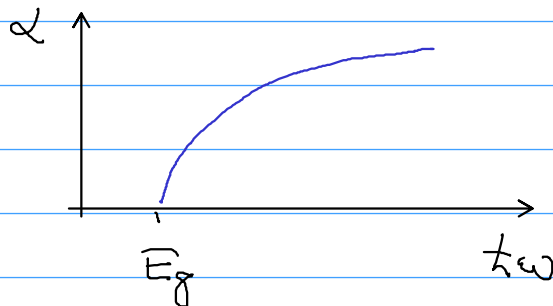
O momento linear da fotão:

$$p_f = \frac{\hbar\omega \cdot \eta}{c} = 2.6 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Como $p_e \gg p_f$, a aproximação de transição vertical é válida.

c) Desenhe um gráfico que represente, qualitativamente, o coeficiente de absorção óptica em função de $\hbar\omega$. Explique como é possível distinguir, a partir deste gráfico, um semiconductor com gap direto (que é o caso aqui) dum com gap indireto.

(1.5 v)



$$\alpha \propto \sqrt{\hbar\omega - E_g} / \omega$$

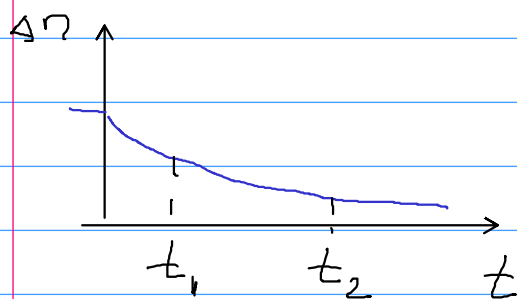
pois que $\alpha^2 \propto \frac{(\hbar\omega - E_g)}{\omega^2}$ e daí, aproximadamente, uma recta.

No caso dum SC com gap indirecto, $\alpha^2(\omega)$ não dá uma recta [mas daria uma recta a relação $\alpha^{1/2}(\omega)$].

5. a) Uma amostra de silício é iluminada e a luz cria uniformemente portadores de carga fora do equilíbrio. A certo momento a iluminação é desligada. No instante $t_1 = 10^{-4} \text{ s}$ após desligar a luz a concentração dos portadores minoritários foi $n = 10$ vezes maior do que no instante $t_2 = 10^{-3} \text{ s}$. Determine o tempo de vida admitindo que o nível de excitação foi baixo e a recombinação é não radiativa.

b) Sabendo que a mobilidade dos portadores minoritários é $\mu = 500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e a massa efectiva $m = 0.5 m_0$, determine o tempo de relaxação. Compare com o resultado obtido na alínea anterior e comente.

a) A relaxação da concentração dos portadores minoritários, após desligar a iluminação, decai de forma exponencial,



$$n(t) = n(0) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\frac{n(t_2)}{n(t_1)} = e^{-\frac{t_2 - t_1}{\tau}} \rightarrow \tau = (t_2 - t_1) / \ln \frac{n(t_1)}{n(t_2)}$$

O tempo de vida: $\tau = (10^{-3} - 10^{-4}) / \ln 10 \approx 0.4 \text{ ms}$

b) O tempo de relaxação: $\langle \tau_p \rangle = \sqrt{\frac{m \cdot m^*}{e}}$;
 $\langle \tau_p \rangle \approx 1.4 \cdot 10^{-11} \text{ s} = 14 \text{ ps}$.

O tempo de vida é muito maior do que o tempo típico entre colisões do elétron.

6. a) Explique sucintamente o que é excitação. Qual é a diferença entre o excitão de Frenkel e o excitão de Wannier-Mott? Porque os excitões normalmente não aparecem em semicondutores fortemente dopados?

(1.5 v)

b) Explique sucintamente em que consiste o efeito de Seebeck. Em que materiais este efeito é mais forte, nos metais ou nos semicondutores?

(1v)

a) O excitão é um estado ligado de elétron e lacuna. O excitão de Frenkel ocorre em materiais moleculares e tem um tamanho típico da ordem da distância interatômica (o elétron e a lacuna encontram-se ligados muito fortemente). O excitão de Wannier-Mott é típico dos semicondutores e tem um tamanho típico (o "raio de Bohr do excitão") muito maior do que a constante da rede. A sua energia de ligação é da ordem de (dezenas de) meV.

b) O efeito de Seebeck consiste no aparecimento de uma d.d.p. entre as extremidades de um material (SC ou metal) cujas temperaturas são diferentes. A d.d.p. é proporcional à diferença das temperaturas (ΔT):

$$\Delta \varphi = -\alpha \Delta T.$$

O efeito é mais forte ($|\alpha|$ maior) nos semicondutores.

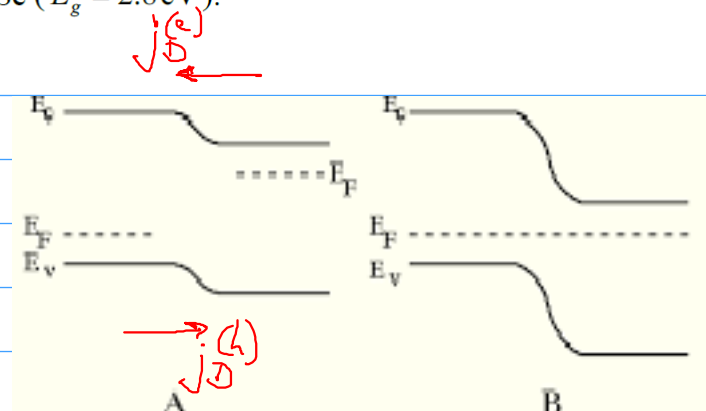
7. a) Explique sucintamente o mecanismo de geração da luz numa junção $p-n$. Desenhe esquemas de bandas eletrônicas, no equilíbrio e sob uma diferença de potencial aplicada, no regime relevante para o funcionamento de LED.

(1.5v)

b) O que determina a cor da luz emitida? Avalie o seu comprimento de onda típico para um LED de ZnSe ($E_g = 2.8 \text{ eV}$).

(1v)

c)



A - sob "bias" direto

B - no equilíbrio

Sob um "bias" direto ("+" na região p), as correntes de difusão dos elétrons e das lacunas aumentam fortemente, comparando com a situação no equilíbrio. Assim, há uma injeção intensa de elétrons e lacunas fora do equilíbrio, para a zona de depleção. A recombinação deles é responsável pela emissão do LED.

b) O comprimento de onda típico desta emissão é determinada pela energia do

gap,

$$\lambda \approx \frac{2\pi \hbar c}{E_g} = \frac{1240 \text{ nm}}{E_g [\text{eV}]} \approx 443 \text{ nm}.$$