

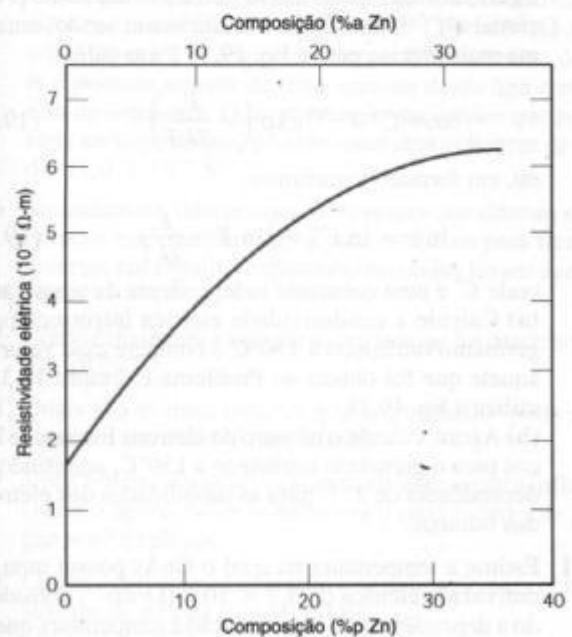
## PERGUNTAS E PROBLEMAS

- 19.1** (a) Calcule a condutividade elétrica de uma amostra cilíndrica de silício com diâmetro de 5,1 mm (0,2 pol.) e 51 mm de comprimento (2 pol.), através da qual uma corrente de 0,1 A passa em uma direção axial. Uma voltagem de 12,5 V é medida entre duas sondas que estão separadas por uma distância de 38 mm (1,5 pol.).  
(b) Calcule a resistência ao longo de toda a extensão de 51 mm (2 pol.) da amostra.
- 19.2** Um fio de cobre com 100 m de comprimento deve experimentar uma queda de voltagem de menos de 1,5 V quando uma corrente de 2,5 A passa através dele. Usando os dados na Tabela 19.1, calcule o diâmetro mínimo que esse fio deve possuir.
- 19.3** Um fio de alumínio com 4 mm de diâmetro deve oferecer uma resistência que não seja superior a 2,5  $\Omega$ . Usando os dados na Tabela 19.1, calcule o comprimento máximo do fio.
- 19.4** Demonstre que as duas expressões para a lei de Ohm, Eq. 19.1 e 19.5, são equivalentes.
- 19.5** (a) Usando os dados na Tabela 19.1, calcule a resistência de um fio de cobre com 3 mm (0,12 pol.) de diâmetro e 2 m (78,7 pol.) de comprimento. (b) Qual seria o fluxo de corrente se a queda de potencial entre as extremidades do fio fossem de 0,05 V? (c) Qual é a densidade da corrente? (d) Qual é a magnitude do campo elétrico através das extremidades do fio?
- 19.6** Qual é a distinção entre condução eletrônica e condução iônica?
- 19.7** Como a estrutura eletrônica de um átomo isolado difere daquela exibida por um material sólido?
- 19.8** Em termos da estrutura da banda de energia eletrônica, discuta as razões para a diferença na condutividade elétrica entre os metais, os semicondutores e os isolantes.
- 19.9** Se um material metálico for resfriado através da sua temperatura de fusão a uma taxa extremamente rápida, ele irá formar um sólido não-cristalino (isto é, um vidro metálico). A condutividade elétrica do metal não-cristalino será maior ou menor do que a do seu análogo cristalino? Por quê?
- 19.10** Explique sucintamente o que se deseja dizer por velocidade de arraste e mobilidade de um elétron livre.
- 19.11** (a) Calcule a velocidade de arraste dos elétrons no germânio à temperatura ambiente e quando a magnitude do campo elétrico é de 1000 V/m. (b) Sob essas circunstâncias, quanto tempo um elétron leva para se deslocar transversalmente através de uma distância de 25 mm (1 pol.) de cristal?
- 19.12** Sabe-se que um semicondutor do tipo *n* possui uma concentração eletrônica de  $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ . Se a velocidade de arraste do elétron é de 100 m/s em um campo elétrico de 500 V/m, calcule a condutividade desse material.
- 19.13** À temperatura ambiente, a condutividade elétrica e a mobilidade eletrônica para o cobre são de  $6,0 \times 10^7 (\Omega\text{-m})^{-1}$  e  $0,0030 \text{ m}^2/\text{V-s}$ , respectivamente. (a) Calcule o número de elétrons livres por metro cúbico para o cobre à temperatura ambiente. (b) Qual é o número de elétrons

