

CAPITULO 3

Aula 13

Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.

(Cap. 3 p. 117-121)

Eletrônica I – PSI3321

Aula	Matéria	Cap./pág.	Testes agendados
1ª 22/03	Introdução, O primeiro Amp Op Comercial. Encapsulamento do Amp Op, O Amp Op ideal, Análise de circuitos com Amp Ops ideais. Exemplo 2.2	Cap. 2 p. 38-46	
2ª 25/03	Somador, Configuração não inversora, seguidor, amplificador de diferenças. Exercício 2.15	Sedra, Cap. 2 p. 46-53	
3ª 29/03	Amplificador de instrumentação, Funcionamento dos Amp Ops Não-Ideais. Exemplo 2.3 e 2.4	Sedra, Cap. 2 p. 53-59	Teste 01 9h20-9h40
4ª 01/04	Operação dos Amp Ops em grande excursão de sinal, imperfeições cc, circuitos integrador e diferenciador. Exemplo 2.6.	Sedra, Cap. 2 p. 59-73	
5ª 05/04	Diodo ideal, características do diodo real, equação de corrente do diodo, exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 89-96	Teste 02 9h20-9h40
6ª 08/04	Análise gráfica (reta de carga), modelos simplificados de diodos, exercícios	Sedra, Cap. 3 p. 96-99	
Semana Santa (11/04 a 16/04/2022)			
7ª 19/04	Modelo para pequenos sinais, modelos de circuitos equivalentes para pequenas variações (próximas do ponto quiescente), exercícios (exemplos 3.6 e 3.7)	Sedra, Cap. 3 p. 100-103	Teste 03 9h20-9h40
8ª 26/04	Operação na região de ruptura reversa, diodo zener, Projeto de um regulador Zener, exercícios (exemplo 3.8)	Sedra, Cap. 3 p. 104-106	Teste 04 9h20-9h40
9ª 29/04	Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação c.c., circuito retificador de meia onda, circuito retificador de onda completa com enrolamento secundário com tomada central, exercícios: 3.22.	Sedra, Cap. 3 p. 106-109	
10ª 03/05	Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro.	Sedra, Cap. 3 p. 109-111	Teste 05 9h20-9h40
11ª 06/05	Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).	Sedra, Cap. 3 p. 112-115	
12ª 10/05	Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28	Sedra, Cap. 3 p. 115-118	Teste 06 9h20-9h40
13ª 13/05	Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 117-121	
1ª. Semana de Provas (16/05 a 20/05/2022)			
Data: xx/xx/2022 (xxxx-feira) – Horário: xx:xxh			

14ª Aula:

Silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva)

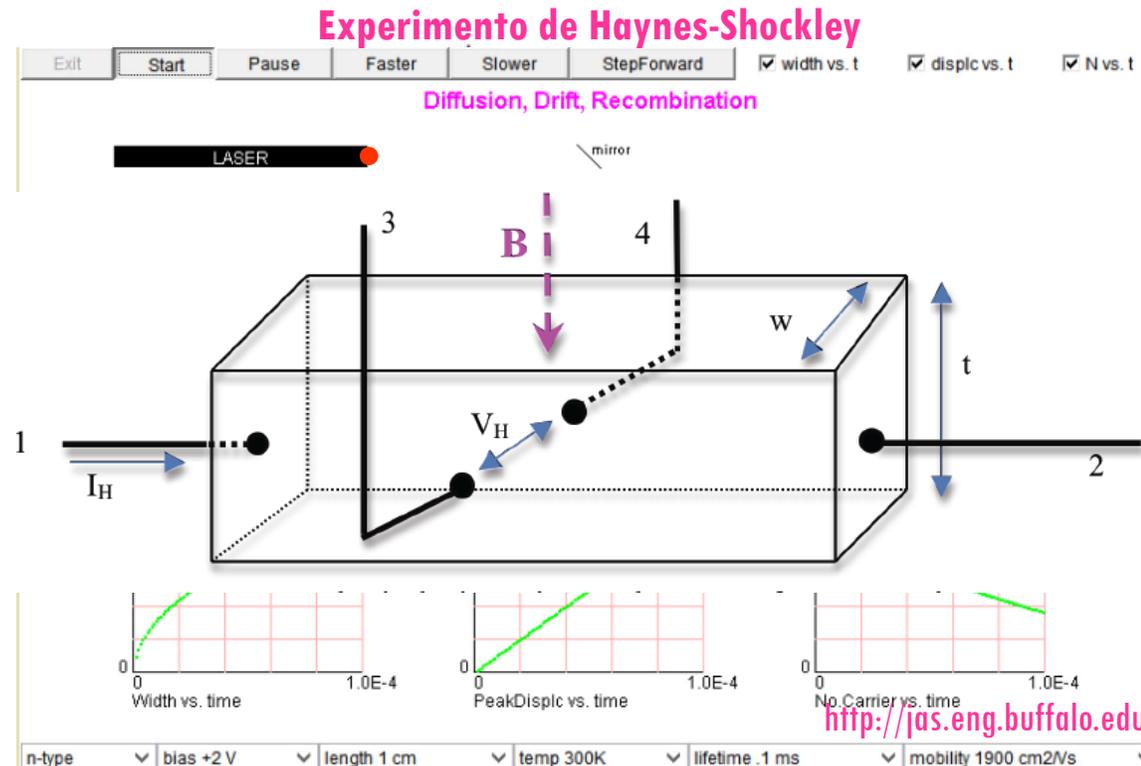
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Descrever os principais mecanismos de geração de corrente elétrica em um material semiconductor
- Apresentar a estrutura cristalina 3D e sua representação 2D, dando uma ordem de grandeza das dimensões envolvidas
- Explicar a existência de elétrons livres na estrutura e o conceito de lacunas (buracos)
- Calcular a concentração intrínseca de portadores livres
- Explicar as consequências da dopagem de materiais semicondutores
- Olhar a Lei de Ohm do lado de dentro do material, explicando os conceitos de condutividade e mobilidade

Materiais para Eletrônica

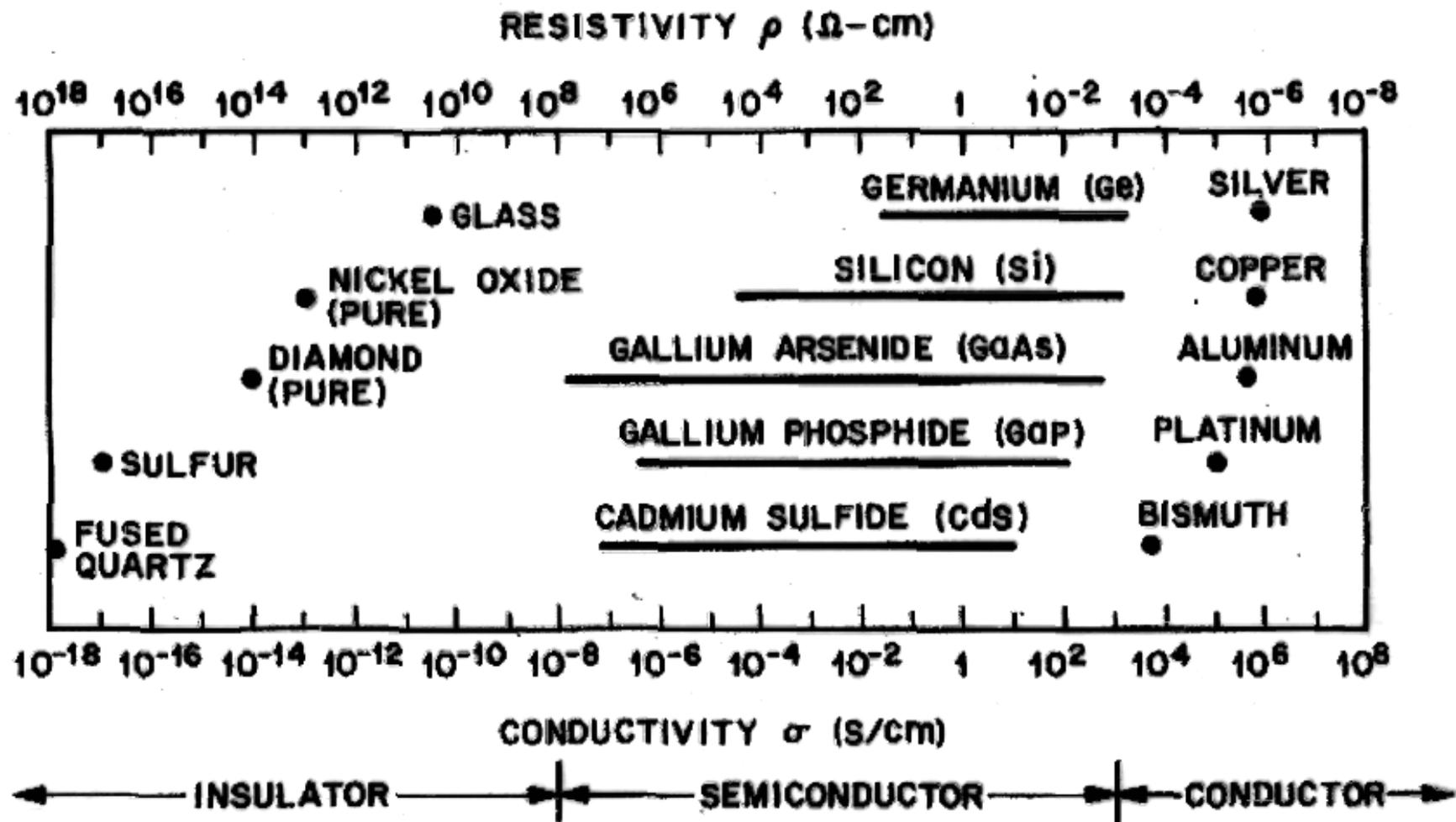
A resistividade de um semicondutor é sensível à:

- Temperatura
- Iluminação
- Campos magnéticos
- Pequenas doses de impurezas



Materials para Eletrônica

(pequenas doses de impurezas)



Estrutura Cristalina

Os materiais semicondutores são encontrados na forma cristalina, policristalina e amorfa.

