

5ª LISTA DE EXERCÍCIOS

**Disciplina:** TE069 - Física de Semicondutores

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

---

- 1 Deduza a relação de Einstein para o coeficiente de difusão  $D$  expresso em termos da mobilidade  $\mu$  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  $\Phi$  e  $\mathbf{E}$ ;
  - b) Determine a densidade de cargas  $\rho$ , 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/cm<sup>3</sup> e  $N_d = 3 \times 10^{16}$  átomos/cm<sup>3</sup>. 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/cm<sup>3</sup>,  $N_D = 10^{16}$  átomos/cm<sup>3</sup>, 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.

---

<sup>1</sup>cadartora@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  $80^\circ\text{C}$ ? 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  $z > 0$ ,  $A$  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 Schrodinger 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  $\tau$  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  $\alpha$ .

b) Determine as amplitudes de reflexão e transmissão  $r$  e  $\tau$ , 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  $A, B, r, \tau$ .

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  $\alpha$  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.

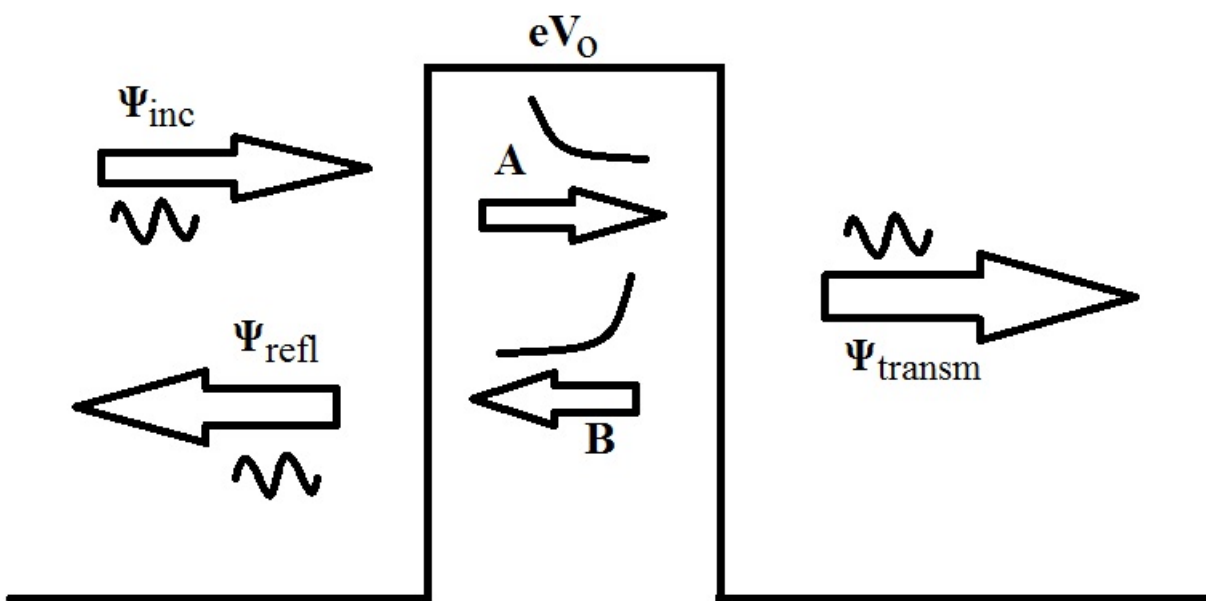


Figura 1