livres por átomo de cobre? Considere uma densidade de  $8,9 \text{ g/cm}^3$  para o cobre.

- 19.14** (a) Calcule o número de elétrons livres por metro cúbico de ouro admitindo que existem 1,5 elétrons livres por átomo de ouro. A condutividade elétrica e a densidade para o Au são de  $4,3 \times 10^7 (\Omega\text{-m})^{-1}$  e  $19,32 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. (b) Agora, calcule a mobilidade eletrônica para o Au.
- 19.15** A partir da Fig. 19.35, estime o valor de *A* na Eq. 19.11 para o zinco como uma impureza em ligas cobre-zinco.
- 19.16** (a) Usando os dados na Fig. 19.8, determine os valores de  $\rho_0$  e *a* da Eq. 19.10 para o cobre puro. Admita que a temperatura *T* esteja em graus Celsius. (b) Determine o valor de *A* na Eq. 19.11 para o níquel como uma impureza no cobre usando os dados na Fig. 19.8. (c) Usando os resultados para as partes a e b, estime a resistividade elétrica para o cobre com 1,75%a Ni a  $100^\circ\text{C}$ .
- 19.17** Determine a condutividade elétrica de uma liga Cu-Ni que possui um limite de elasticidade de 125 MPa (18.000 psi). O uso da Fig. 7.16*b* será útil.
- 19.18** O bronze ao estanho possui uma composição de 92%p Cu e 8%p Sn e, à temperatura ambiente, consiste em duas fases: uma fase  $\alpha$ , composta por cobre com uma quantidade muito pequena de estanho em uma solução sólida, e uma fase  $\epsilon$ , que contém aproximadamente 37%p Sn. Calcule a condutividade à temperatura ambiente para essa liga, de acordo com os seguintes dados:

Fase	Resistividade Elétrica ( $\Omega\text{-m}$ )	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )
$\alpha$	$1,88 \times 10^{-8}$	8,94
$\epsilon$	$5,32 \times 10^{-7}$	8,25



**Fig. 19.35** Resistividade elétrica à temperatura ambiente em função da composição para ligas cobre-zinco. (Adaptado de *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th edition, H. Baker, Editor-Chefe, American Society for Metals, 1979, p. 315.)

**19.19** As resistividades elétricas à temperatura ambiente para o chumbo puro e o estanho puro são de  $2,06 \times 10^{-7}$  e  $1,11 \times 10^{-7} \Omega\cdot\text{m}$ , respectivamente.

(a) Faça um gráfico esquemático da resistividade elétrica à temperatura ambiente em função da composição para todas as composições entre o chumbo puro e o estanho puro.

(b) No mesmo gráfico, plote esquematicamente a resistividade elétrica em função da composição para uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ .

(c) Explique as formas dessas duas curvas, bem como quaisquer diferenças entre elas.

**19.20** Um fio metálico cilíndrico com 2 mm (0,08 pol.) de diâmetro é exigido para conduzir uma corrente de 10 A com uma queda mínima de voltagem de 0,03 V por pé (300 mm) de fio. Quais dos metais e ligas listados na Tabela 19.1 são possíveis candidatos?

**19.21** (a) Calcule o número de elétrons livres e buracos que existem no germânio intrínseco à temperatura ambiente, usando os dados na Tabela 19.2. (b) Calcule agora o número de elétrons livres por átomo para o germânio e o silício (Problema-Exemplo 19.1). (c) Explique a diferença. Você irá precisar das densidades para o Ge e o Si, que são  $5,32$  e  $2,33 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente.

