

emitir luz; este é o princípio de funcionamento do **diodo emissor de luz** (LED). O comprimento de onda da luz emitida é dado por

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_g} \quad (41-11)$$

Uma junção *p-n* polarizada diretamente e com faces opostas paralelas pode funcionar como um **laser semiconductor**, emitindo luz coerente e com uma faixa de comprimentos de onda bem mais estreita que um LED.

## PERGUNTAS

- 1 A probabilidade de ocupação para uma certa energia  $E_1$  da banda de valência de um metal é 0,60 quando a temperatura é 300 K. A energia  $E_1$  é maior ou menor que a energia de Fermi?
- 2 A Fig. 41-22 mostra três níveis de uma banda e também o nível de Fermi do material. Coloque os três níveis na ordem da probabilidade de ocupação, começando pela maior, para uma temperatura (a) de 0 K e (b) de 1000 K. (c) Para a segunda temperatura, coloque os níveis na ordem da densidade de estados  $N(E)$ , começando pela maior.

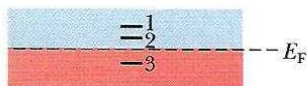


FIG. 41-22 Pergunta 2.

- 3 Se a temperatura de um pedaço de metal aumenta, a probabilidade de ocupação 0,1 eV acima do nível de Fermi aumenta, diminui ou permanece a mesma?
- 4 A Fig. 41-1a mostra os 14 átomos que formam a célula unitária do cobre. Entretanto, como cada átomo é compartilhado por uma ou mais células unitárias vizinhas apenas uma fração de cada átomo pertence à célula unitária da figura. Qual é o número de átomos por célula unitária no caso do cobre? (*Sugestão:* Some as frações de átomo que pertencem à mesma célula unitária.)
- 5 A Fig. 41-1b mostra os 18 átomos que formam a célula unitária do silício. Quatorze desses átomos, porém, são compartilhados por uma ou mais células unitárias vizinhas. Qual é o número de átomos por célula unitária no caso do silício? (*Sugestão:* Veja a Pergunta 4.)
- 6 Na rede cristalina do silício, onde pode ser encontrado (a) um elétron de condução; (b) um elétron de valência; (c) um elétron

pertencente à subcamada  $2p$  de um átomo de silício?

- 7 A velocidade de deriva  $v_d$  dos elétrons de condução em um fio de cobre percorrido por corrente é aproximadamente igual, muito maior ou muito menor que a velocidade de Fermi  $v_F$ ?
- 8 Um átomo de germânio possui 32 elétrons, dispostos em subcamadas da seguinte forma:

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2.$$

O germânio possui a mesma estrutura cristalina que o silício e, como o silício, é um semiconductor. Quais desses elétrons formam a banda da valência de um cristal de germânio?

- 9 A distância entre níveis de energia vizinhos na última banda ocupada de um metal depende (a) do material de que é feita a amostra; (b) do tamanho da amostra; (c) da posição do nível dentro da banda; (d) da temperatura da amostra; (e) da energia de Fermi do metal?
- 10 Nas junções polarizadas da Fig. 41-15 existe um campo elétrico  $\vec{E}$  nas zonas de depleção, associado à diferença de potencial entre as extremidades da zona. (a) O sentido de  $\vec{E}$  é da esquerda para a direita ou da direita para a esquerda? (b) O módulo de  $\vec{E}$  é maior quando a junção está polarizada diretamente ou quando está polarizada inversamente?
- 11 A largura  $E_g$  da banda proibida nos semicondutores silício e germânio é, respectivamente, 1,12 e 0,67 eV. Quais das seguintes afirmações são verdadeiras? (a) As duas substâncias têm a mesma concentração de portadores à temperatura ambiente. (b) À temperatura ambiente, a concentração de portadores no germânio é maior que no silício. (c) As duas substâncias têm uma concentração maior de elétrons que de buracos. (d) Nas duas substâncias, a concentração de elétrons é igual à de buracos.

