



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEP. DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
TI0060 - MATERIAIS ELETRÔNICOS E OPTOELETRÔNICOS

Lista 2

1. Considere um metal no qual os elétrons livres obedecem à estatística de Fermi-Dirac. Sabendo que a densidade volumétrica de elétrons livres no metal é $N = 8,5 \times 10^{28}$ elétrons/m³, determine a energia de Fermi E_F a temperatura $T = 0$ K.
2. Um elétron em um cristal de germânio (Ge) tem uma massa efetiva $m^* = 0,12 m_e$, onde m_e é a massa do elétron livre. Quando um campo elétrico de 100 V/m é aplicado, calcule:
 - a) A aceleração do elétron.
 - b) A velocidade de deriva do elétron após um tempo de colisão $\tau = 10^{-13}$ s.
3. Um fio de tungstênio tem comprimento $L = 1,5$ m e área de seção transversal $A = 0,5$ mm². A densidade de elétrons livres no tungstênio é $N = 6,3 \times 10^{28}$ elétrons/m³. A resistividade do tungstênio a 20°C é $\rho_0 = 5,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ e varia com a temperatura de acordo com a relação:
$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - 20)],$$
onde $\alpha = 4,5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ é o coeficiente de variação da resistividade com a temperatura.
 - a) Determine a resistência do fio a $T = 100^\circ\text{C}$.
 - b) Se aplicarmos uma tensão de $V = 5$ V nas extremidades do fio a 100°C, qual será a densidade de corrente J ?
 - c) Determine a velocidade de deriva dos elétrons no fio nessa condição.
4. Considere um cristal de silício (Si) à temperatura de $T = 300$ K. Sabendo que a energia de Fermi do silício é $E_F = 0,55$ eV, calcule:
 - a) A probabilidade de ocupação de um estado de energia $E = 0,6$ eV.
 - b) A temperatura necessária para que a probabilidade de ocupação de um estado de energia $E = 0,6$ eV seja 0,2.
5. Dado um semiconductor intrínseco com $E_g = 1,1$ eV, $m_c^* = 0,26 m_0$, $m_v^* = 0,39 m_0$, e $T = 300$ K, calcule:
 - a) A concentração intrínseca de portadores n_i .
 - b) A posição do nível de Fermi E_F em relação ao meio do gap.
 - c) A probabilidade de ocupação de um estado na banda de condução com energia $E = E_c + 0,1$ eV.

6. Partindo da condição de equilíbrio:

$$N_c e^{-(E_c - E_F)/k_B T} = N_v e^{-(E_F - E_v)/k_B T},$$

mostre que o nível de Fermi em um semiconductor intrínseco é dado por:

$$E_F = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{3}{4}k_B T \ln \frac{m_v^*}{m_c^*} = E_i.$$

7. A concentração de elétrons em um semiconductor é dada por

$$n = 10^{16} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \text{ cm}^{-3}$$

para $0 \leq x \leq L$, onde $L = 10 \mu\text{m}$. A mobilidade do elétron e o coeficiente de difusão são $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ e $D_n = 25,9 \text{ cm}^2/\text{s}$, respectivamente. Um campo elétrico é aplicado de tal forma que a densidade de corrente total de elétrons é constante ao longo do intervalo dado de x e é $J_n = -80 \text{ A/cm}^2$. Determine a função do campo elétrico em função da distância.

8. Um resistor de silício tipo N tem um comprimento $L = 150 \mu\text{m}$, largura $W = 7,5 \mu\text{m}$ e espessura $T = 1 \mu\text{m}$. Uma tensão de 2 V é aplicada ao longo do comprimento do resistor. A concentração de impurezas doadoras varia linearmente através da espessura do resistor com $N_d = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ na superfície superior e $N_d = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ na superfície inferior. Considere uma mobilidade média dos portadores de $\mu_n = 750 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$.

- Qual é o campo elétrico no resistor?
- Determine a condutividade média do silício.
- Calcule a corrente no resistor.
- Determine a densidade de corrente próxima à superfície superior e a densidade de corrente próxima à superfície inferior.

9. Considere um semiconductor homogêneo de arseneto de gálio (GaAs) a uma temperatura de $T = 300 \text{ K}$ com $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e $N_a = 0$. Sabendo que:

- A concentração intrínseca de portadores em GaAs a 300 K é $n_i \approx 2,1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$,
- A mobilidade dos elétrons em GaAs é $\mu_n \approx 8500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,
- A mobilidade dos buracos em GaAs é $\mu_p \approx 400 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,

- Calcule as concentrações de elétrons e buracos em equilíbrio térmico.
- Para um campo elétrico aplicado de $E = 10 \text{ V/cm}$, calcule a densidade de corrente de deriva.
- Repita as partes (a) e (b) se $N_d = 0$ e $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

10. O silício é dopado com fósforo na concentração de $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Assumindo que todas as impurezas doadoras estão ionizadas e que $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ para $T = 300 \text{ K}$, determine:

- A concentração de elétrons n_0 e de buracos p_0 no equilíbrio térmico.

b) A nova posição do nível de Fermi em relação ao nível intrínseco.

11. As concentrações de elétrons e buracos como função da energia na banda de condução e na banda de valência atingem um pico em uma energia específica. Considere o silício e assuma $E_c - E_F = 0.20$ eV. Determine a energia, relativa às bordas da banda, na qual as concentrações de elétrons e buracos atingem o pico.

12. Silício a $T = 300$ K é dopado com átomos doadores de impureza em uma concentração de $N_d = 6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

a) Determine $E_c - E_F$.

b) Calcule a concentração adicional de átomos doadores de impureza que deve ser adicionada para mover o nível de Fermi uma distância kT mais próxima da borda da banda de condução.

13. Um semiconductor intrínseco à temperatura ambiente ($T = 300$ K) possui uma concentração intrínseca de portadores de carga de $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Em um experimento, a geração de pares elétron-buraco ocorre a uma taxa de $g = 5,0 \times 10^{21}$ pares/ $\text{cm}^3 \cdot \text{s}$.

A taxa de recombinação r segue a relação:

$$r = \frac{np - n_i^2}{\tau}.$$

Após um pulso de luz intenso, a concentração de elétrons e buracos no semiconductor é aumentada para $n = p = 2,0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. O tempo de vida dos portadores minoritários é $\tau = 10^{-6}$ s.

a) Determine a taxa de recombinação r no semiconductor logo após o pulso de luz.

b) Compare a taxa de recombinação com a taxa de geração g . O semiconductor está em equilíbrio ou fora do equilíbrio?