**19.22** Para semicondutores intrínsecos, as concentrações de elétrons e de buracos dependem da temperatura, de acordo com a seguinte relação:

$$n, p \propto \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (19.38)$$

ou, tirando os logaritmos naturais,

$$\ln n, \ln p \propto -\frac{E_g}{2kT}$$

Dessa forma, um gráfico de  $\ln n$  (ou  $\ln p$ ) intrínseco em função de  $1/T$  ( $\text{K}^{-1}$ ) deve ser linear e produzir uma inclinação de  $-E_g/2k$ . Usando essa informação e a Fig. 19.16, determine a energia do espaçamento entre bandas para o silício. Compare esse valor com aquele dado na Tabela 19.2.

**19.23** Defina os seguintes termos na medida em que eles se relacionam aos materiais semicondutores: intrínseco, extrínseco, composto, elementar. Agora, forneça um exemplo de cada.

**19.24** É possível que semicondutores compostos exibam um comportamento intrínseco? Explique a sua resposta.

**19.25** Para cada um dos seguintes pares de semicondutores, decida qual irá possuir a menor energia de espaçamento entre bandas,  $E_g$ , e então cite a razão para a sua escolha: (a) ZnS e CdSe, (b) Si e C (diamante), (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e ZnTe, (d) InSb e ZnSe, e (e) GaAs e AlP.

**19.26** (a) Com suas próprias palavras, explique como as impurezas doadoras nos semicondutores dão origem a elétrons livres em números superiores àqueles que são gerados pelas excitações banda de valência-banda de condução. (b) Explique também como as impurezas receptoras dão origem a buracos em números superiores aos que são gerados pelas excitações banda de valência-banda de condução.

**19.27** (a) Explique por que nenhum buraco é gerado pela excitação eletrônica envolvendo um átomo de impureza doador. (b) Explique por que nenhum elétron livre é gerado pela excitação eletrônica envolvendo um átomo de impureza receptor.

**19.28** Como cada um dos seguintes elementos irá atuar, como um doador ou um receptor, quando adicionado ao material semicondutor indicado? Considere que os elementos de impureza sejam substitucionais.

Impureza	Semicondutor
N	Si
B	Ge
Zn	GaAs
S	InSb
In	CdS
As	ZnTe

**19.29** (a) Qual é a posição aproximada da energia de Fermi para um semicondutor intrínseco?

(b) Qual é a posição aproximada da energia de Fermi para um semicondutor do tipo  $n$ ?

(c) Faça um gráfico esquemático da energia de Fermi em função da temperatura para um semicondutor do tipo  $n$  até uma temperatura na qual ele se torna intrínseco. Anote também nesse gráfico as posições das energias correspondentes à parte superior da banda de valência e à parte inferior da banda de condução.

**19.30** (a) A condutividade elétrica à temperatura ambiente de uma amostra de silício é de  $10^3 (\Omega\cdot\text{m})^{-1}$ . Sabe-se que a condutividade intrínseca é de  $1,0 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ . Usando as mobilidades para os elétrons e para os buracos no silício, as quais foram apresentadas na Tabela 19.2, calcule a concentração de buracos. (b) Com base no resultado obtido para a parte a, dizer se essa amostra é intrínseca, extrínseca do tipo  $n$  ou extrínseca do tipo  $p$ . Por quê?

**19.31** Usando os dados fornecidos na Tabela 19.2, calcule as concentrações de elétrons e de buracos para o InSb intrínseco à temperatura ambiente.

**19.32** O germânio ao qual foram adicionados  $5 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  átomos de Sb é um semicondutor extrínseco à temperatura ambiente, e virtualmente todos os átomos de Sb podem ser considerados como estando ionizados (isto é, existe um portador de carga para cada átomo de Sb). (a) Esse material é do tipo  $n$  ou do tipo  $p$ ? (b) Calcule a condutividade elétrica desse material, considerando para os elétrons e para os buracos mobilidades de  $0,1$  e  $0,05 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , respectivamente.