## PROBLEMAS

• - ••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema



Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

### seção 41-5 Metais

- 1 Qual é a probabilidade de que um estado 0,0620 eV acima da energia de Fermi esteja ocupado para (a)  $T = 0$  K e (b)  $T = 320$  K?
- 2 Qual é a concentração de elétrons de condução no ouro, que é um metal monovalente? Use os valores de massa molar e massa específica do Apêndice F.
- 3 (a) Mostre que a Eq. 41-5 pode ser escrita na forma  $N(E) = CE^{1/2}$ . (b) Calcule o valor de  $C$  tomando como unidade de comprimento o metro e como unidade de energia o elétron-volt. (c) Calcule o valor de  $N(E)$  para  $E = 5,00$  eV.
- 4 Use a Eq. 41-9 para mostrar que a energia de Fermi no cobre é 7,0 eV.

- 5 O cobre, um metal monovalente, tem uma massa molar de 63,54 g/mol e uma massa específica de 8,96 g/cm<sup>3</sup>. Qual é a concentração  $n$  de elétrons de condução do cobre?
- 6 Um estado 63 meV acima do nível de Fermi tem uma probabilidade de ocupação de 0,090. Qual é a probabilidade de ocupação de um estado 63 meV *abaixo* do nível de Fermi?
- 7 Mostre que a Eq. 41-9 pode ser escrita na forma  $E_F = An^{2/3}$ , onde a constante  $A$  tem o valor de  $3,65 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{eV}$ .
- 8 Calcule a densidade de estados  $N(E)$  de um metal na energia  $E = 8,0$  eV e mostre que o resultado está de acordo com a curva da Fig. 41-6.
- 9 A energia de Fermi do cobre é 7,0 eV. Para o cobre a 1000

K, (a) determine a energia do nível cuja probabilidade de ser ocupado por um elétron é 0,900. Para essa energia, determine (b) a densidade de estados  $N(E)$  e (c) a densidade de estados ocupados  $N_o(E)$ .

••10 Suponha que o volume total de uma amostra metálica é a soma do volume ocupado pelos íons do metal que formam a rede cristalina com o volume ocupado pelos elétrons de condução. A massa específica e a massa molar do sódio (um metal) são  $971 \text{ kg/m}^3$  e  $23,0 \text{ g/mol}$ , respectivamente; o raio do íon  $\text{Na}^+$  é  $98 \text{ pm}$ . (a) Que porcentagem do volume de uma amostra de sódio é ocupada pelos elétrons de condução? (b) Repita o cálculo para o cobre, que possui uma massa específica, massa molar e raio iônico de  $8960 \text{ kg/m}^3$ ,  $63,5 \text{ g/mol}$  e  $135 \text{ pm}$ , respectivamente. (c) Em qual dos dois metais o comportamento dos elétrons de condução é mais parecido com o das moléculas de um gás?

••11 Na Eq. 41-6, faça  $E - E_F = \Delta E = 1,00 \text{ eV}$ . (a) Para que temperatura o resultado obtido usando essa equação difere de 1,0% do resultado obtido usando a equação clássica de Boltzmann  $P(E) = e^{-\Delta E/kT}$  (que é a Eq. 41-1 com duas mudanças de notação)? (b) Para qual temperatura os dois resultados diferem de 10%?

••12 Qual é a energia de Fermi do ouro, que é um metal monovalente com uma massa molar de  $197 \text{ g/mol}$  e uma massa específica de  $19,3 \text{ g/cm}^3$ ?

••13 A energia de Fermi da prata é  $5,5 \text{ eV}$ . Determine a probabilidade de que os seguintes níveis de energia estejam ocupados a  $0^\circ\text{C}$ : (a)  $4,4$ ; (b)  $5,4$ ; (c)  $5,5$ ; (d)  $5,6$ ; (e)  $6,4 \text{ eV}$ . (f) Para que temperatura a probabilidade de que o nível de  $5,6 \text{ eV}$  esteja ocupado é  $0,16$ ?

••14 Qual é a probabilidade de que um elétron atravessasse a barreira de energia  $E_g$  em um diamante cuja massa é igual à massa da Terra? Use o resultado do Exemplo 41-1 e a massa molar do carbono do Apêndice F; suponha que o diamante possui um elétron de valência por átomo de carbono.

••15 Calcule  $N_o(E)$ , a densidade de estados ocupados, para o cobre a  $1000 \text{ K}$ , nas energias de (a)  $4,00$ ; (b)  $6,75$ ; (c)  $7,00$ ; (d)  $7,25$ ; (e)  $9,00 \text{ eV}$ . Compare os resultados com a curva da Fig. 41-8b. A energia de Fermi do cobre é  $7,00 \text{ eV}$ .

