

5ª LISTA DE EXERCÍCIOS

Disciplina: TE069 - Física de Semicondutores

Professor: César Augusto Dartora¹

- 1 Deduza a relação de Einstein para o coeficiente de difusão D expresso em termos da mobilidade μ em um gás de partículas de carga q com densidade n . Dica: considere a corrente de difusão e de deriva na condição de equilíbrio do gás.
- 2 O que são os efeitos Seebeck, Thomson e Peltier? Quais são as aplicações possíveis? Qual a diferença desses efeitos termoelétricos para o efeito Joule?
- 3 Consideremos o potencial eletrostático

$$\Phi = \left\{ \begin{array}{ll} V_0 & z \leq -d/2 \\ V_0 \left[1 - 2 \frac{(z+d/2)^2}{d^2} \right] & -d/2 \leq z < 0 \\ 2V_0 \frac{(z-d/2)^2}{d^2} & 0 \leq z \leq d/2 \\ 0 & z > d/2 \end{array} \right\}$$

em uma junção PN semicondutora, sem campo externo aplicado e onde a permissividade dielétrica vale $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, com $\varepsilon_r = 11.86$.

- a) Determine o campo elétrico \mathbf{E} , o vetor densidade de fluxo \mathbf{D} e o vetor polarização \mathbf{P} nesse meio, e faça o gráfico de Φ e \mathbf{E} ;
 - b) Determine a densidade de cargas ρ , faça o gráfico em função da distância z e determine a carga total para um cilindro de seção transversal A , delimitado na região dada por $-d/2 \leq z \leq d/2$.
- 4 Determine uma expressão para o potencial interno de uma homojunção PN, $\Delta\phi_0$ em termos das dopagens do semicondutor.
 - 5 Uma junção PN abrupta é formada por duas regiões de silício dopadas com $N_a = 10^{17}$ átomos/cm³ e $N_d = 3 \times 10^{16}$ átomos/cm³. Determine o potencial interno de junção $\Delta\phi_0$ e a largura da camada de depleção L .
 - 6 Determine a corrente de saturação de um diodo PN de germânio onde $N_A = 10^{18}$ átomos/cm³, $N_D = 10^{16}$ átomos/cm³, as mobilidades dos portadores são $\mu_n = 3900 \text{cm}^2/(\text{V.s})$, $\mu_p = 1900 \text{cm}^2/(\text{V.s})$, as constantes de difusão de elétrons e lacunas $D_n = 100 \text{cm}^2/\text{s}$ e $D_p = 50 \text{cm}^2/\text{s}$, área de junção $A = 10^{-4} \text{cm}^2$ e um tempo de recombinação $\tau_p = \tau_n = 0.1 \mu\text{s}$
 - 7 Uma junção PN de Si tem em cada lado impurezas com concentração $N_D = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ e $N_A = 10^{17} \text{cm}^{-3}$. a) Calcule a posição do nível de Fermi em cada lado da junção para $T = 300\text{K}$ em relação às bandas de valência e condução. b) Desenhe o diagrama de bandas de energia para a junção em equilíbrio, e determine o valor de $\Delta\phi_0$, bem como a largura da camada de depleção.

¹cadartora@eletrica.ufpr.br

- 8 Um diodo de junção PN de Si polarizado diretamente com uma corrente constante é utilizado como termômetro. Em $T = 27^\circ\text{C}$ a tensão no diodo é de aproximadamente 700mV. a) Calcule o coeficiente de temperatura do diodo, ou seja, dV/dT . b) Qual a variação na tensão se a temperatura aumentar para 80°C ? Calcule esta variação de forma exata e compare como valor obtido supondo que a resposta é linear e caracterizada pelo coeficiente obtido em a).
- 9 • Descrever a estrutura de banda de uma junção metal-semicondutor se o semicondutor é do tipo P.
- 10 Resolver o problema eletrostático da junção metal-semicondutor, quando a densidade de carga linear que ser forma devido ao contato é dada por:

$$\rho = \begin{cases} -C\delta(x) & x \leq 0 \\ en_dA & 0 < x < d \end{cases} ,$$

supondo que o metal é a região definida por $x \leq 0$ e o semicondutor tipo N está colocado na região $x > 0$, A é a área da superfície de contato, n_d é a densidade volumétrica de impurezas doadoras no semicondutor e d o tamanho da camada de depleção. Determinar a constante C para neutralidade de cargas, bem como a distribuição de potencial, o campo elétrico e a largura da camada de depleção se adicional ao campo interno há uma diferença de potencial aplicada entre o metal e o semicondutor.

- 11 Faça uma listagem de diodos comerciais do tipo: 1) Varicap, 2) Zener, 3) Túnel, 4) PIN.
- 12 Descreva fisicamente a operação do diodo túnel.
- 14 Faça o diagrama de níveis de energias de um transistor bipolar PNP. Descreva fisicamente o seu funcionamento.
- 15 Descreva os princípios físicos do funcionamento de um transistor JFET e um MOSFET. Como é a expressão para a densidade de corrente de deriva em um JFET? Utilize diagramas de bandas de energia na explicação do princípio de operação.
- 16 Faça um esquemático da estrutura física de um MOSFET de canal p, bem como do diagrama de energias.
- 17 Tunelamento Quântico: Esse problema é bastante interessante, porque mostra o caráter ondulatório das partículas, que podem penetrar regiões classicamente proibidas e sendo assim podem ser transmitidas de um lado a outro de uma barreira. Considere um elétron descrito por uma onda incidente em uma barreira de potencial pela esquerda, na forma:

$$\psi_{inc}(x) = \psi_0 e^{ikx - \omega t} , x < 0 ,$$

onde $\omega = E/\hbar$ e E é a energia do elétron incidente. veja Figura 1.

