

1. O silício é o material mais utilizado para a fabricação de dispositivos semicondutores. Ele é um semicondutor **intrínseco**, que também pode ser dopado, e os materiais dopados são semicondutores **extrínsecos**. Considerando o caso do silício sem dopagem e os dados apresentados abaixo (referentes ao silício não dopado a 20 °C):

- calcule o número de portadores de carga por cm^3 do silício;
- calcule a razão entre a densidade de átomos de silício e a densidade de átomos de silício que contribuem para a condução elétrica.

Dados:

Condutividade do silício (σ) = $4,3 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;

Carga elementar do elétron = $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$;

Mobilidade dos elétrons livres (μ_e) = $0,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$;

Mobilidade dos buracos eletrônicos (μ_b) = $0,04 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$;

Densidade do silício por cm^3 = $4,997 \times 10^{22} \text{ átomos/cm}^3$.

$$\begin{aligned} \sigma &= n |e| \mu_e \\ \sigma &= p |e| \mu_b \end{aligned}$$

2. Em geral, a condutividade elétrica dos materiais metálicos decresce com o aumento da temperatura, enquanto a condutividade dos semicondutores intrínsecos cresce com o aumento da temperatura. Justifique a diferença de comportamentos.

3. À temperatura ambiente (25 °C), a resistividade elétrica do alumínio é igual a $2,655 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ e a mobilidade dos elétrons livres (responsáveis pela condução elétrica) é igual a $1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$.

- calcule o número de elétrons livres por cm^3 de alumínio.
- calcule o número de elétrons livres por átomo de alumínio.

Dados:

Carga elementar do elétron = $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$; Densidade do alumínio = $2,7 \text{ g/cm}^3$;

Número de Avogadro = $6,022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}$;

Massa molar do alumínio = $26,98 \text{ g/mol}$.

4. Solicita-se projetar um solenoide que irá desenvolver um campo magnético de 10 kA/m no vácuo quando alimentado por 1 A. O solenoide tem 0,3 m de comprimento e 2 cm de diâmetro.

- Quantas voltas de fio são necessárias?
- Se o solenoide é enrolado com fio de cobre com diâmetro $d = 0,5 \text{ mm}$, qual é a voltagem dc requerida para alimentá-lo?

Dados:

$$H = NI / L_s$$

$$\rho = R (A_f / L_f), \rho = \text{resistividade}, R = \text{resistência}, A_f = \text{seção transversal e } L_f = \text{comprimento}$$

$$V = R I$$

$$\rho_{\text{cobre}} = 17,2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

5. A aplicação de um campo magnético $H = 1,720 \times 10^5 \text{ A/m}$ causa uma indução magnética $B = 0,2162 \text{ T}$ num material. Calcule a permeabilidade e a susceptibilidade. Classifique o tipo de material magnético.

Dados:

$$B = \mu H \text{ (} B = \text{indução magnética, } \mu = \text{permeabilidade magnética, } H = \text{intensidade de campo magnético)}$$

$$\chi = \mu_r - 1 \text{ (} \chi = \text{susceptibilidade magnética, } \mu_r = \text{permeabilidade relativa} = \mu / \mu_0$$

$$\text{sendo } \mu_0 = \text{permeabilidade magnética do vácuo} = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m})$$

6. Materiais ferromagnéticos podem ser classificados como sendo magneticamente moles ou duros.

- a) Preencha a tabela abaixo, na qual são apresentadas características de materiais ferromagnéticos, indicando quais correspondem a materiais magnéticos moles e quais correspondem a materiais magnéticos duros.

<i>Característica</i>	<i>Duros</i>	<i>Moles</i>
Coercividade (H_c) elevada		
Pequeno gasto de energia para alterar magnetização (pequena área do ciclo de histerese)		
Alta permeabilidade magnética (μ) no início do ciclo de magnetização		
Remanência (B_r) a mais elevada possível		

- b) Você deve fazer a escolha de materiais magnéticos moles ou duros para as três aplicações a seguir: (I) material para núcleo de transformador elétrico; (II) material para fabricação de agulha para uma bússola e (III) material para a fabricação da mídia de gravação magnética de um disco rígido. Faça a escolha e justifique-a.

7. O que são domínios magnéticos?

8. Considere as afirmações abaixo relativas às propriedades magnéticas dos materiais e assinale F para as afirmações falsas e V para as verdadeiras.