••16 Mostre que a probabilidade  $P(E)$  de que um nível de energia  $E$  não esteja ocupado é

$$P(E) = \frac{1}{e^{-\Delta E/kT} + 1},$$

onde  $\Delta E = E - E_F$ .

••17 A prata é um metal monovalente. Calcule, para esse elemento, (a) a concentração de elétrons de condução; (b) a energia de Fermi; (c) a velocidade de Fermi; (d) o comprimento de onda de Broglie correspondente à velocidade determinada no item (c). Os dados necessários estão no Apêndice F.

••18 A uma temperatura de  $300 \text{ K}$ , a que distância da energia de Fermi está um estado cuja probabilidade de ocupação por um elétron é  $0,10$ ?

••19 A energia de Fermi do alumínio é  $11,6 \text{ eV}$ ; a massa específica e a massa molar são  $2,70 \text{ g/cm}^3$  e  $27,0 \text{ g/mol}$ , respectivamente. A partir desses dados determine o número de elétrons de condução por átomo.

••20 Calcule a concentração (número por unidade de volume) (a) de moléculas de oxigênio a  $0,0^\circ\text{C}$  e uma pressão de  $1,0 \text{ atm}$ ; (b) de elétrons de condução do cobre. (c) Qual é a razão entre o

segundo valor e o primeiro? Determine a distância média ( $d$ ) entre as moléculas de oxigênio e (e) entre os elétrons de condução, supondo que essa distância é a aresta de um cubo cujo volume é igual ao volume disponível por partícula (molécula ou elétron).

••21 Mostre que em  $T = 0 \text{ K}$  a energia média  $E_{\text{méd}}$  dos elétrons de condução de um metal é igual a  $3E_F/5$ . (Sugestão: De acordo com a definição de média,  $E_{\text{méd}} = (1/n) \int E N_o(E) dE$ , onde  $n$  é a concentração de elétrons de condução.)

••22 Uma amostra de um certo metal tem um volume de  $4,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ . O metal tem uma massa específica de  $9,0 \text{ g/cm}^3$  e uma massa molar de  $60 \text{ g/mol}$ . Os átomos são divalentes. Quantos elétrons de condução (ou elétrons de valência) existem na amostra?

••23 Use o resultado do Problema 21 para calcular a energia cinética total de translação dos elétrons de condução em  $1,00 \text{ cm}^3$  de cobre a  $0 \text{ K}$ .

••24 Qual é o número de estados ocupados em um intervalo de energia de  $0,0300 \text{ eV}$  com centro no nível de  $6,10 \text{ eV}$  da banda de valência de uma substância se o volume da amostra é  $5,00 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ , o nível de Fermi é  $5,00 \text{ eV}$  e a temperatura é  $1500 \text{ K}$ ?

••25 O zinco é um metal divalente. Calcule (a) a concentração de elétrons de condução; (b) a energia de Fermi; (c) a velocidade de Fermi; (d) o comprimento de onda de de Broglie correspondente à velocidade determinada no item (c). Os dados necessários estão no Apêndice F.

••26 Um certo material tem uma massa molar de  $20,0 \text{ g/mol}$ , uma energia de Fermi de  $5,00 \text{ eV}$  e 2 elétrons de valência por átomo. Determine a massa específica do material em  $\text{g/cm}^3$ .

••27 A  $1000 \text{ K}$  a fração de elétrons de condução em um metal com energia maior que a energia de Fermi é igual à área sob a parte da curva da Fig. 41-8b acima de  $E_F$  dividida pela área sob a curva inteira. É difícil calcular essas áreas por integração direta. Entretanto, uma aproximação dessa fração, válida para qualquer temperatura  $T$ , é a seguinte:

$$\text{frac} = \frac{3kT}{2E_F}.$$

Observe que  $\text{frac} = 0$  para  $T = 0 \text{ K}$ , como seria de se esperar. Qual é a fração para o cobre (a) a  $300 \text{ K}$  e (b) a  $1000 \text{ K}$ ? Para o cobre,  $E_F = 7,0 \text{ eV}$ . (c) Verifique as respostas por integração numérica, usando a Eq. 41-7.

••28 Em que temperatura 1,30% dos elétrons de condução do lítio (um metal) tem energia maior que a energia de Fermi  $E_F$ , que é  $4,70 \text{ eV}$ ? (Veja o Problema 27.)