Estudaremos basicamente os materiais semicondutores na forma cristalina:

- Os átomos estão arrançados de uma forma periódica tridimensional
- A esse arranjo chamaremos de rede cristalina

Materials para Semicondutores

IA										VIII A									
1 1.008 H Hydrogen	IIA										5 10.811 B Boron	6 12.011 C Carbon	7 14.007 N Nitrogen	8 15.999 O Oxygen	9 18.998 F Fluorine	10 20.183 Ne Neon			
3 6.939 Li Lithium	4 9.012 Be Beryllium	Transition Metals										13 26.981 Al Aluminum	14 28.086 Si Silicon	15 30.974 P Phosphorus	16 32.064 S Sulfur	17 35.453 Cl Chlorine	18 39.948 Ar Argon		
11 22.989 Na Sodium	12 24.312 Mg Magnesium	19 39.102 K Potassium	20 40.08 Ca Calcium	21 44.956 Sc Scandium	22 47.90 Ti Titanium	23 50.942 V Vanadium	24 51.996 Cr Chromium	25 54.938 Mn Manganese	26 55.847 Fe Iron	27 58.933 Co Cobalt	28 58.71 Ni Nickel	29 63.54 Cu Copper	30 65.37 Zn Zinc	31 69.72 Ga Gallium	32 72.59 Ge Germanium	33 74.922 As Arsenic	34 78.96 Se Selenium	35 79.909 Br Bromine	36 83.80 Kr Krypton
37 85.47 Rb Rubidium	38 87.62 Sr Strontium	39 88.905 Y Yttrium	40 91.22 Zr Zirconium	41 92.906 Nb Niobium	42 95.94 Mo Molybdenum	43 99 Tc Technetium	44 101.07 Ru Ruthenium	45 102.91 Rh Rhodium	46 106.4 Pd Palladium	47 107.87 Ag Silver	48 112.40 Cd Cadmium	49 114.82 In Indium	50 118.69 Sn Tin	51 121.75 Sb Antimony	52 127.60 Te Tellurium	53 126.904 I Iodine	54 131.30 Xe Xenon		
55 132.90 Cs Cesium	56 137.34 Ba Barium	57 138.91 La Lanthanum	72 178.49 Hf Hafnium	73 180.95 Ta Tantalum	74 183.85 W Tungsten	75 186.2 Re Rhenium	76 190.2 Os Osmium	77 192.2 Ir Iridium	78 195.09 Pt Platinum	79 196.967 Au Gold	80 200.59 Hg Mercury	81 204.37 Tl Thallium	82 207.19 Pb Lead	83 208.98 Bi Bismuth	84 210 Po Polonium	85 210 At Astatine	86 222 Rn Radon		
87 223 Fr Francium	88 226 Ra Radium	89 227 Ac Actinium	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Uns	108 Uno	109 Uue	110 Uun	↑ Nonmetals Metalloids (semimetals)									

Lanthanides
Actinides

58 140.12 Ce Cerium	59 140.91 Pr Praseodymium	60 144.24 Nd Neodymium	61 147 Pm Promethium	62 150.35 Sm Samarium	63 151.96 Eu Europium	64 157.25 Gd Gadolinium	65 158.92 Tb Terbium	66 162.50 Dy Dysprosium	67 164.93 Ho Holmium	68 167.26 Er Erbium	69 168.93 Tm Thulium	70 173.04 Yb Ytterbium	71 174.97 Lu Lutetium
90 232.04 Th Thorium	91 231 Pa Protactinium	92 238.03 U Uranium	93 237 Np Neptunium	94 242 Pu Plutonium	95 243 Am Americium	96 247 Cm Curium	97 247 Bk Berkelium	98 249 Cf Californium	99 254 Es Einsteinium	100 253 Fm Fermium	101 256 Md Mendelevium	102 253 No Nobelium	103 257 Lr Lawrencium

Materials para Semicondutores

Table 1 Portion of the Periodic Table Related to Semiconductors

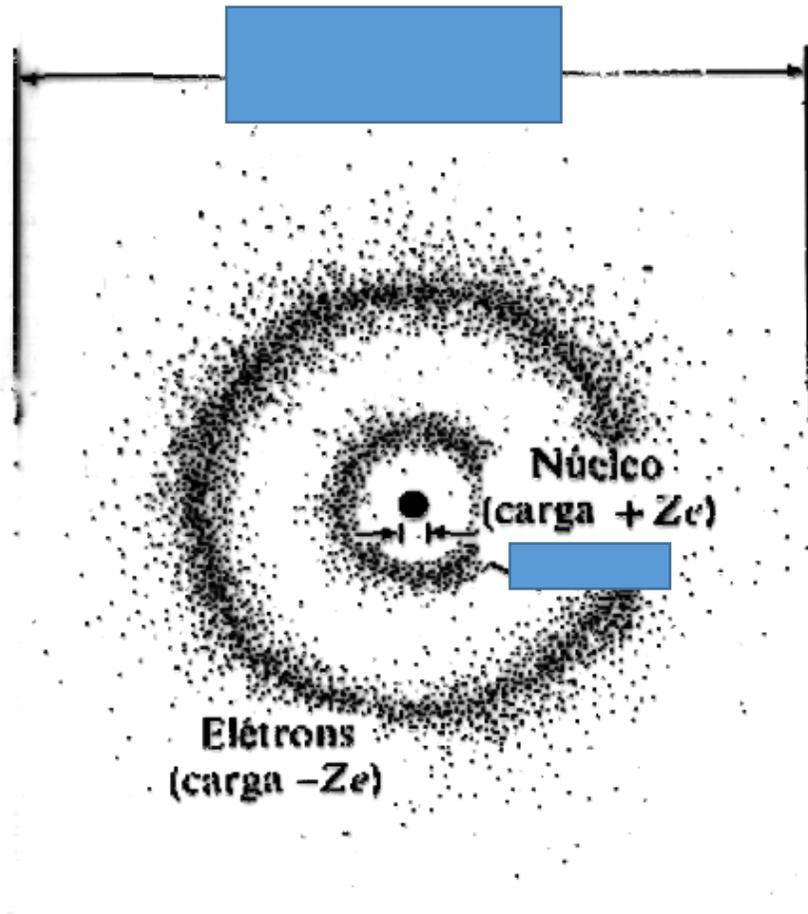
Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B Boron	C Carbon	N Nitrogen	
3	Mg Magnesium	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
4	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium
5	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium
6	Hg Mercury		Pb Lead		

Materials para Semicondutores

Table 2 Element and Compound Semiconductors

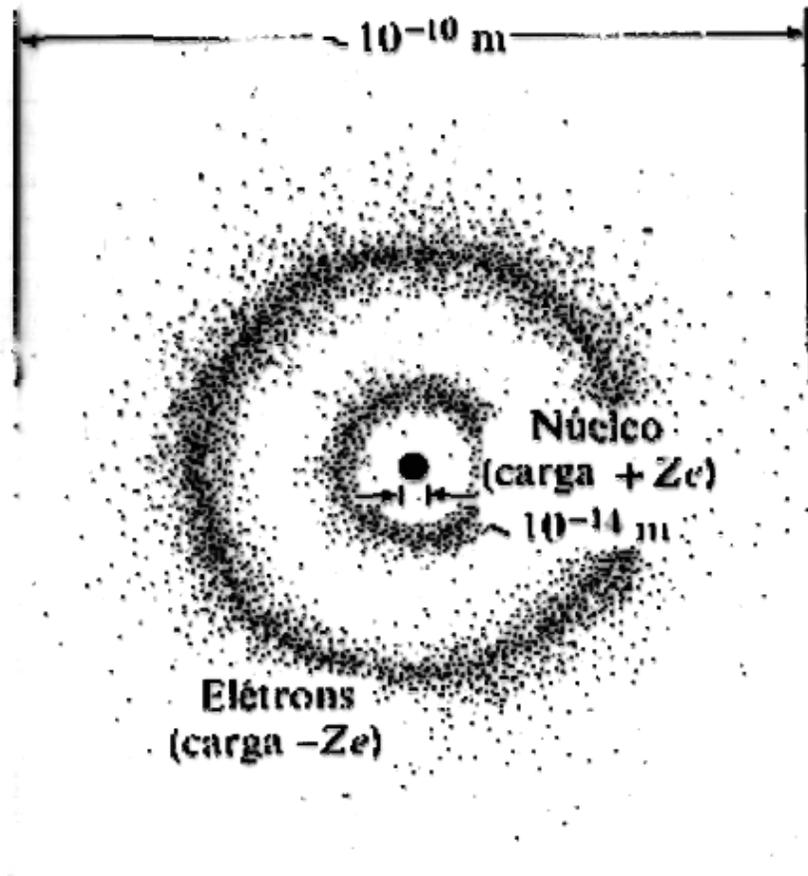
Element	IV-IV Compounds	III-V Compounds	II-VI Compounds	IV-VI Compounds
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

