4. R.E. Hummel, *Electronic Properties of Materials*, Springer-Verlag, Berlin, 2011.
5. K. Kano, *Semiconductor Devices*, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
6. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, J. Wiley, New York, 2004.
7. D. Neamen, *Fundamentals of Semiconductor Physics and Devices*, McGraw-Hill, New York, 2002.
8. D.J. Roulston, *An Introducion to the Physics of Semiconductor Devices*, Oxford University Press, Oxford, 1999.
9. B.J. Streetman e S. Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, Prentice Hall, New Jersey, 2005.
10. J.W. Swart, *Semicondutores: Fundamentos, técnicas e aplicações*, Editora Unicamp, Campinas, 2008.
11. S.M. Sze, *Modern Semiconductor Devices Physics*, J. Wiley, New York, 1997.
12. F.F.Y. Wang, *Introduction to Solid State Electronics*, North-Holland, Amsterdam, 1989.
13. J.A. Zuffo, *Dispositivos Eletrônicos*, McGraw-Hill, São Paulo, 1976.

PROBLEMAS

1. Utilize um desenvolvimento análogo ao da seção 4.3 para demonstrar que a massa efetiva dos buracos é dada pela expressão (5.7).

2. Mostre que num semicondutor intrínseco, com bandas parabólicas, o nível de Fermi é dado pela Eq.(5.22).

3. a) Mostre que as concentrações efetivas de elétrons e de buracos, N_c e N_v, podem ser calculadas numericamente com a expressão

$$N_{c,v}(T) = 2{,}54 \left(\frac{m^*_{c,v}}{m_0} \frac{T}{300} \right)^{3/2} \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \quad ,$$

   onde T é a temperatura em K. Aplique esta expressão para Si e Ge e compare com os valores da Tabela 5.2; b) Calcule os valores de n_i em $T = 300$ K para Ge, Si e GaAs a partir dos dados da Tabela 5.2 e compare com os valores da Tabela e da Figura 5.8.

4. Calcule a distância entre o nível de Fermi E_F e o meio do gap em Si e em GaAs puros a $T = 300$ K. Explique porque E_F não está no meio do gap.

5. Usando os dados da Tabela 5.2, calcule a energia de ionização de impurezas doadoras em Si no modelo do átomo de hidrogênio desenvolvido na seção 5.3.1.

6. Considere um semicondutor tipo p com N_a impurezas aceitadoras, todas ionizadas, a uma temperatura tal que $n_i \ll N_a$: a) Partindo da lei de ação das massas (5.30) e da equação de neutralidade de cargas (5.33), obtenha as expressões para as concentrações de elétrons e buracos (5.41) e (5.42); b) Utilizando os resultados do item a) e as Eqs.(5.28) e (5.32), mostre que o nível de Fermi é dado por (5.43) ou (5.44); c) Mostre que E_i dado por (5.22) é compatível com as expressões obtidas no item c).

7. Três pastilhas de silício são dopadas com impurezas de As com concentrações 10^{16}, 10^{17} e 5×10^{18} átomos/cm^3 respectivamente. Considere $T = 300$ K e suponha que todas impurezas sejam ionizadas: a) Calcule o nível de Fermi em cada pastilha; b) Verifique se a aproximação da Eq.(5.15) para a função de Fermi-Dirac é boa nos três casos; c) Calcule a resistividade de cada pastilha.

8. A probabilidade dos elétrons ocuparem os níveis de energia discretos das impurezas não é dada simplesmente pela estatística de Fermi-Dirac. Pode-se mostrar que a concentração de impurezas doadoras ionizadas é dada por (ver Ashcroft e Mermin)

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + \frac{1}{2}\, e^{(E_d - E_f)/k_B T}} \quad ,$$

onde E_d é o nível de energia da impureza. a) Verifique se a suposição de completa ionização é boa nas três pastilhas do Problema 5.7; b) Faça um gráfico de N_d^+/N_d em função de T para a pastilha do Problema 5.7 com a maior concentração, supondo que E_g não varia em $T(0 - 400\,\text{K})$.

9. Uma pastilha de GaAs é dopada com impurezas doadoras com concentração 10^{17} átomos/cm^3. Supondo que todas as impurezas estejam ionizadas, calcule a resistividade da pastilha e compare com o valor obtido no problema 5.7 para o Si com a mesma concentração.