••29 (a) Use o resultado do Problema 21 e uma energia de Fermi de  $7,00 \text{ eV}$  para o cobre para estimar a energia que seria liberada pelos elétrons de condução de uma moeda de cobre com uma massa de  $3,10 \text{ g}$  se fosse possível tornar sem efeito o princípio de exclusão de Pauli. (b) Essa energia seria suficiente para manter acesa durante quanto tempo uma lâmpada de  $100 \text{ W}$ ? (Nota: Não existe nenhuma forma conhecida de tornar sem efeito o princípio de exclusão de Pauli!)

•••30 Um certo metal possui  $1,70 \times 10^{28}$  elétrons de condução por metro cúbico. Uma certa amostra do metal tem um volume de  $6,00 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  e está à temperatura de  $200 \text{ K}$ . Quantos estados ocupados existem em um intervalo de energia de  $3,20 \times 10^{-20} \text{ J}$  com o centro na energia de  $4,00 \times 10^{-19} \text{ J}$ ? (Sugestão: Não arredonde o expoente da exponencial.)

**seção 41-6 Semicondutores**

•31 (a) Qual é o comprimento de onda máximo de uma luz capaz de excitar um elétron da banda de valência do diamante para a banda de condução? A distância entre as duas bandas é 5,50 eV. (b) A que parte do espectro eletromagnético pertence esse comprimento de onda?

••32 Em um modelo simplificado de um semicondutor não-dopado a distribuição de estados disponíveis pode ser substituída por uma distribuição na qual existem  $N_v$  estados na banda de valência, todos com a mesma energia  $E_v$ , e  $N_c$  estados na banda de condução, todos com a mesma energia  $E_c$ . O número de elétrons na banda de condução é igual ao número de buracos na banda de valência. (a) Mostre que para que esta última condição seja satisfeita é preciso que

$$\frac{N_c}{\exp(\Delta E_c/kT) + 1} = \frac{N_v}{\exp(\Delta E_v/kT) + 1}$$

onde

$$\Delta E_c = E_c - E_F \quad \text{e} \quad \Delta E_v = -(E_v - E_F)$$

(b) Se o nível de Fermi está aproximadamente a meio caminho entre a banda de valência e a banda de condução e se a distância entre o nível de Fermi e as duas bandas é muito maior que  $kT$ ,  $\exp(\Delta E_c/kT) + 1 \approx \exp(\Delta E_c/kT)$  e  $\exp(\Delta E_v/kT) + 1 \approx \exp(\Delta E_v/kT)$  na equação do item (a). Nessas condições, mostre que

$$E_F = \frac{(E_c + E_v)}{2} + \frac{kT \ln(N_v/N_c)}{2}$$

o que, para  $N_v \approx N_c$ , significa que o nível de Fermi de um semicondutor não-dopado está praticamente a meio caminho entre a banda de valência e a banda de condução.

••33 A função probabilidade de ocupação (Eq. 41-6) pode ser aplicada tanto a metais como a semicondutores. Nos semicondutores a energia de Fermi está praticamente a meio caminho entre a banda de valência e a banda de condução. No caso do germânio a distância entre a banda de condução e a banda da valência é 0,67 eV. Determine a probabilidade (a) de que um estado na extremidade inferior da banda de condução esteja ocupado; (b) de que um estado na extremidade superior da banda de valência esteja ocupado. Suponha que  $T = 290$  K.

••34 O composto arseneto de gálio é um semicondutor, com  $E_g = 1,43$  eV, que possui uma estrutura cristalina semelhante à do silício, na qual metade dos átomos de silício são substituídos por átomos de arsênio e metade por átomos de gálio. Faça um desenho bidimensional da rede cristalina do arseneto de gálio, tomando como modelo a Fig. 41-10a. (a) Qual é a carga elétrica (a) dos íons de gálio e (b) dos íons de arsênio? (c) Quantos elétrons existem por ligação? (Sugestão: Consulte a tabela periódica do Apêndice G.)