**19.33** As seguintes características elétricas foram determinadas para os fosfetos de índio (InP) intrínseco e extrínseco do tipo  $p$  à temperatura ambiente:

	$\sigma (\Omega\cdot\text{m})^{-1}$	$n (\text{m}^{-3})$	$p (\text{m}^{-3})$
Intrínseco	$2,5 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{13}$	$3,0 \times 10^{13}$
Extrínseco (tipo $n$ )	$3,6 \times 10^{-5}$	$4,5 \times 10^{14}$	$2,0 \times 10^{12}$

Calcule as mobilidades dos elétrons e dos buracos.

- 19.34** Compare a dependência em relação à temperatura para a condutividade nos metais e nos semicondutores intrínsecos. Explique sucintamente a diferença de comportamento.
- 19.35** Usando os dados fornecidos na Tabela 19.2, estime a condutividade elétrica do GaAs intrínseco a 150°C (423 K).
- 19.36** Explique sucintamente a presença do fator 2 no denominador do segundo termo no lado direito da Eq. 19.19.
- 19.37** Usando os dados fornecidos na Tabela 19.2, estime a temperatura na qual a condutividade elétrica do GaAs intrínseco é de  $4 \times 10^{-4} (\Omega\text{-m})^{-1}$ .
- 19.38** As condutividades elétricas intrínsecas de um semicondutor a 20 e a 100°C (293 e 373 K) são de 1,0 e 500  $(\Omega\text{-m})^{-1}$ , respectivamente. Determine a energia aproximada para o espaçamento entre bandas para esse material.
- 19.39** Abaixo estão tabuladas as condutividades elétricas intrínsecas de um semicondutor a duas temperaturas diferentes:

$T$ (K)	$\sigma$ ( $\Omega\text{-m}$ ) <sup>-1</sup>
450	0,12
550	2,25

(a) Determine a energia do espaçamento entre bandas (em eV) para esse material.

(b) Estime a condutividade elétrica a 300 K (27°C).

- 19.40** À temperatura ambiente, a dependência das mobilidades dos elétrons e dos buracos em relação à temperatura para o germânio intrínseco é determinada como sendo proporcional a  $T^{-3/2}$ , para  $T$  em Kelvin; assim sendo, uma forma mais precisa para a Eq. 19.18 é a seguinte:

$$\sigma = C'' T^{-3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (19.39a)$$

ou, em formato logarítmico,

$$\ln \sigma = \ln C'' - \frac{3}{2} \ln T - \frac{E_g}{2kT} \quad (19.39b)$$

onde  $C''$  é uma constante independente da temperatura.

(a) Calcule a condutividade elétrica intrínseca para o germânio intrínseco a 150°C e compare esse valor com aquele que foi obtido no Problema-Exemplo 19.3, que utiliza a Eq. 19.18.

(b) Agora, calcule o número de elétrons livres e de buracos para o germânio intrínseco a 150°C, admitindo essa dependência de  $T^{-3/2}$  para as mobilidades dos elétrons e dos buracos.

- 19.41** Estime a temperatura na qual o GaAs possui uma condutividade elétrica de  $3,7 \times 10^{-3} (\Omega\text{-m})^{-1}$ , considerando a dependência de  $\sigma$  em relação à temperatura que está apresentada na Eq. 19.39a. Os dados mostrados na Tabela 19.2 podem se mostrar úteis.
- 19.42** A inclinação das partes extrínsecas das curvas na Fig. 19.16 está relacionada à posição do nível receptor no

espaçamento entre bandas (Fig. 19.14). Escreva uma expressão para a dependência de  $\rho$  em relação à posição deste nível.