O Átomo



- Núcleo composto por nêutrons e prótons (+q) com massas iguais de $1,66 \times 10^{-27} \text{kg}$ (1.700 vezes a massa do elétron).
- Uma nuvem de elétrons recobre o núcleo
- O átomo é eletricamente neutro

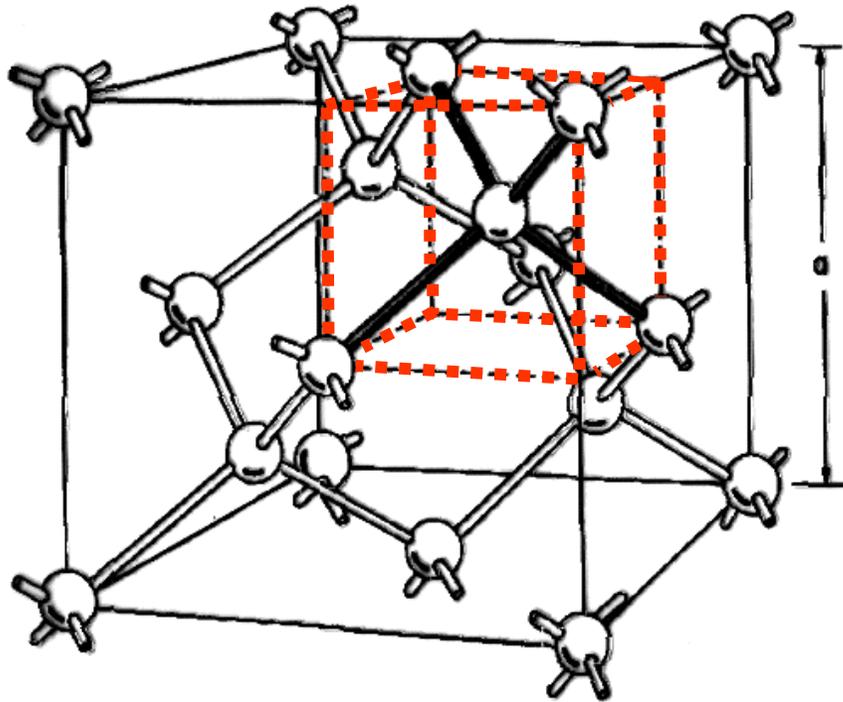
O Átomo



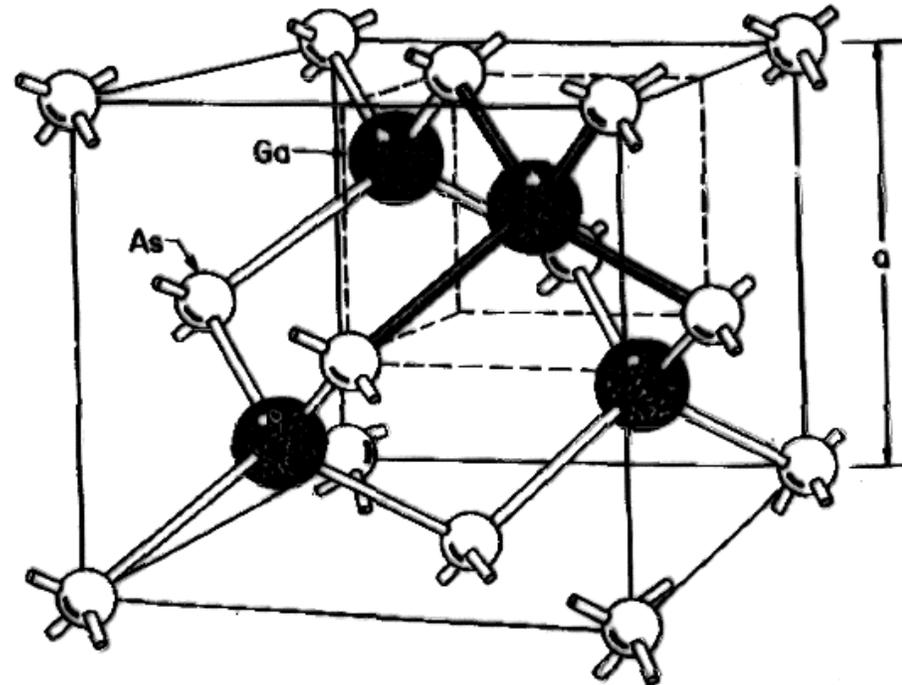
- Núcleo composto por nêutrons e prótons (+q) com massas iguais de $1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (1.700 vezes a massa do elétron). **O núcleo tem diâmetro de $\sim 10^{-14} \text{ cm}$**
- Uma nuvem de elétrons recobre o núcleo, **estendendo-se até $\sim 10^{-10} \text{ cm}$**
- O átomo é eletricamente neutro

Estrutura Cristalina

A estrutura do diamante (e dos principais materiais semicondutores)

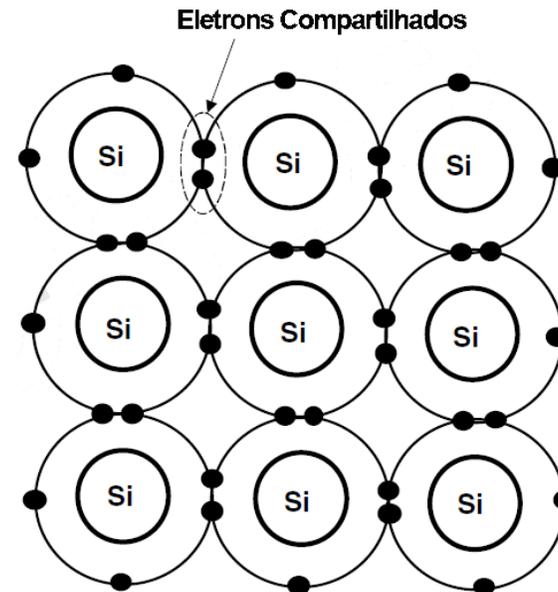
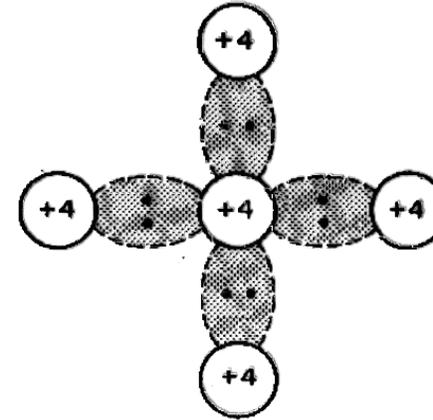
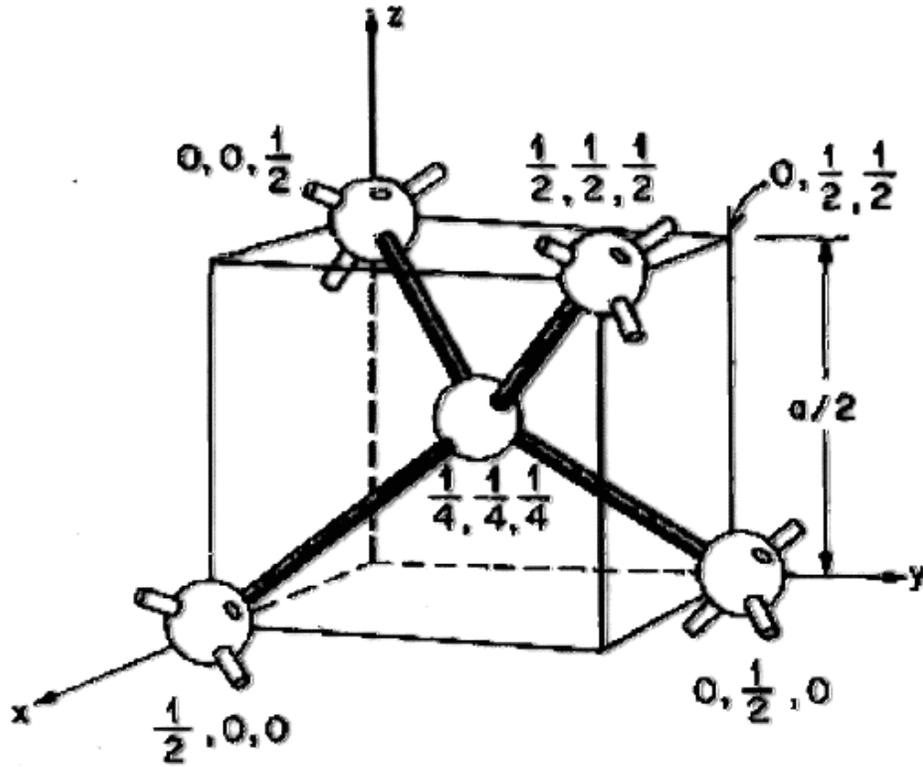