**seção 41-7 Semicondutores Dopados**

••35 A dopagem muda a posição da energia de Fermi de um semicondutor. Considere o silício, com uma distância de 1,11 eV entre a extremidade superior da banda da valência e a extremidade inferior da banda de condução. A 300 K o nível de Fermi do silício puro está praticamente a meio caminho entre a banda de valência e a banda de condução. Suponha que o silício seja dopado com átomos doadores que introduzem um estado 0,15 eV abaixo da banda de condução; suponha ainda que a dopagem muda a posição do nível de Fermi para 0,11 eV abaixo da banda de condução (Fig. 41-23). Calcule a probabilidade de que um es-

tado na extremidade inferior da banda de condução esteja ocupado (a) antes da dopagem; (b) depois da dopagem. (c) Calcule a probabilidade de que o nível introduzido pelo doador esteja ocupado.

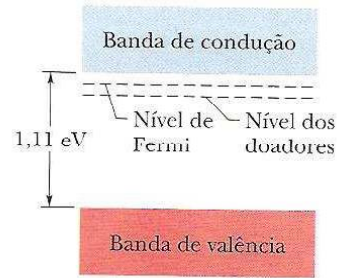


FIG. 41-23 Problema 35.

••36 No silício puro à temperatura ambiente a concentração de elétrons na banda de condução é  $5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$  e a concentração de buracos na banda de valência tem o mesmo valor. Suponha que um em cada  $10^7$  átomos de silício seja substituído por um átomo de fósforo. (a) Que tipo de semicondutor é o novo material:  $n$  ou  $p$ ? (b) A concentração de que tipo de portador de carga aumenta com a dopagem? (c) Qual é a razão entre a concentração de portadores de carga (elétrons e buracos) no material dopado e a concentração no material não-dopado?

••37 Que massa de fósforo é necessária para dopar 1,0 g de silício da forma descrita no Exemplo 41-6?

••38 Uma amostra de silício é dopada com átomos que introduzem estados doadores 0,110 eV abaixo da banda de condução. (A distância entre a banda de condução e a banda de valência no silício é 1,11 eV.) (a) Se cada um dos estados doadores é ocupado com uma probabilidade de  $5,00 \times 10^{-5}$  para  $T = 300$  K, (a) o nível de Fermi está acima ou abaixo da extremidade superior da banda de valência? (b) Qual é a distância entre o nível de Fermi e a extremidade superior da banda de valência? (c) Nas condições do item (a), qual é a probabilidade de que um estado na extremidade inferior da banda de condução esteja ocupado?

**seção 41-9 O Diodo Retificador**

•39 Quando um fóton penetra na zona de depleção de uma junção  $p-n$  pode colidir com elétrons da banda de valência, transferindo-os para a banda de condução e criando assim pares elétron-buraco. Por essa razão as junções  $p-n$  são muito usadas para detectar radiações, principalmente nas regiões de raios X e raios gama do espectro eletromagnético. Suponha que um fóton de raios gama de 662 keV transfira sua energia para elétrons em eventos de espalhamento múltiplo no interior de um semicondutor em que a distância entre a banda de condução e a banda de valência é 1,1 eV, até que toda a energia seja transferida. Supondo que os elétrons excitados pelo fóton são transferidos da extremidade superior da banda de valência para a extremidade inferior da banda de condução, determine o número de pares elétron-buraco criados no processo.

•40 Em uma junção  $p-n$  ideal a relação entre a corrente,  $I$ , e a diferença de potencial aplicada à junção,  $V$ , é dada por

$$I = I_0(e^{eV/kT} - 1),$$

onde  $I_0$ , que depende dos materiais de que é feita a junção mas não da corrente nem da diferença de potencial, é a corrente inversa de saturação. A tensão  $V$  é positiva quando a junção é polarizada diretamente e negativa quando a junção é polarizada

inversamente. Para mostrar que um dispositivo com essas características se comporta como um diodo retificador, (a) faça um gráfico de  $I$  em função de  $V$  para uma junção ideal, de  $-0,12$  V a  $+0,12$  V, supondo que  $T = 300$  K e  $I_0 = 5,0$  nA. (b) Para a mesma temperatura, calcule a razão entre a corrente de uma junção submetida a uma polarização direta de  $0,50$  V e uma junção submetida a uma polarização inversa de  $0,50$  V.

#### seção 41-10 O Diodo Emissor de Luz (LED)

•41 Em um certo cristal a última banda ocupada está completa. O cristal é transparente para todos os comprimentos de onda maiores que  $295$  nm e opaco para comprimentos de onda menores. Calcule a distância, em elétrons-volts, entre a última banda ocupada e a primeira banda vazia nesse material.