- 19.43** Observamos na Seção 13.5 (Fig. 13.21) que no FeO (wustita) os íons ferro podem existir tanto no estado  $\text{Fe}^{2+}$  como no estado  $\text{Fe}^{3+}$ . A quantidade de cada um desses tipos de íon depende da temperatura e da pressão ambiente do oxigênio. Além disso, também foi observado que, para manter a eletroneutralidade, uma lacuna de  $\text{Fe}^{2+}$  será criada para cada dois íons  $\text{Fe}^{3+}$  que forem formados; conseqüentemente, para refletir a existência dessas lacunas a fórmula da wustita é representada com freqüência como  $\text{Fe}_{(1-x)}\text{O}$ , onde  $x$  representa alguma pequena fração menor do que a unidade.

Nesse material  $\text{Fe}_{(1-x)}\text{O}$  não-estequiométrico, a condução é eletrônica e, de fato, ele se comporta como um semicondutor do tipo  $p$ . Isto é, os íons  $\text{Fe}^{3+}$  atuam como receptores eletrônicos, sendo relativamente fácil excitar um elétron da banda de valência para um estado receptor  $\text{Fe}^{3+}$ , com a conseqüente formação de um buraco. Determine a condução elétrica de uma amostra de wustita que possui uma mobilidade dos buracos de  $1,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , e para a qual o valor de  $x$  é de 0,060. Considere que os estados receptores estejam saturados (isto é, existe um buraco para cada íon  $\text{Fe}^{3+}$ ). A wustita possui a estrutura cristalina do cloreto de sódio, com um comprimento da aresta da célula unitária de 0,437 nm.

- 19.44** Um metal hipotético possui uma resistividade elétrica de  $4 \times 10^{-8} (\Omega\text{-m})$ . Uma corrente de 30 A é passada através de uma amostra desse metal com 25 mm de espessura; quando um campo magnético de 0,75 tesla é imposto simultaneamente em uma direção perpendicular à da corrente, uma voltagem de Hall de  $-1,26 \times 10^{-7} \text{ V}$  é medida. Calcule (a) a mobilidade dos elétrons nesse metal e (b) o número de elétrons livres por metro cúbico.
- 19.45** Uma liga metálica possui valores para a condutividade elétrica e a mobilidade eletrônica de  $1,5 \times 10^7 (\Omega\text{-m})^{-1}$  e  $0,0020 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , respectivamente. Uma corrente de 45 A é passada através de uma amostra dessa liga com 35 mm de espessura. Qual é o campo magnético que precisaria ser imposto para proporcionar uma voltagem de Hall de  $-1,0 \times 10^{-7} \text{ V}$ ?
- 19.46** Sucintamente, descreva os movimentos dos elétrons e dos buracos em uma junção  $p$ - $n$  para os fluxos para frente e reverso; em seguida, explique como esses levam à retificação.
- 19.47** Como é dissipada a energia na reação que foi descrita pela Eq. 19.24?
- 19.48** Quais são as duas funções que um transistor pode executar em um circuito eletrônico?
- 19.49** Você esperaria que um aumento na temperatura influenciasse a operação de transistores e retificadores de junção  $p$ - $n$ ? Explique.
- 19.50** Cite as diferenças na operação e na aplicação para os transistores de junção e os MOSFET.
- 19.51** A temperaturas entre 775°C (1048 K) e 1100°C (1373 K), a energia de ativação e a constante pré-exponencial para o coeficiente de difusão do  $\text{Fe}^{2+}$  no FeO são de 102.000 J/mol e  $7,3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectivamente.

Calcule a mobilidade para um íon  $\text{Fe}^{2+}$  a  $1000^\circ\text{C}$  ( $1273\text{ K}$ ).