- a) São ferromagnéticos na forma elementar alguns metais de transição (orbital 3d não preenchido) e algumas terras raras (orbital 4f não preenchido), pois os spins magnéticos apresentam-se desemparelhados. ()
- b) Nos metais magnéticos, os domínios magnéticos coincidem com os grãos. ()
- c) As paredes dos domínios magnéticos são móveis, embora para alterá-las seja necessário o fornecimento de energia, por exemplo, pela exposição a um campo magnético externo. ()
- d) A magnetização de saturação corresponde a um único domínio na direção contrária à do campo aplicado. ()
- e) A remanência (B_r) corresponde a indução magnética B residual na amostra após a retirada do campo externo H (ou seja, quando $H = 0$). ()
- f) A coercividade (H_c) corresponde ao campo magnético H que deve ser aplicado sobre a amostra para anular sua indução magnética B. ()
- g) A área compreendida pelo ciclo de histerese corresponde à quantidade de energia por unidade de volume associada ao processo de magnetização/desmagnetização da amostra. ()
- h) Materiais magneticamente duros são magnetizados mais facilmente que os magneticamente moles. ()
- i) Materiais utilizados para armazenamento permanente de informações digitais devem ser magneticamente moles. ()
- j) A magnitude da susceptibilidade magnética diferencia um material ferromagnético de materiais paramagnético e diamagnético. ()
- k) Materiais ferromagnéticos apresentam perda da capacidade de magnetização em temperaturas elevadas (temperatura Curie) tornando-se paramagnéticos. ()

Resolução

1. Condutividade do silício (σ) = $4,3 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$; Carga elementar do elétron = $1,602 \times 10^{-19} C$; Mobilidade dos elétrons livres (μ_e) = $0,14 \times 10^{-3} m^2 V^{-1} s^{-1}$; Mobilidade dos buracos eletrônicos = $0,04 \times 10^{-3} m^2 V^{-1} s^{-1}$; Densidade do silício por cm^3 = $4,997 \times 10^{22}$ átomos/ cm^3 .

a) A condutividade elétrica (σ) de um semiconductor pode ser representada pela equação (1)

$\sigma = n e \mu_e + p e \mu_b$ (1) onde n e p são, respectivamente, o número de elétrons livres e de buracos eletrônicos por unidade de volume, e é a magnitude da carga elementar do elétron e μ_e e μ_b são, respectivamente, a mobilidade dos elétrons livres e dos buracos eletrônicos.	Para semicondutores intrínsecos $n = p$ e da equação (1) resulta $\sigma = n e (\mu_e + \mu_b)$ Substituindo na equação acima os valores numéricos fornecidos obtemos $n = p = 1,5 \times 10^{19}$ portadores / $m^3 = 1,5 \times 10^{13}$ portadores/ cm^3
--	---

b) A razão entre a densidade de átomos de silício e a densidade de átomos de silício que contribuem para a condução elétrica é

$$\frac{4,997 \times 10^{22}}{1,5 \times 10^{13}} = 3,3 \times 10^9$$

ou seja, um em cada $3,3 \times 10^9$ átomos de silício contribui para a condutividade elétrica com um elétron livre e um buraco eletrônico.

2. Nos **materiais metálicos**, à medida que a **temperatura aumenta, aumenta a probabilidade de espalhamento dos elétrons livres**, o que leva a uma diminuição da mobilidade eletrônica (μ_e). Por outro lado, é pouco significativo o aumento do número de elétrons livres (n_e) com o aumento da temperatura. Assim o comportamento da condutividade (σ_m) dos metais é basicamente governado pelo comportamento de μ_e e a condutividade ($\sigma_m = n_e |e| \mu_e$) diminui com o aumento da temperatura.

Nos **materiais semicondutores intrínsecos**, a **mobilidade dos portadores de carga (μ_e e μ_b) também decresce à medida que a temperatura aumenta**, no entanto, **o aumento no número de elétrons (n_{sc}) que conseguem saltar da banda de valência para a banda de condução é muito significativo**. Desta forma, no cômputo geral, **a condutividade [$\sigma_{sc} = n_{sc} |e| (\mu_e + \mu_b)$] dos semicondutores intrínsecos aumenta com o aumento da temperatura**.

3. a) A condutividade elétrica (σ) de um metal se relaciona com a densidade de elétrons livres (n) por meio da equação

$$\sigma = n |e| \mu_e, \quad (1)$$

onde |e| é a magnitude da carga elementar do elétron e μ_e é a mobilidade dos elétrons livres. Sabemos também que a condutividade elétrica e a resistividade elétrica (ρ) são inversamente proporcionais ($\sigma = 1 / \rho$).

$$\therefore \rho = 2,655 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \Rightarrow \sigma = 1 / 2,655 \times 10^{-8} = 3,766 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}.$$

Substituindo os valores de σ , |e| e μ_e na equação (1) obtemos

$$n = 1,96 \times 10^{29} \text{ elétrons}/m^3 = 1,96 \times 10^{23} \text{ elétrons}/cm^3$$