•42 Em um cristal de cloreto de potássio a distância entre a última banda ocupada (que está completa) e a primeira banda vazia é  $7,6$  eV. O cristal é opaco ou transparente a uma luz com um comprimento de onda de  $140$  nm?

#### seção 41-11 O Transistor

•43 Um certo circuito integrado, que é do tamanho de um selo postal ( $2,54$  cm  $\times$   $2,22$  cm), contém cerca de  $3,5$  milhões de transistores. Supondo que os transistores são quadrados, quais devem ser, *no máximo*, suas dimensões? (Nota: Além de transistores, um circuito integrado contém outros componentes; deve haver também espaço para as ligações entre os elementos do circuito. Na verdade, hoje é possível fabricar transistores com dimensões de menos de  $0,2$   $\mu$ m.)

•44 Um MOSFET de silício tem uma porta quadrada com  $0,50$   $\mu$ m de lado. A camada isolante de óxido de silício que separa a porta do substrato tipo  $p$  tem  $0,20$   $\mu$ m de espessura e uma constante dielétrica de  $4,5$ . (a) Qual é a capacitância equivalente do conjunto porta-substrato (considerando a porta como uma das placas do capacitor e o substrato como a outra placa)? (b) Quantas cargas elementares  $e$  se acumulam na porta quando existe uma diferença de potencial de  $1,0$  V entre a porta e a fonte?\*

#### Problemas Adicionais

45 (a) Determine o ângulo  $\theta$  entre ligações vizinhas na rede

cristalina do silício. Na rede do silício cada átomo está ligado a quatro outros átomos que formam um tetraedro regular (pirâmide formada por triângulos equiláteros), no centro do qual se encontra o átomo considerado. (b) Determine o comprimento da ligação, dado que a distância entre os átomos dos vértices do tetraedro é  $388$  pm.

46 A prata funde a  $961^\circ\text{C}$ . No ponto de fusão, que fração dos elétrons de condução está em estados com energias maiores que a energia de Fermi, que é  $5,5$  eV? (Sugestão: Veja o Problema 27.)

47 (a) Mostre que a densidade de estados na energia de Fermi é dada por

$$N(E_F) = \frac{(4)(3^{1/3})(\pi^{2/3})mn^{1/3}}{h^2} \\ = (4,11 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ eV}^{-1})n^{1/3},$$

onde  $n$  é a concentração de elétrons de condução. (b) Calcule  $N(E_F)$  para o cobre, que é um metal monovalente com massa molar  $63,54$  g/mol e massa específica  $8,96$  g/cm<sup>3</sup>. (c) Compare o resultado com a curva da Fig. 41-6, lembrando que a energia de Fermi do cobre é  $7,0$  eV.

48 Usando os dados da Tabela 41-1, calcule  $d\rho/dT$  à temperatura ambiente (a) para o cobre e (b) para o silício.

49 (a) Mostre que a derivada  $dP/dE$  da Eq. 41-6 é  $-1/4kT$  para  $E = E_F$ . (b) Mostre que a tangente à curva da Fig. 41-7b no ponto  $E = E_F$  intercepta o eixo horizontal no ponto  $E = E_F + 2kT$ .

50 Mostre que  $P(E)$ , a probabilidade de ocupação dada pela Eq. 41-6, é simétrica em relação à energia de Fermi, ou seja, mostre que

$$P(E_F + \Delta E) + P(E_F - \Delta E) = 1.$$

51 Para que pressão, em atmosferas, o número de moléculas por unidade de volume em um gás ideal é igual à concentração de elétrons de condução no cobre, supondo que tanto o gás como o metal estão a uma temperatura de  $300$  K?

52 Mostre que o fator numérico  $0,121$  na Eq. 41-9 está correto.

53 A energia de Fermi do cobre é  $7,0$  eV. Mostre que a velocidade de Fermi correspondente é  $1600$  km/s.

\* No MOSFET a que se refere este problema, que é de um tipo diferente do descrito no texto, não existe uma região tipo  $n$  ligando a fonte ao dreno; o canal é obtido exclusivamente por polarização da porta. É por isso que existe apenas material isolante entre a porta e o substrato tipo  $p$ . (N.T.)