- 19.52** Um capacitor de placas paralelas que utiliza um material dielétrico com uma  $\epsilon_r$  de 2,5 tem entre placas um espaçamento de 1 mm (0,04 pol.). Se for usado um outro material, porém com uma constante dielétrica de 4,0, e a capacitância não for alterada, qual deve ser o novo espaçamento entre placas?
- 19.53** Um capacitor de placas paralelas com dimensões de 100 mm por 25 mm e uma separação entre placas de 3 mm deve ter uma capacitância mínima de 38 pF ( $3,8 \times 10^{-11}\text{ F}$ ) quando um potencial CA de 500 V é aplicado a uma frequência de 1 MHz. Quais daqueles materiais listados na Tabela 19.4 são possíveis candidatos? Por quê?
- 19.54** Considere um capacitor de placas paralelas que possui uma área de  $2500\text{ mm}^2$  e uma separação entre placas de 2 mm, e que contém um material com constante dielétrica de 4,0 posicionado entre as placas. (a) Qual é a capacitância desse capacitor? (b) Calcule o campo elétrico que deve ser aplicado para que uma carga de  $8,0 \times 10^{-9}\text{ C}$  seja armazenada em cada placa.
- 19.55** Em suas próprias palavras, explique o mecanismo segundo o qual a capacidade de armazenamento de cargas é aumentada pela inserção de um material dielétrico entre as placas de um capacitor.
- 19.56** Para o NaCl, os raios iônicos para o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{Cl}^-$  são de 0,102 e 0,181 nm, respectivamente. Se um campo elétrico aplicado externamente produz uma expansão do retículo equivalente a 5%, calcule o momento dipolo para cada par  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ . Considere que esse material esteja completamente não polarizado na ausência de um campo elétrico.
- 19.57** A polarização  $P$  de um material dielétrico que está posicionado entre as placas de um capacitor de placas paralelas deve ser de  $1,0 \times 10^{-6}\text{ C/m}^2$ .  
(a) Qual deve ser a constante dielétrica se um campo elétrico de  $5 \times 10^4\text{ V/m}$  for aplicado?  
(b) Qual será o deslocamento dielétrico  $D$ ?
- 19.58** Uma carga de  $3,5 \times 10^{-11}\text{ C}$  deve ser armazenada em cada placa de um capacitor de placas paralelas que possui uma área de  $160\text{ mm}^2$  (0,25 pol.<sup>2</sup>) e uma separação entre placas de 3,5 mm (0,14 pol.).  
(a) Qual a voltagem necessária se um material com constante dielétrica de 5,0 for posicionado entre as placas?  
(b) Qual voltagem seria necessária se fosse utilizado o vácuo?  
(c) Quais são as capacitâncias para as partes a e b?  
(d) Calcule o deslocamento dielétrico para a parte a.  
(e) Calcule a polarização para a parte a.
- 19.59** (a) Para cada um dos três tipos de polarização, descreva sucintamente o mecanismo segundo o qual os dipolos são induzidos e/ou orientados pela ação de um campo elétrico que é aplicado. (b) Para o titanato de chumbo sólido ( $\text{PbTiO}_3$ ), o neônio gasoso, o diamante, o KCl sólido e o  $\text{NH}_3$  líquido, qual(is) tipo(s) de polarização é(são) possível(is)? Por quê?
- 19.60** A constante dielétrica para um vidro de cal de soda, medida a frequências muito altas (da ordem de  $10^{15}\text{ Hz}$ ),

é de aproximadamente 2,3. Qual fração da constante dielétrica a frequências relativamente baixas (1 MHz) é atribuída à polarização iônica? Despreze quaisquer contribuições da polarização de orientação.

- 19.61** (a) Calcule a magnitude do momento dipolo que está associado com cada célula unitária de  $\text{BaTiO}_3$ , como está ilustrado na Fig. 19.33.  
(b) Calcule a polarização máxima que é possível para esse material.
- 19.62** Explique sucintamente por que o comportamento ferroelétrico do  $\text{BaTiO}_3$  cessa acima da sua temperatura Curie ferroelétrica.
- 19.63** Você esperaria que as dimensões físicas dos materiais piezoelétricos tais como o  $\text{BaTiO}_3$  mudassem quando ele fosse submetido a um campo elétrico? Por que sim, ou por que não?