Silício ($a = 5,43 \text{ \AA}$)

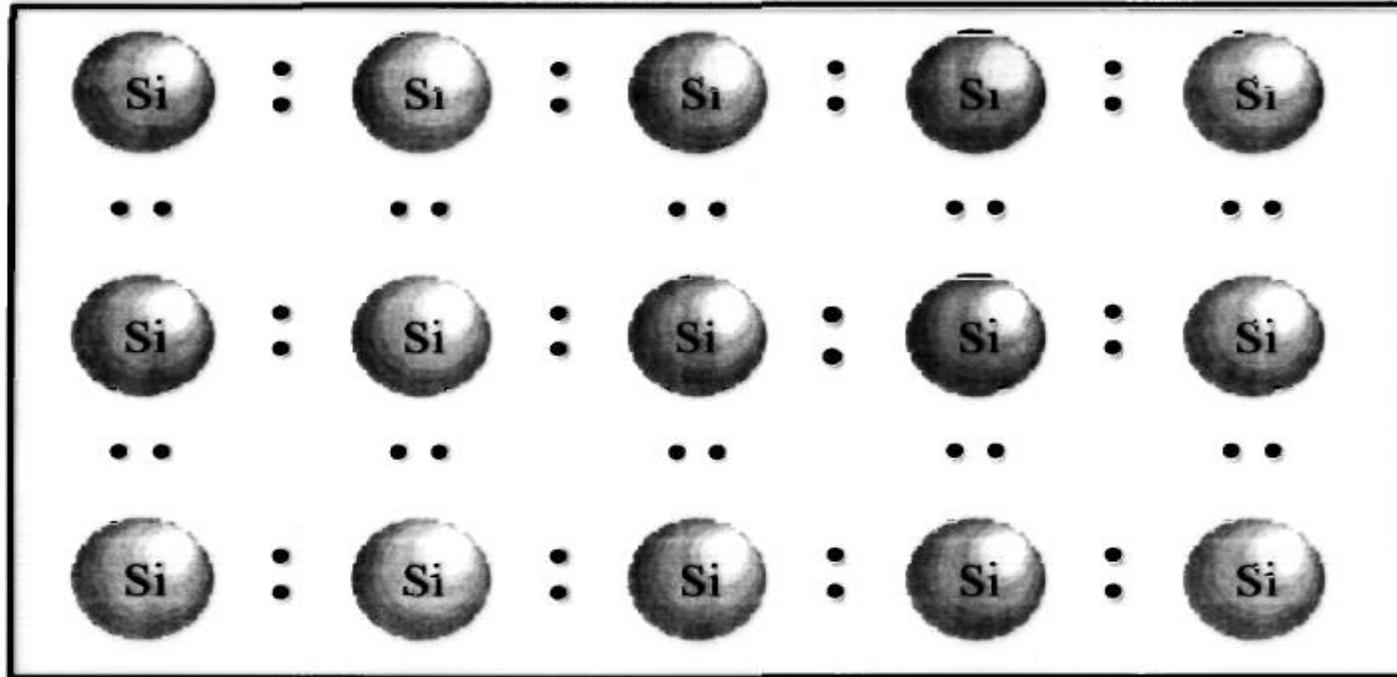


GaAs ($a = 5,63 \text{ \AA}$)

Estrutura Cristalina do Silício

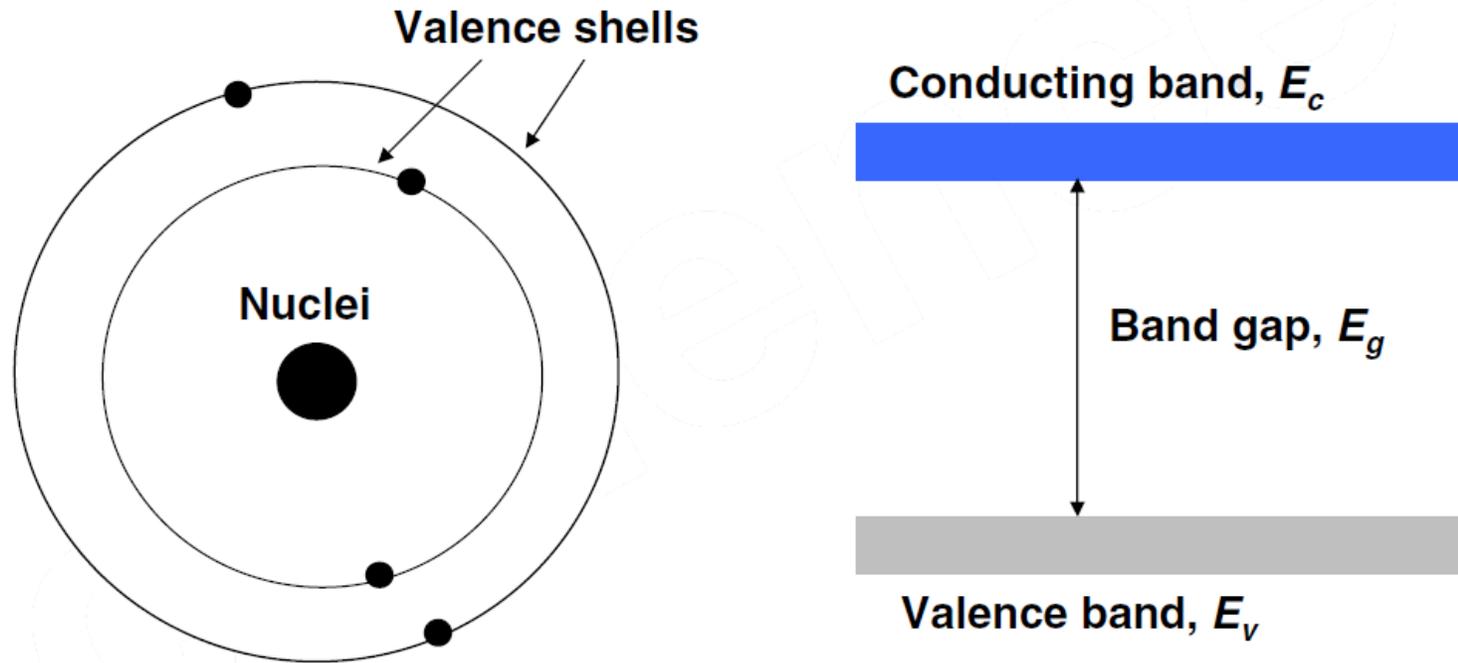


Utilizando uma representação bidimensional (simplificação), cada átomo de silício (4 elétrons na última camada) precisa de 4 ligações covalentes (4 átomos de Si) para atingir a estabilidade.