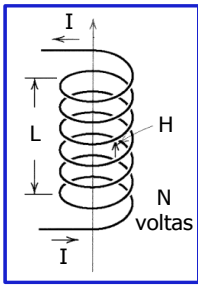
b) A densidade do alumínio n_{Al} em número de átomos por centímetro cúbico pode ser obtida por meio da relação

$$\frac{26,98}{2,7} = \frac{6,022 \times 10^{23}}{n_{Al}} \Rightarrow n_{Al} = 6,03 \times 10^{22} \text{ átomos / cm}^3$$

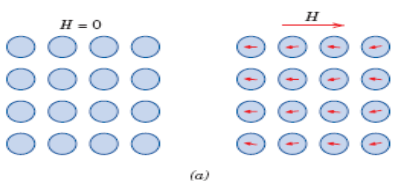
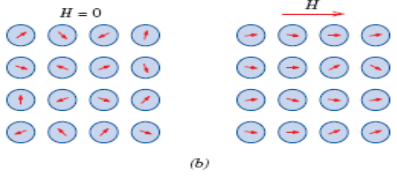
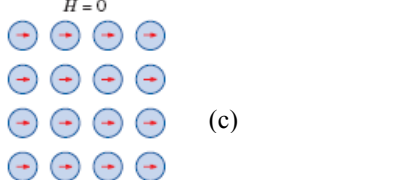
Assim, o número de elétrons livres por átomo de alumínio é:

$$\frac{n}{n_{Al}} = \frac{1,96 \times 10^{23}}{6,03 \times 10^{22}} = 3,25$$

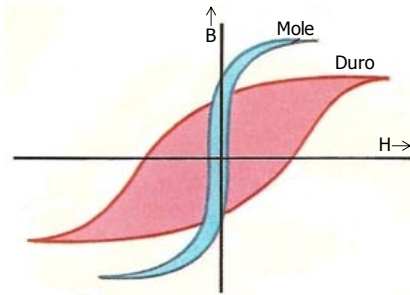
4.

<p>a) Considerando $H = N I / L_s$ $N = H L_s / I = (10.000 \text{ A/m}) \times 0,3 \text{ m} / 1 \text{ A}$ $N = 3.000 \text{ voltas}$</p>	
<p>b) comprimento total do fio $L_f = 3.000 \times \pi \times 0,02 \text{ m} = 188 \text{ m}$ seção reta do fio $A_f = \pi \times 0,0005^2 \text{ m}^2 / 4 = 1,96 \times 10^{-7} \text{ m}^2$</p>	
<p>$\rho = R (A_f / L_f)$ $R = \frac{17,2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}}{1,96 \times 10^{-7}} \times 188 \text{ m} = 16,5 \Omega$</p>	$V = RI = 16,5 \Omega \times 1 \text{ A} = 16,5 \text{ V}$

5.

<p> $B = \mu H$ $\chi = \mu_r - 1$ $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$ $H = 1,720 \times 10^5 \text{ A/m}$ $B = 0,2162 \text{ T} \text{ (T = Wb/m}^2\text{)}$ </p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>$H = 0$</p>  <p>(a)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>$H = 0$</p>  <p>(b)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>$H = 0$</p>  <p>(c)</p> </div> </div> <p style="margin-top: 10px;"> (a) diamagnético, indução de dipolos em direção oposta a H (b) paramagnético, dipolos permanentes dos momentos magnéticos do spin eletrônico $\mu_r > 1$ $\chi = 10^{-5} - 10^{-2}$ (c) ferromagnético, momento magnético na ausência de campo H. Valores elevados de χ (10^6). </p>	<p> $\mu = B/H = 0,2162 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2} / 1,720 \times 10^5 \text{ A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ $\mu = 1,256 \times 10^{-6} \text{ Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ $\chi = \mu_r - 1$ </p> $\chi = \frac{1,256 \times 10^{-6} \text{ Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}}{4 \pi \times 10^{-7} \text{ Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}} - 1$ <p> $\chi = + 2,7 \times 10^{-4}$ </p> <p>O material é paramagnético porque apresenta susceptibilidade positiva e pequena.</p> <p><i>Atenção:</i> Caso o número de algarismos significativos não seja utilizado apropriadamente, pode-se obter um valor de χ pequeno e negativo e concluir, erroneamente, que o material é diamagnético.</p>
--	---

6. a) Observando as curvas de histerese (ou ciclos magnetização-desmagnetização) apresentadas abaixo e correspondentes a materiais magneticamente moles e duros, podemos preencher a tabela solicitada.