## Problemas de Projeto

- 19.P1** Uma liga contendo 95%p Pt e 5%p Ni possui uma resistividade elétrica de  $2,35 \times 10^{-7} \Omega\text{-m}$  à temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ). Calcule a composição da liga platina-níquel que à temperatura ambiente possui uma resistividade de  $1,75 \times 10^{-7} \Omega\text{-m}$ . A resistividade da platina pura à temperatura ambiente pode ser determinada a partir dos dados apresentados na Tabela 19.1; considere que a platina e o níquel formam uma solução sólida.
- 19.P2** Usando as informações contidas nas Figs. 19.8 e 19.35, determine a condutividade elétrica de uma liga que contém 80%p Cu e 20%p Zn a  $-150^\circ\text{C}$  ( $-240^\circ\text{F}$ ).
- 19.P3** É possível formar uma liga de cobre e níquel que possua um limite de resistência à tração mínimo de 375 MPa (54.400 psi) e ainda assim manter uma condutividade elétrica de  $2,5 \times 10^6 (\Omega\text{-m})^{-1}$ ? Caso isto não seja possível, dizer por quê. Caso isto seja possível, qual é a concentração de níquel exigida? Você pode consultar a Fig. 7.16a.
- 19.P4** Especifique um tipo de impureza receptora e a sua concentração (em porcentagem em peso) que irá produzir um material à base de silício do tipo *p* com uma condutividade elétrica à temperatura ambiente de  $50 (\Omega\text{-m})^{-1}$ . Utilize as mobilidades intrínsecas dos elétrons e dos buracos e admita que as impurezas receptoras estejam saturadas.
- 19.P5** Um projeto de circuito integrado pede a difusão de átomos de boro para o interior de silício com pureza muito alta, a uma temperatura elevada. É necessário que a uma distância de  $0,2 \mu\text{m}$  da superfície da pastilha de silício a condutividade elétrica à temperatura ambiente seja de  $1,2 \times 10^4 (\Omega\text{-m})^{-1}$ . A concentração de B na superfície do silício é mantida a um nível constante de  $1,0 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$ ; além disso, considera-se que a concentração de B no silício original seja desprezível e que à temperatura ambiente os átomos de boro estejam saturados. Especifique a temperatura na qual esse tratamento térmico por difusão deve ocorrer, se o tempo de tratamento é para ser de uma hora. O coeficiente de difusão para a difusão do B no silício é uma função da temperatura, de acordo com a seguinte relação:

$$D(\text{m}^2/\text{s}) = 2,4 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{347 \text{ kJ/mol}}{RT}\right)$$

- 19.P6** No Problema 19.43 foi observado que o FeO (wustita) pode se comportar como um material semiconductor em virtude da transformação de íons  $\text{Fe}^{2+}$  em íons  $\text{Fe}^{3+}$ , com a criação de lacunas de  $\text{Fe}^{2+}$ ; a manutenção da eletroneutralidade exige que para cada dois íons  $\text{Fe}^{3+}$  uma lacuna seja formada. A existência dessas lacunas está refletida na fórmula química dessa wustita não-estequiométrica, na forma de  $\text{Fe}_{(1-x)}\text{O}$ , onde *x* representa um número pequeno que possui um valor que é menor do que a unidade. O grau de não-estequiometria (isto é, o valor de *x*) pode ser variado através de mudanças na temperatura e na pressão parcial do oxigênio. Calcule o valor de *x* que é exigido para produzir um material  $\text{Fe}_{(1-x)}\text{O}$  que possua uma condutividade elétrica do tipo *p* de  $2000 (\Omega\text{-m})^{-1}$ ; considere que a mobilidade do buraco seja de  $1,0 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{V-s}$  e que os estados receptores estejam saturados.
- 19.P7** O material semiconductor básico utilizado em virtualmente todos os circuitos integrados modernos é o silício. Entretanto, o silício apresenta algumas limitações e restrições. Faça uma redação comparando as propriedades e as aplicações (e/ou aplicações potenciais) para o silício e o arseneto de gálio.