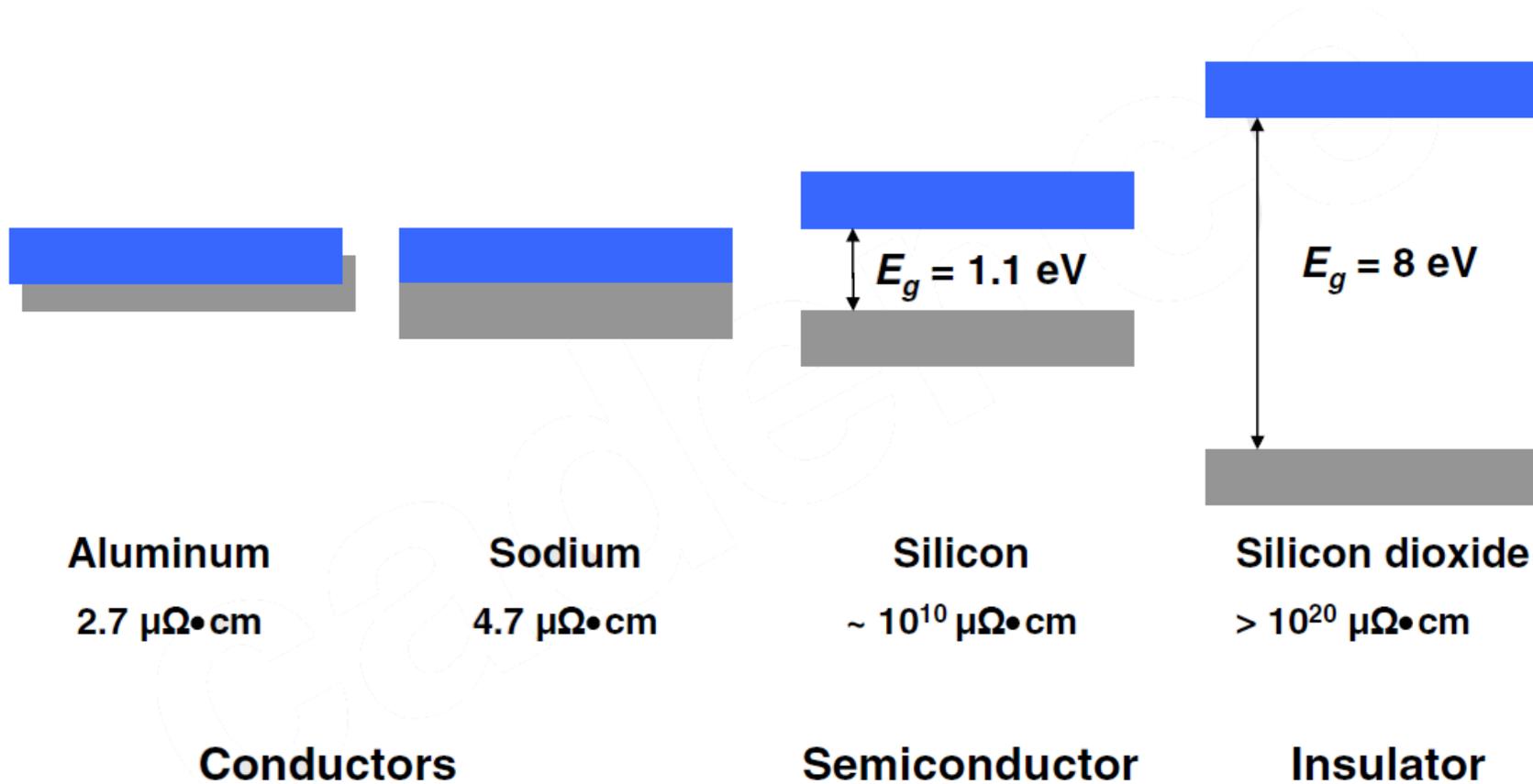
Em 0 Kelvin todos os elétrons estão presos em suas ligações covalentes

A Interpretação da Física de Estado Sólido

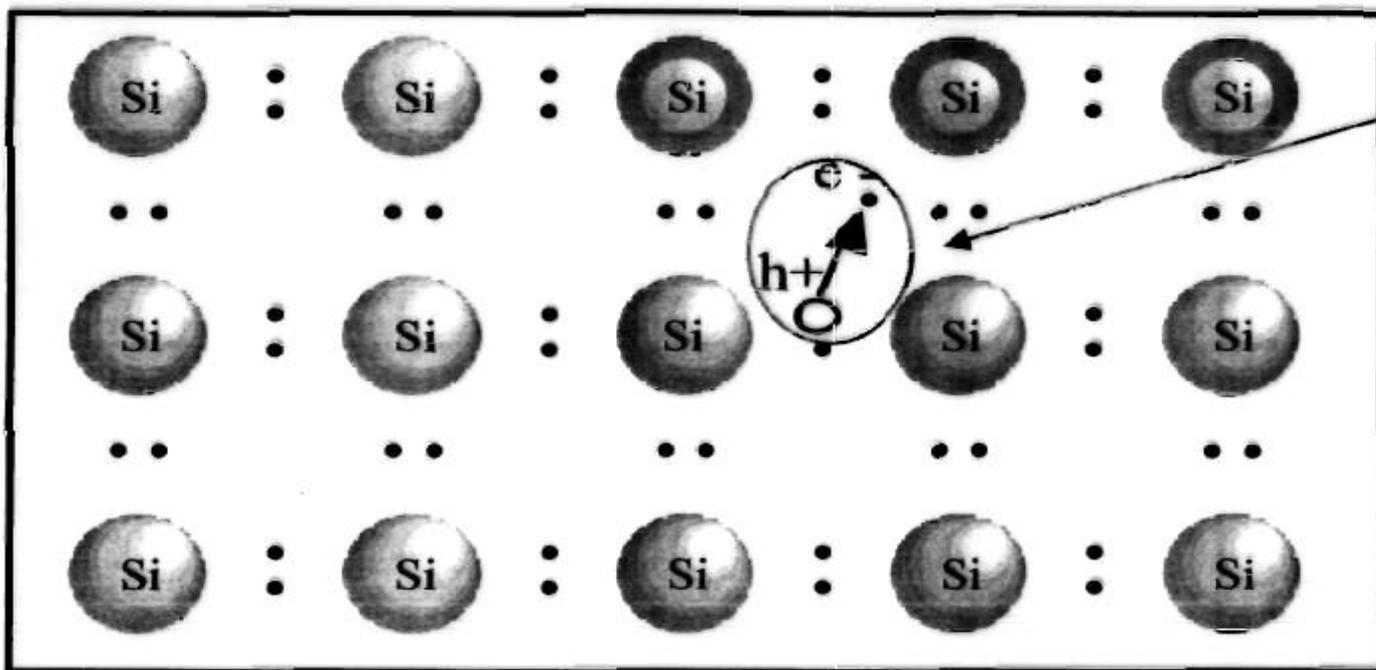


A Interpretação da Física de Estado Sólido

Porque um material é condutor, semicondutor ou isolante?



Em temperatura maior que 0 K (temperatura ambiente, por exemplo, $T = 300\text{ K}$), elétrons podem adquirir energia suficiente (ionização térmica) para escapar da ligação covalente.



Geração do par
Elétron(e^-)-lacuna(h^+)

n = conc. de elétrons
 p = conc. de lacunas

n_i = conc. intrínseca
 $n = p = n_i$

Neste processo, chamado de Geração de portadores, o elétron torna-se livre e deixa no seu lugar um buraco (lacuna) que também apresentará característica de portador de corrente.

Concentração Intrínseca

$$n_i(T) = [B \cdot T^3 \cdot e^{-E_G/kT}]^{1/2}$$

- B = parâmetro que depende do material
(B = $5,4 \times 10^{31} / \text{K}^3 \cdot \text{cm}^3$ para o silício)
- T = temperatura em Kelvin
- E_G = Energia mínima para quebrar uma ligação covalente
(1,12 eV para o silício)
- K = $8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

Para T = 300K qual o valor de n_i em cm^{-3} ?

Qual a densidade de átomos no silício monocristalino em cm^{-3} ?

Concentração Intrínseca

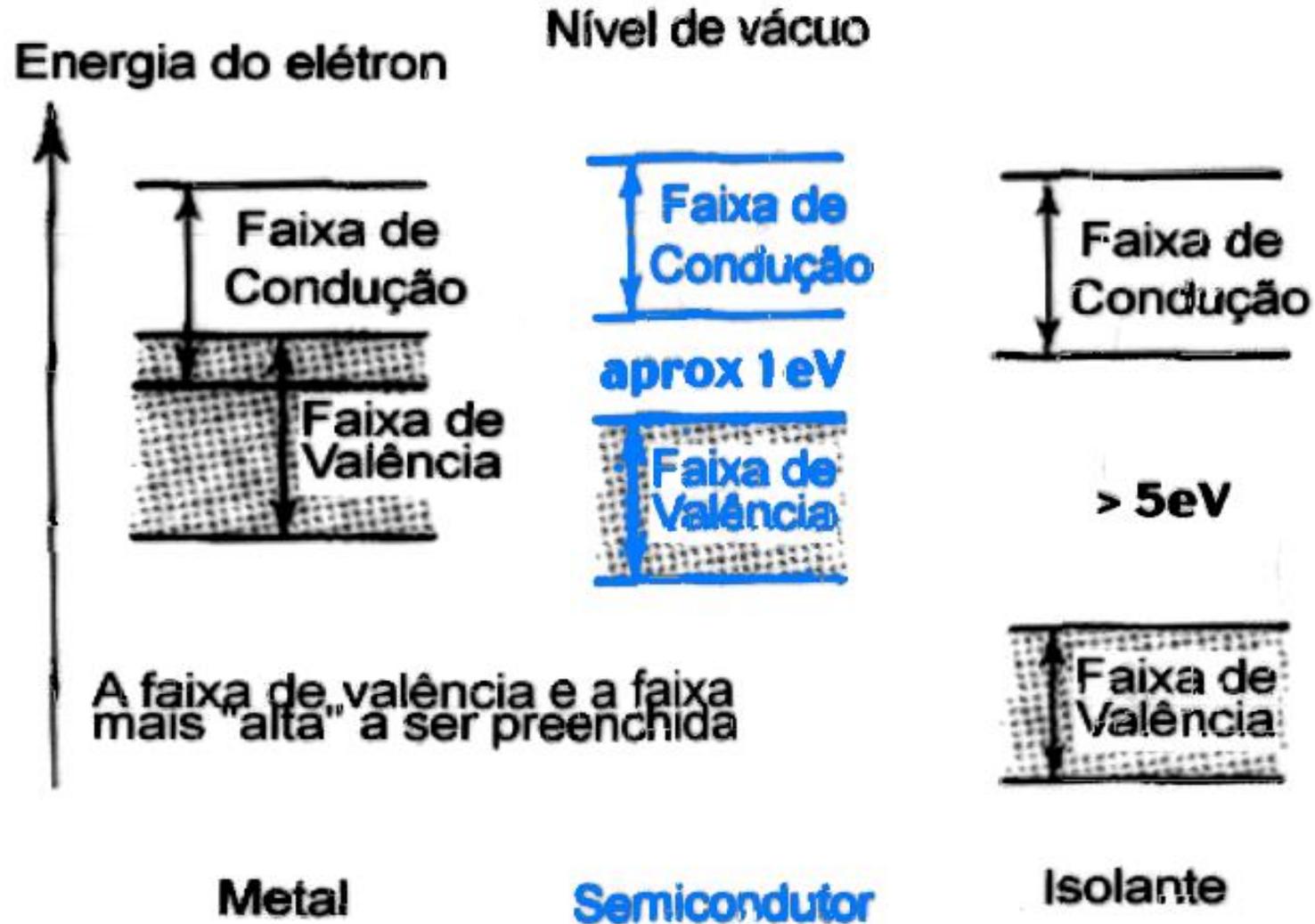
$$n_i(T) = [B \cdot T^3 \cdot e^{-E_G/kT}]^{1/2}$$