10. Calcule as concentrações de impurezas doadoras que tornam Si e GaAs degenerados ($E_F = E_c$).

11. Uma pastilha de silício tem impurezas aceitadoras com concentração $N_a = 2 \times 10^{14}$ cm^{-3}. Suponha que todas estão ionizadas. a) Calcule as concentrações de elétrons e de buracos em $T = 300$ K. Nesta situação, o semicondutor é considerado intrínseco ou extrínseco? b) Calcule as concentrações de elétrons e buracos em $T = 600$ K, sabendo que nesta temperatura o gap diminui para 1,0 eV. Nesta situação o semicondutor é intrínseco ou extrínseco?

12. a) Explique, qualitativamente, usando poucas palavras e alguns gráficos, porque o nível de Fermi no semicondutor tipo n está mais próximo da banda de condução do que da de valência, e no tipo p está mais próximo da banda de valência; b) Explique, qualitativamente, usando poucas palavras e alguns gráficos, como o nível de Fermi varia com a temperatura num semicondutor tipo n.

13. Um termistor é um resistor cuja resistência varia com a temperatura. Considere um termistor feito de silício intrínseco, cuja resistência é 500 Ω em $T = 300\,\text{K}$: a) Supondo que a mobilidade não varia com a temperatura, calcule a taxa de variação da resistência com a temperatura em torno de 300 K, expressa em Ω/°C; b) Qual é, aproximadamente, a resistência do termistor em $T = 320\,\text{K}$?

14. Uma barra de germânio tem comprimento 1 cm e seção reta quadrada de lado 1 mm. (a) Calcule a resistência entre as duas extremidades da barra a $T = 300\,\text{K}$ no caso do semicondutor intrínseco; b) Considere que a barra foi dopada com uma certa concentração de impurezas doadoras N_d. Supondo que a mobilidade é a mesma do material puro, qual deve ser o valor de N_d para que a resistência seja 10 Ω a $T = 300\,\text{K}$?

15. Uma barra de semicondutor com concentração de portadores majoritários $10^{16}\,\text{cm}^{-3}$ tem largura $d = 1$ mm e espessura 0,5 mm. Qual a tensão Hall na barra quando submetida a um campo magnético $B = 0{,}1$ weber/m^2 (1 kG) e percorrida por uma corrente 100 mA?

16. Uma barra semi-infinita feita de material semicondutor tem uma distribuição estacionária de buracos mostrada na Figura 5.22. Esta distribuição é mantida por uma certa corrente I constante, entrando na extremidade da barra em $x = 0$ através de um contato metálico. a) Utilizando a expressão (5.57) para a corrente de difusão, calcule a corrente $I = I_p(x = 0)$ em função de L_p, D_p e da concentração em excesso δp em $x = 0$; b) Mostre que esta corrente é igual a carga total existente em $x > 0$, obtida pela integração da distribuição de buracos $\delta p(x)$, dividida pela vida média τ_p dos buracos. Explique porque este cálculo leva ao mesmo resultado que o do item a).

17. Considere a função gaussiana para a concentração de elétrons em excesso do equilíbrio num semicondutor na forma de uma barra como a da Figura 5.20, numa seção de abcissa x no instante t,

$$\delta n(x,t) = \frac{\Delta N_0}{2\sqrt{\pi D_n t}}\, \mathrm{e}^{-x^2/4D_n t}$$

onde ΔN_0 é o número de elétrons por unidade de área no instante $t = 0$ na região entre duas seções espaçadas de Δx em torno de $x = 0$, sendo Δx muito pequeno. a) Mostre que esta função gaussiana é solução da equação de difusão para elétrons, Eq.(5.65); b) Mostre que em $t \to 0$ esta distribuição tende para $A\delta(x)$, sendo A uma constante e $\delta(x)$ a função delta de Dirac, que é nula para $x \neq 0$, diverge em $x = 0$ e tem área igual a unidade. Calcule o valor de A; c) Faça um gráfico qualitativo de $\delta n(x)$ para um instante genérico t_1. Neste instante, calcule a largura δx da distribuição, definida como a distância entre dois pontos nos quais o valor de δn é $\delta n(x = 0)/2$. Obtenha a relação entre o coeficiente de difusão D_n, a largura δx e o instante t_1. A partir deste resultado sugira um método para medir o coeficiente de difusão em semicondutores.