	Duros	Moles
Coercividade (H_c) elevada	×	
Pequeno gasto de energia para alterar magnetização (pequena área do ciclo de histerese)		×
Alta permeabilidade magnética (μ) no início do ciclo de magnetização		×
Remanência (B_r) a mais elevada possível	×	

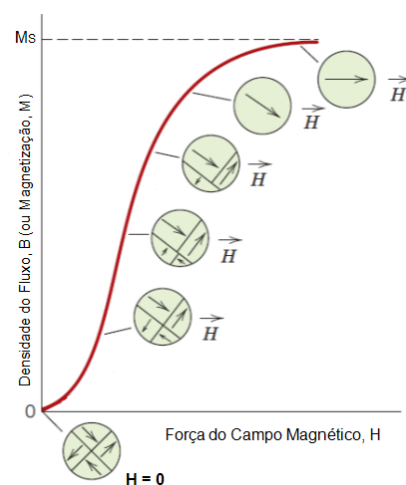
b) (I) Para núcleos de transformadores elétricos devemos utilizar materiais magneticamente moles (aço com 3,25% silício e supermalloy: 79%Ni-16%Fe-5%Mo) para minimizar as perdas energéticas durante as reversões da indução magnética. "Mole" significa fácil de ser magnetizado e desmagnetizado ou, equivalentemente, significa que as perdas energéticas por ciclo de histerese são pequenas.

(II) A agulha de uma bússola deve permanecer magnetizada para ser sensível ao campo magnético terrestre. Assim, ela deve ser fabricada com materiais magneticamente duros ($SmCo_5$, Sm_2Co_{17} , NdFeB e ferritas cerâmicas). "Duro" significa que o material permanece magnetizado, ou seja, que ele é um ímã permanente.

(III) Mídias de gravação magnética de discos rígidos são fabricadas com materiais magneticamente duros (CoCrPt, CoCrPtTa, CoCrPtB) para maximizar a fidedignidade da informação gravada e também para maximizar a intensidade do sinal dos dados fornecido ao cabeçote de leitura. Note-se, no entanto, que o material deve ser mole o suficiente para permitir que cabeçote de escrita seja capaz de gravar na mídia os dados requeridos.

7.

Um domínio magnético é uma região volumétrica de um material ferromagnético onde todos os momentos magnéticos atômicos estão alinhados (mesma direção e sentido). Num domínio magnético a magnetização possui seu valor de saturação. Num sólido, os diversos domínios possuem direções de magnetização de saturação diferentes, volumes diferentes, mas a magnitude da magnetização de cada domínio é a mesma. A magnetização total de um material ferromagnético pode ser muito pequena ou mesmo nula. A fronteira entre domínios vizinhos, a parede de domínio, é uma região de transição, com espessura da ordem de 100 nm, dentro da qual a magnetização muda gradualmente. Note que, a magnetização de saturação de um material é atingida quando todos os domínios do material estão alinhados devido à aplicação de um campo magnético externo suficientemente intenso.



8. Considere as afirmações abaixo relativas às propriedades magnéticas dos materiais e assinale F para as afirmações falsas e V para as verdadeiras.
- a) São ferromagnéticos na forma elementar alguns metais de transição (orbital 3d não preenchido) e algumas terras raras (orbital 4f não preenchido), pois os spins magnéticos apresentam-se desemparelhados. (V)
 - b) Nos metais magnéticos, os domínios magnéticos coincidem com os grãos. (F)
 - c) As paredes dos domínios magnéticos são móveis, embora para alterá-las seja necessário o fornecimento de energia, por exemplo, pela exposição a um campo magnético externo. (V)
 - d) A magnetização de saturação corresponde a um único domínio na direção contrária à do campo aplicado. (F)
 - e) A remanência (B_r) corresponde a indução magnética B residual na amostra após a retirada do campo externo H (ou seja, quando $H = 0$). (V)
 - f) A coercividade (H_c) corresponde ao campo magnético H que deve ser aplicado sobre a amostra para anular sua indução magnética B. (V)
 - g) A área compreendida pelo ciclo de histerese corresponde à quantidade de energia por unidade de volume associada ao processo de magnetização/desmagnetização da amostra. (V)
 - h) Materiais magneticamente duros são magnetizados mais facilmente que os magneticamente moles. (F)
 - i) Materiais utilizados para armazenamento permanente de informações digitais devem ser magneticamente moles. (F)
 - j) A magnitude da susceptibilidade magnética diferencia um material ferromagnético de materiais paramagnético e diamagnético. (V)
 - k) Materiais ferromagnéticos apresentam perda da capacidade de magnetização em temperaturas elevadas (temperatura Curie) tornando-se paramagnéticos. (V)