- B = parâmetro que depende do material
($B = 5,4 \times 10^{31} / \text{K}^3 \cdot \text{cm}^3$ para o silício)
- T = temperatura em Kelvin
- E_G = Energia mínima para quebrar uma ligação covalente
(1,12 eV para o silício)
- $K = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

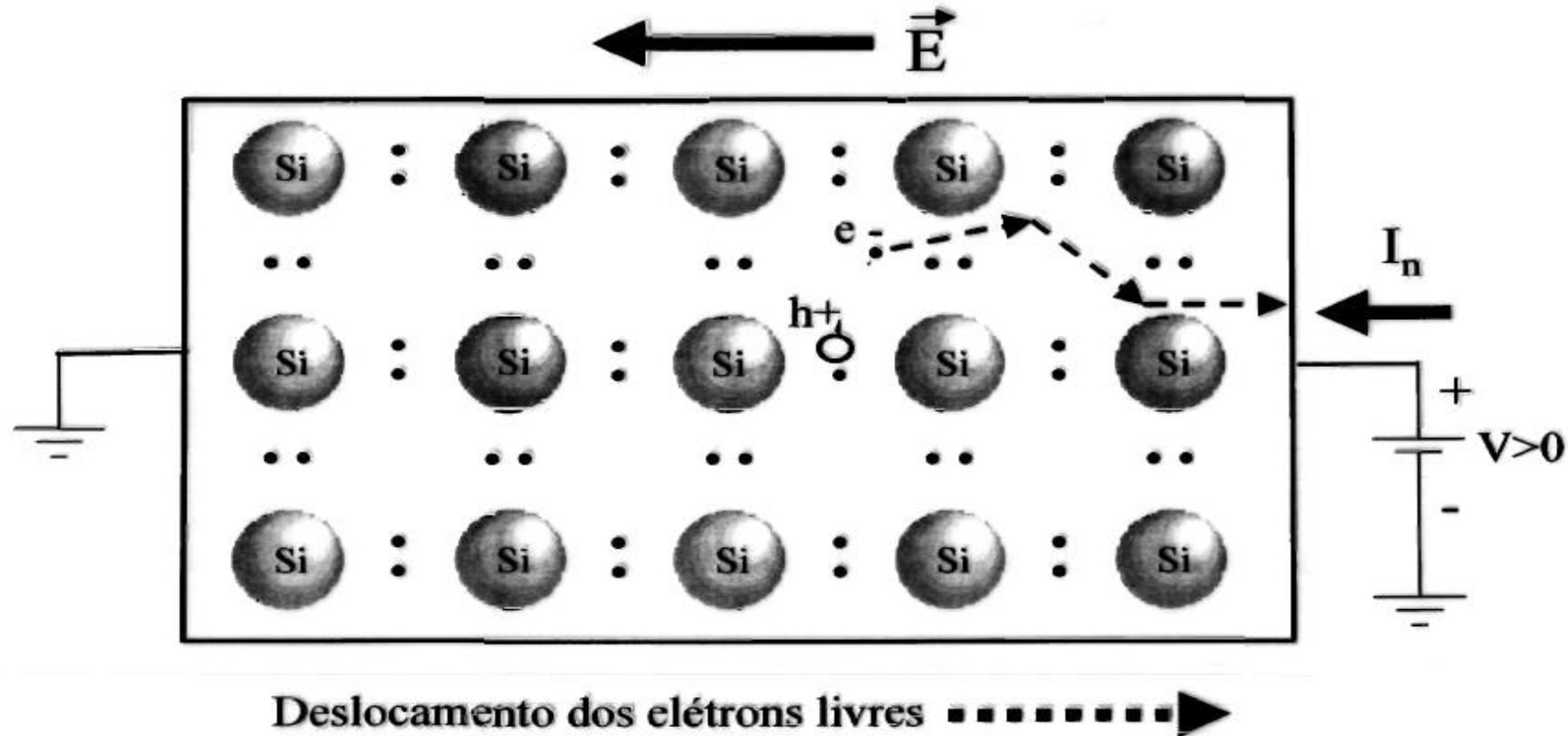
Exemplo: Para $T = 300 \text{ K} \rightarrow n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ portadores/cm}^3$, ou seja, $1,45 \cdot 10^{10} \text{ elétrons/cm}^3$ e $1,45 \cdot 10^{10} \text{ lacunas/cm}^3$, já que no silício intrínseco $n = p = n_i$

Lembrar que o silício tem $5 \cdot 10^{22}$ átomos de silício/cm³

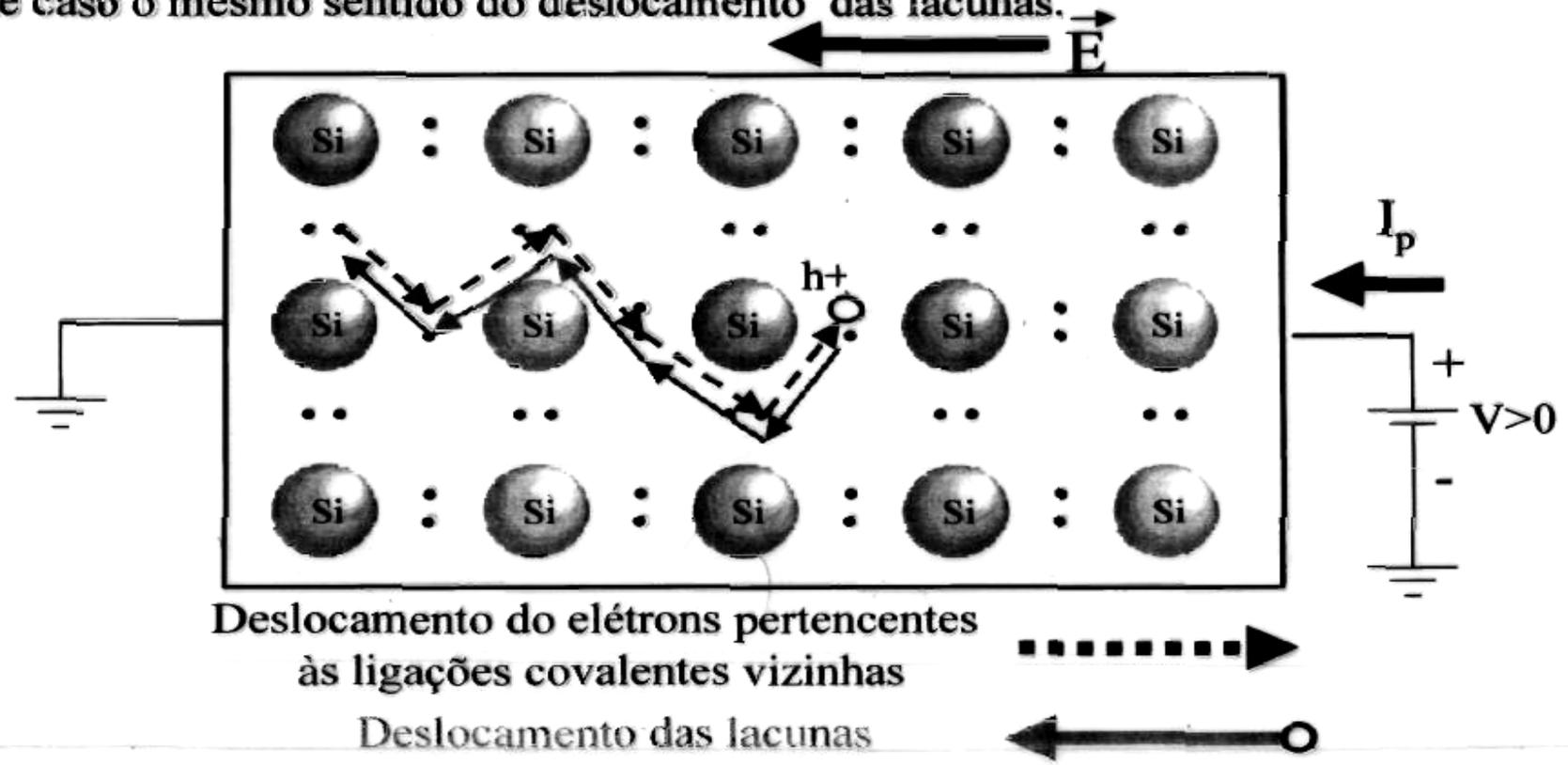
Porque um material é condutor, semicondutor ou isolante?



