



## CAPITULO 3

# Aula 14

Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.  
(Cap. 3 p. 117-121)

# Eletrônica I – PSI3321

## Programação para a Segunda Prova

|                 |       |                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |                       |
|-----------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| 10 <sup>a</sup> | 07/04 | Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro.                                                                                                                                                                      | Sedra, Cap. 3<br>p. 109-111                  |                       |
| 12 <sup>a</sup> | 02/05 | Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).                                                                                                                                                                      | Sedra, Cap. 3<br>p. 112-115                  | Teste 06<br>9h20-9h35 |
| 13 <sup>a</sup> | 05/05 | Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28.                                                                                                                                                                       | Sedra, Cap. 3<br>p. 115-118                  |                       |
| 14 <sup>a</sup> | 09/05 | Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.                                                                                                                                         | Aula avulsa +<br>Sedra, Cap. 3<br>p. 117-121 | Teste 07<br>9h20-9h35 |
| 15 <sup>a</sup> | 12/05 | Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios.                                                                                                                                      | Aula avulsa +<br>Sedra, Cap. 3<br>p. 121-126 |                       |
| 16 <sup>a</sup> | 16/05 | Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios.                                                                                                                  | Aula avulsa +<br>Sedra, Cap. 3<br>p. 127-128 | Teste 08<br>9h20-9h35 |
| 17 <sup>a</sup> | 19/05 | Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção. a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.                                                                        | Sedra, Cap. 3<br>p. 124-125                  |                       |
| 18 <sup>a</sup> | 23/05 | A junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.                                                                                                                                                                                  | Sedra, Cap. 3<br>p. 128-129                  | Teste 09<br>9h20-9h35 |
| 19 <sup>a</sup> | 26/05 | Estruturas e símbolos dos transistores bipolares de junção, definição dos modos de operação (corte, ativo, saturação) do TBJ, operação do transistor npn no modo ativo (polarização e distribuição de portadores minoritários).                                  | Sedra, Cap. 5<br>p. 235-238                  |                       |
| 20 <sup>a</sup> | 30/05 | Equações das correntes no transistor (definição do ganho de corrente em emissor comum - $\beta$ - e do ganho de corrente em base comum - $\alpha$ ), modelos de circuitos equivalentes para grandes sinais do transistor npn operando no modo ativo, exercícios. | Sedra, Cap. 5<br>p. 239-243.                 | Teste 10<br>9h20-9h35 |

# Eletrônica I – PSI3321

## Programação para a Segunda Prova (cont.)

|                                                        |       |                                                                                                                                                                                 |                                              |                       |
|--------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| 21 <sup>a</sup>                                        | 02/06 | Análise cc de circuitos com transistores, exercícios selecionados: 5.1, 5.4, 5.10.                                                                                              | Sedra, Cap. 5<br>p. 246 + 264-269            |                       |
| 22 <sup>a</sup>                                        | 06/06 | O TBJ como amplificador para pequenos sinais<br>(as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)                                                                 | Sedra, Cap. 5,<br>p. 263-264;<br>p. 275-276. | Teste 11<br>9h20-9h35 |
| 23 <sup>a</sup>                                        | 09/06 | A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão,<br>Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos $\pi$ -híbrido e T) | Sedra, Cap. 5,<br>p. 276-279                 |                       |
| 24 <sup>a</sup>                                        | 13/06 | Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early. O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43                                                       | Sedra, Cap. 5<br>p. 290-293                  | Teste 12<br>9h20-9h35 |
| 25 <sup>a</sup>                                        | 20/06 | O amplificador emissor comum com resistência de emissor                                                                                                                         | Sedra, Cap. 5<br>p.293-295                   | Teste 13<br>9h20-9h35 |
| 26 <sup>a</sup>                                        | 23/06 | O amplificador base comum (BC)                                                                                                                                                  | Sedra, Cap. 5<br>p. 296-297                  |                       |
| 27 <sup>a</sup>                                        | 27/06 | O amplificador coletor comum (CC)                                                                                                                                               | Sedra, Cap. 5<br>p. 297-302                  | Teste 14<br>9h20-9h35 |
| 28 <sup>a</sup>                                        | 30/06 | Aula de Exercícios                                                                                                                                                              |                                              |                       |
| 2 <sup>a</sup> . Semana de Provas (01/07 a 07/07/2017) |       |                                                                                                                                                                                 |                                              |                       |
| Data: xx/xx/2017 (xxxx-feira) – Horário: xx:xxhs       |       |                                                                                                                                                                                 |                                              |                       |