O Hamiltoniano do sistema é dado por:

$$\begin{aligned} H_L &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} & x < 0 \\ H_R &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} & x > d \\ H_B &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + eV_0 & 0 \leq x \leq d \end{aligned}$$

onde V_0 é a altura de uma barreira de potencial situada na região $0 \leq x \leq d$. A equação de Schroedinger é da forma $H\psi_i = E\psi_i$, onde $i = L, R$ ou B.

A onda refletida pode ser escrita como:

$$\psi_{refl}(x) = r\psi_0 e^{-ikx - \omega t}, x < 0$$

onde r é a amplitude de reflexão, enquanto que a onda transmitida através da barreira é dada por:

$$\psi_{transm}(x) = \tau\psi_0 e^{ikx - \omega t}, x > d,$$

onde τ é a amplitude de transmissão. Observe que $\psi_L = \psi_{inc} + \psi_{refl}$ e $\psi_R = \psi_{transm}$.

No interior da barreira, se a energia da partícula $E < eV_0$ então a solução para H_B é da forma:

$$\psi_B = Ae^{-\alpha x} + Be^{\alpha x}.$$

a) Determine as constantes k e α .

b) Determine as amplitudes de reflexão e transmissão r e τ , fazendo com que as funções de onda e suas derivadas sejam contínuas em $x = 0$ e $x = d$. Você irá obter 4 equações para 4 incógnitas A, B, r, τ .

c) Determine o coeficiente de transmissão $T = |\tau|^2$ e mostre que $R + T = 1$, onde $R = |r|^2$. O que isso significa?

d) Esboce graficamente o comportamento de T em função da energia da partícula.

18 Considere um diodo $p^+ - n - p^+$ simétrico de Si. a) Escreva uma expressão para o α do transistor similar àquela obtida em aula para o transistor n-p-n. Sejam então as características da base $d = 2\mu\text{m}$, $N_D = 5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ e $\tau_p = 0.5\mu\text{s}$. Sabendo que o emissor e o coletor tem $N_A = 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ e $\tau_n = 0.1\mu\text{s}$ calcule o ganho desse transistor.

19 Determine o valor da tensão de pinch-off V_P de um JFET de silício com meia-largura do canal $a = 0.8\mu\text{m}$, dopagem o semiconductor do canal $N_D = 2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, e regiões p^+ do gate dopados com $N_A = 10^{18}\text{cm}^{-3}$. Determine ainda a corrente de saturação reversa entre o gate e a fonte, já que no modo de operação a junção pn é polarizada reversamente. Estime o valor da resistência de entrada do JFET. Utilize $\tau_p = \tau_n = 0.5\mu\text{s}$ em sua análise.

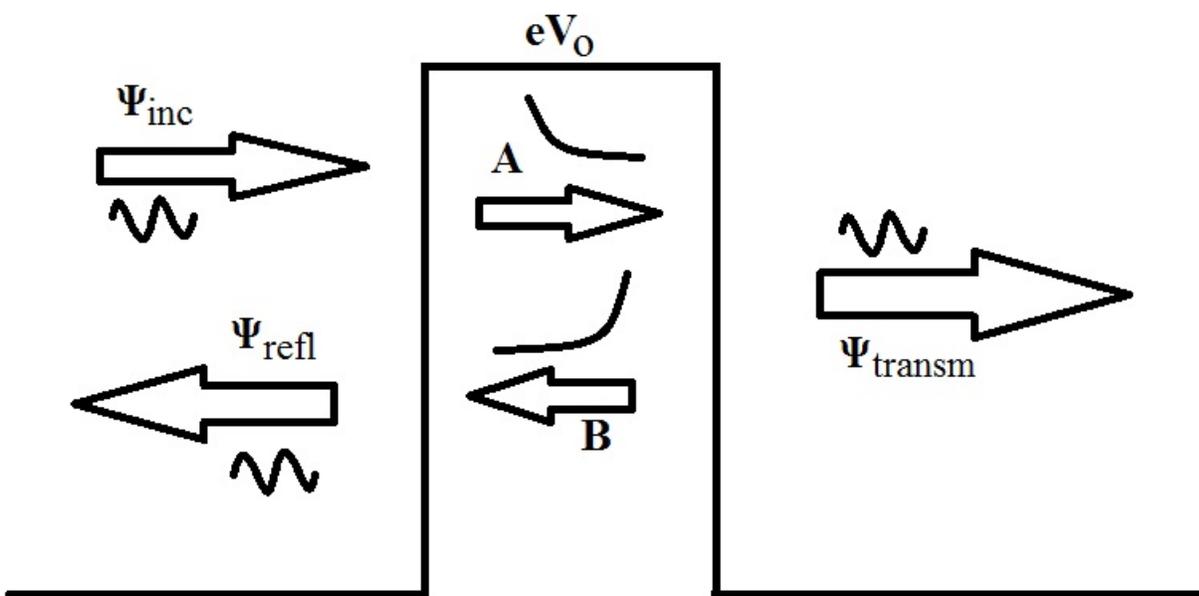


Figura 1