O elétron gerado encontra-se livre para se deslocar dentro do silício. Por exemplo, se for aplicada uma tensão como indicada abaixo, o campo elétrico induzirá o deslocamento dos elétrons no sentido inverso ao do campo elétrico. A corrente convencional associada (I_n), porém, terá o mesmo sentido do campo elétrico, como de praxe.

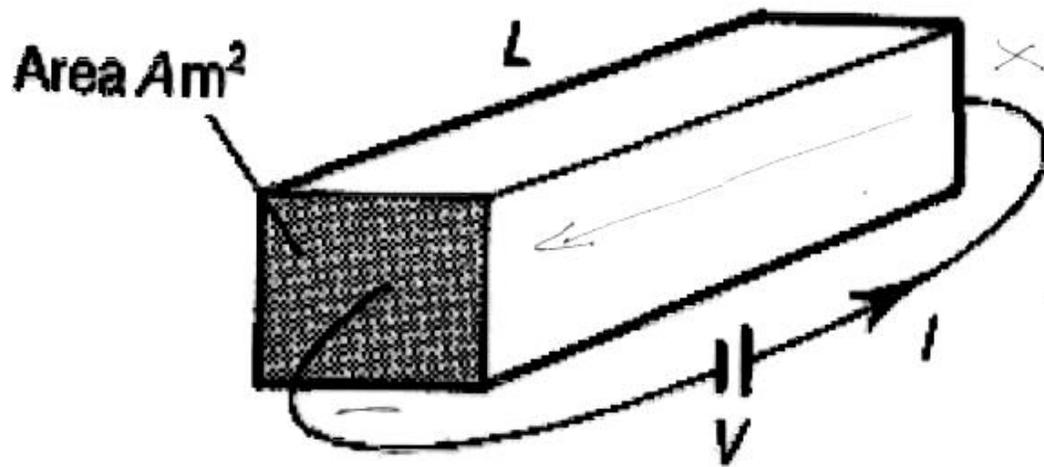


A lacuna gerada pode ser ocupada por um outro elétron vizinho (também pertencente a uma ligação covalente), que por sua vez deixará uma lacuna no seu lugar e assim sucessivamente. Por exemplo, se for aplicada uma tensão como indicada abaixo, o campo elétrico induzirá o deslocamento dos elétrons pertencentes as ligações covalentes no sentido inverso ao do campo elétrico. O processo também pode ser visto como o deslocamento de lacunas no mesmo sentido do campo elétrico, com carga positiva de carga equivalente a do elétron em módulo. A corrente convencional associada (I_p) terá neste caso o mesmo sentido do deslocamento das lacunas.



Revisitando a Lei de Ohm

Suponha uma barra de material condutor ou semiconductor homogêneo (com características uniformes) de resistividade ρ_e ($\Omega \cdot m$), comprimento L (m) e seção A (m^2), submetido a um campo elétrico E :



A corrente que circula por ele é dada por: $I = \frac{V}{R} = \frac{V A}{\rho_e L}$

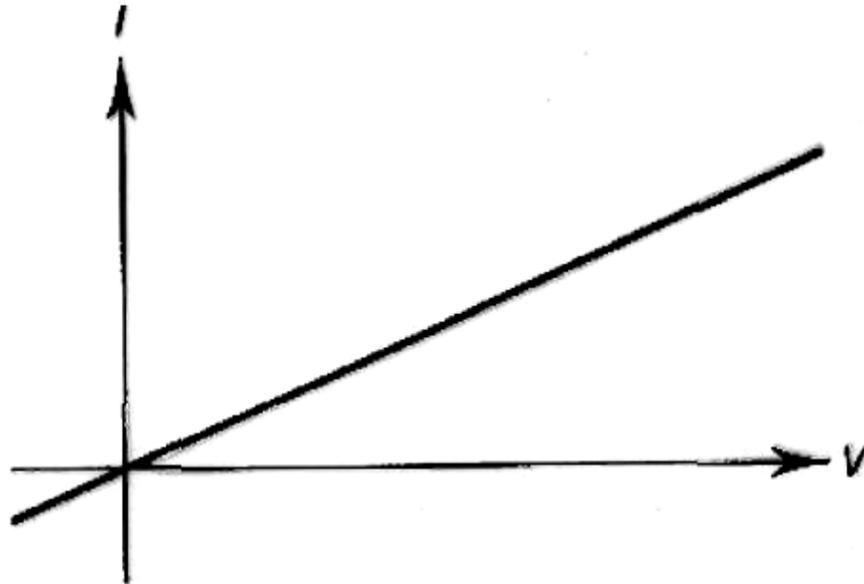
Podemos reescrever essa relação de outra forma:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{VA}{\rho_e L}$$

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho_e} \frac{V}{L} \quad [\text{A/m}^2]$$

ou

$$J = \sigma \times E \quad [\text{A/m}^2]$$



Materiais para Eletrônica

Resistividade elétrica:

$$\rho_e \text{ em } [\Omega.m]$$

$\rho_e \neq \rho(z) \rightarrow$ dens. de cargas

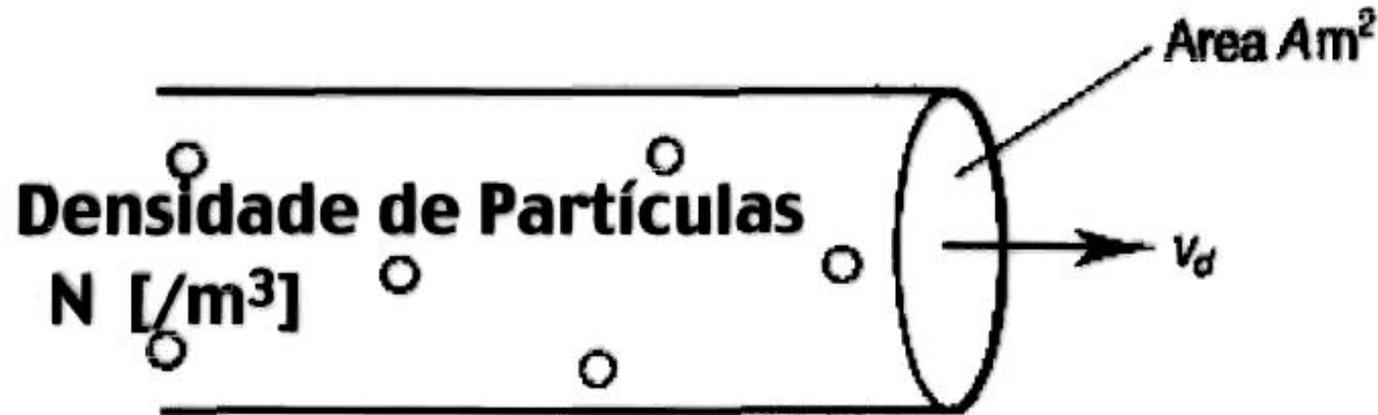
Condutividade elétrica:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_e} \quad [1/(\Omega.m)]$$

Velocidade de Deriva

$$I, V \rightleftharpoons J, E$$

Vamos olhar melhor para σ :



Número de partículas em 1 m de tubo: $N.A$ [m^{-1}]

Número de partículas em um

determinado ponto/segundo : $N.A.v_d$ [s^{-1}]

em cargas por segundo: $Q.N.A.v_d$ [A]

ou, em outras palavras:

$$J = Q.N.v_d \text{ [A/m}^2\text{]}$$

A velocidade v_d é conhecida como velocidade de deriva.

Ela se aplica a qualquer material e situação onde pode-se definir uma certa densidade de partículas móveis e uma velocidade MÉDIA pode ser definida.

Condutividade e Mobilidade

Concluimos que:

$$\mathbf{J = \sigma \times E \quad [A/m^2]}$$

$$\mathbf{J = Q.N.v_d \quad [A/m^2]}$$

Logo:

$$\mathbf{v_d = constante \times E}$$

Essa constante, $\sigma / Q.N$, é conhecida como MOBILIDADE μ [$m^2/V.s$]

Podemos reescrever J como:

$$\mathbf{J = Q.N.\mu.E \quad [A/m^2]}$$

E a condutividade como:

$$\mathbf{\sigma = Q.N.\mu \quad [\Omega/m]}$$

Atividade Condutividade e Mobilidade

Dado que $\sigma = Q.N.\mu$, qual o valor de ρ para um material semiconductor que tem lacunas p e elétrons livres n?

a)
$$\frac{1}{q(n+p)\mu}$$

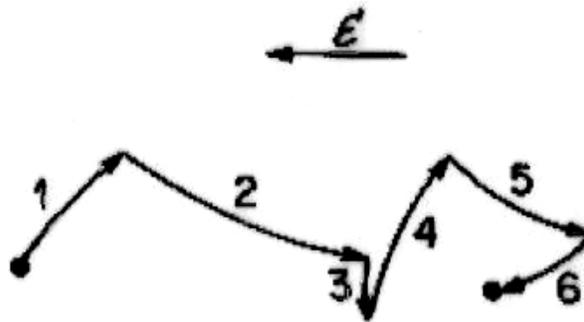
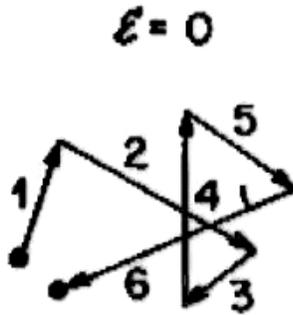
b)
$$\frac{1}{q(-n.\mu_n + p\mu_p)}$$

c)
$$\frac{1}{q(n.\mu_n - p\mu_p)}$$

d)
$$\frac{1}{q(n.\mu_n + p\mu_p)}$$

e) Não tenho certeza

Velocidade de Deriva e Velocidade Térmica



$$v_{th} = \left(\frac{8kT}{\pi M} \right)^{1/2} \text{ [m/s]}$$

10^5 m/s a 300K

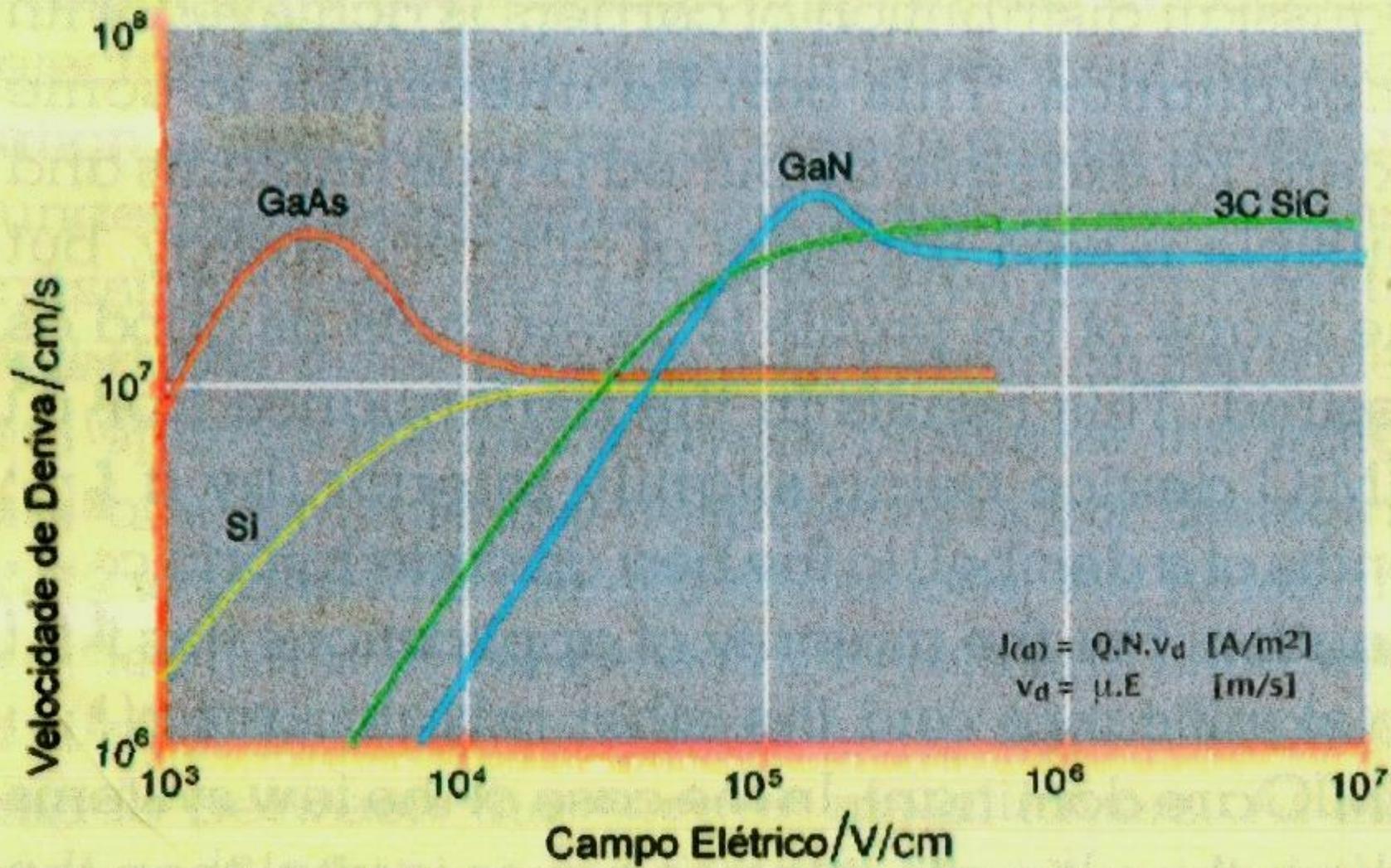
ou 0,026 eV

para elétrons em Si

$$\mu \cong 0,1 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$$

$$v_d = \mu \times E$$

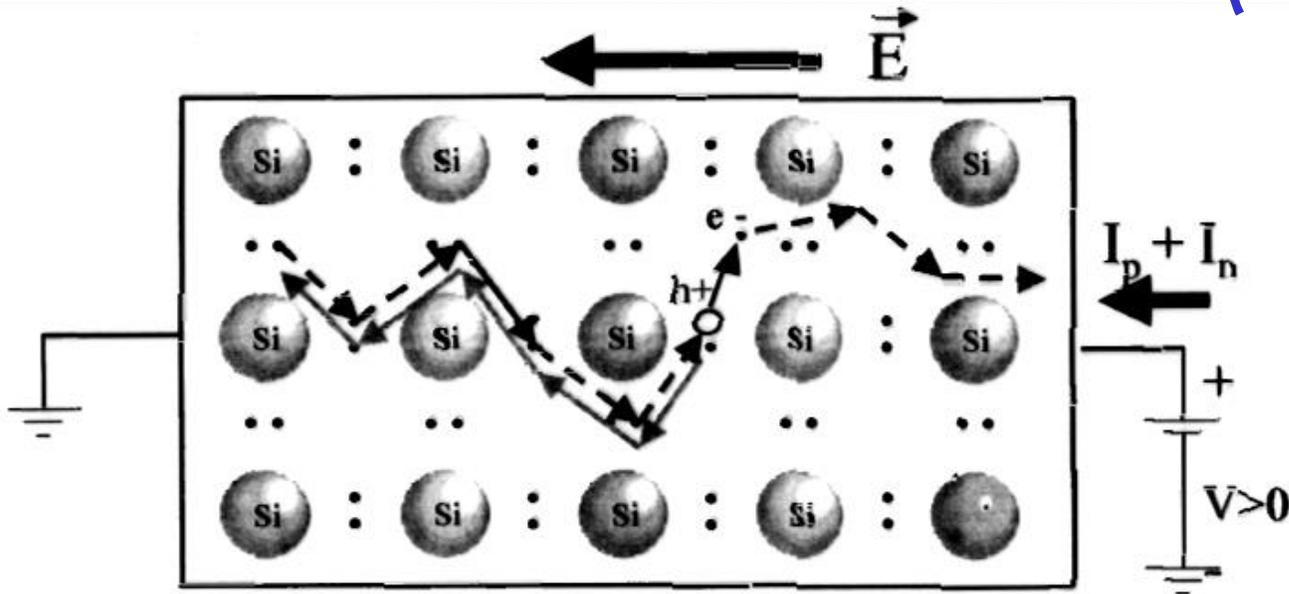
$$v_d \ll v_{th}$$



Velocidade de deriva dos elétrons para arseneto de gálio, silício, nitreto de gálio e carbeto de silício

GEC REVIEW, VOL. 13, NO. 2, 1998

Mecanismos de Condução de Corrente em Semicondutores: Deriva (Drift)



Resistividade:

$$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$$

μ_p e μ_n = mobilidade das lacunas e elétrons respectivamente.

$$(\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}, \mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$$

Relação de Einstein:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$$

$$v_{p\text{-der}} = \mu_p E$$

$$v_{n\text{-der}} = \mu_n E$$

$$J_{p\text{-der}} = qp\mu_p E$$

$$J_{n\text{-der}} = qn\mu_n E$$

$$I_{p\text{-der}} = q \cdot A \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

$$I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

$$I_{T\text{-der}} = I_{p\text{-der}} + I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot E \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$