# 14ª Aula:

## Silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva)

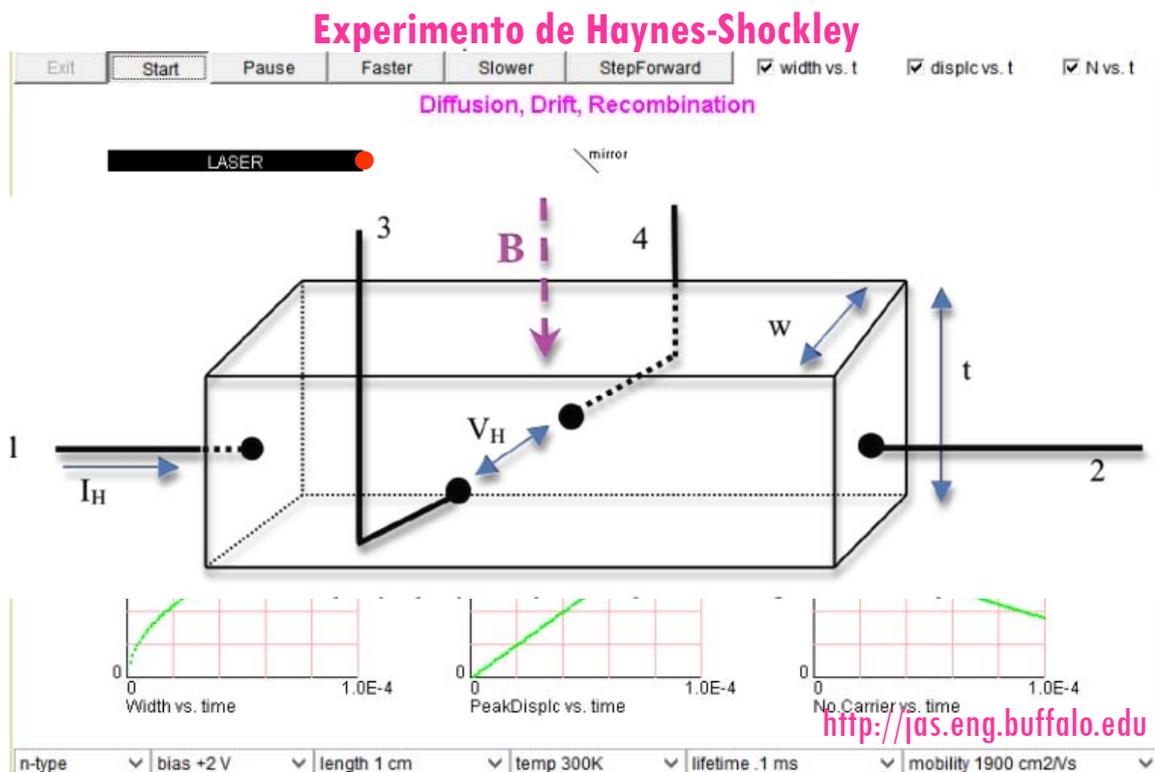
**Ao final desta aula você deverá estar apto a:**

- 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

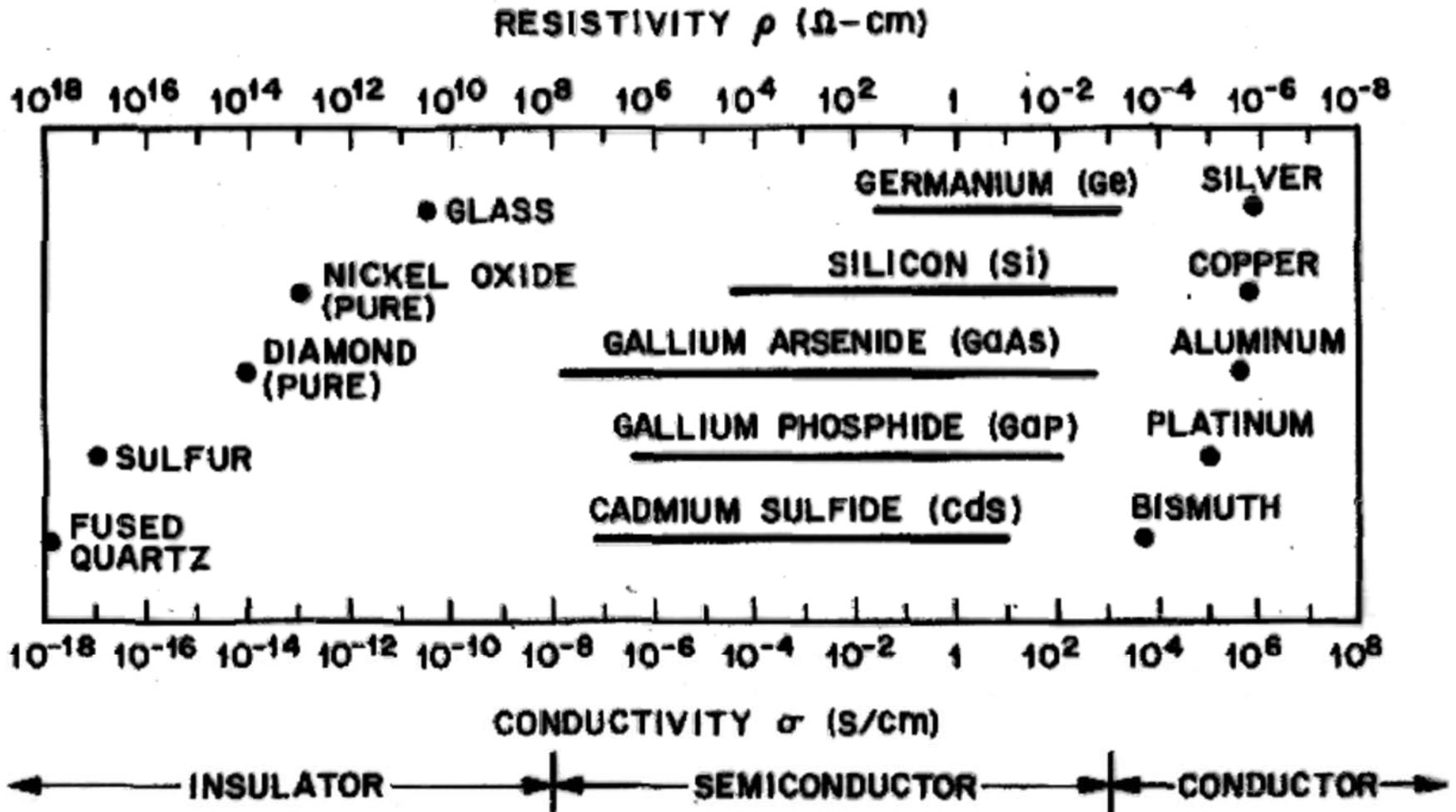
A resistividade de um semicondutor é sensível à:

- 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

# Materiais para Semicondutores

|                                |                                 |                                 |                                |                                |                                 |                                 |                                 |                               |                                |                              |                               |                                |                                |                                 |                                 |                                |                              |                           |                            |                              |                            |                              |                            |     |       |        |    |     |  |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----|-------|--------|----|-----|--|
| IA                             |                                 |                                 |                                |                                |                                 |                                 |                                 |                               |                                |                              |                               |                                |                                |                                 |                                 |                                |                              |                           |                            | VIIIA                        |                            |                              |                            |     |       |        |    |     |  |
| 1<br>1.008<br>H<br>Hydrogen    | IIA                             |                                 |                                |                                |                                 |                                 |                                 |                               |                                |                              |                               |                                |                                |                                 |                                 |                                |                              | 5<br>10.811<br>B<br>Boron | 6<br>12.011<br>C<br>Carbon | 7<br>14.007<br>N<br>Nitrogen | 8<br>15.999<br>O<br>Oxygen | 9<br>18.998<br>F<br>Fluorine | 10<br>20.183<br>Ne<br>Neon |     |       |        |    |     |  |
| 3<br>6.939<br>Li<br>Lithium    | 4<br>9.012<br>Be<br>Beryllium   | Transition Metals               |                                |                                |                                 |                                 |                                 |                               |                                |                              |                               | 13<br>26.981<br>Al<br>Aluminum | 14<br>28.085<br>Si<br>Silicon  | 15<br>30.974<br>P<br>Phosphorus | 16<br>32.064<br>S<br>Sulfur     | 17<br>35.453<br>Cl<br>Chlorine | 18<br>39.948<br>Ar<br>Argon  |                           |                            |                              |                            |                              |                            |     |       |        |    |     |  |
| 11<br>22.989<br>Na<br>Sodium   | 12<br>24.312<br>Mg<br>Magnesium |                                 |                                |                                |                                 |                                 |                                 |                               |                                |                              |                               | IIIB                           |                                |                                 |                                 |                                |                              |                           |                            |                              |                            | IVB                          | VB                         | VIB | VII B | VIII B | IB | IIB |  |
| 19<br>39.102<br>K<br>Potassium | 20<br>40.08<br>Ca<br>Calcium    | 21<br>44.956<br>Sc<br>Scandium  | 22<br>47.90<br>Ti<br>Titanium  | 23<br>50.942<br>V<br>Vanadium  | 24<br>51.996<br>Cr<br>Chromium  | 25<br>54.938<br>Mn<br>Manganese | 26<br>55.847<br>Fe<br>Iron      | 27<br>58.933<br>Co<br>Cobalt  | 28<br>58.71<br>Ni<br>Nickel    | 29<br>63.54<br>Cu<br>Copper  | 30<br>65.37<br>Zn<br>Zinc     | 31<br>69.72<br>Ga<br>Gallium   | 32<br>72.59<br>Ge<br>Germanium | 33<br>74.922<br>As<br>Arsenic   | 34<br>78.96<br>Se<br>Selenium   | 35<br>79.909<br>Br<br>Bromine  | 36<br>83.90<br>Kr<br>Krypton |                           |                            |                              |                            |                              |                            |     |       |        |    |     |  |
| 37<br>85.47<br>Rb<br>Rubidium  | 38<br>87.62<br>Sr<br>Strontium  | 39<br>88.905<br>Y<br>Yttrium    | 40<br>91.22<br>Zr<br>Zirconium | 41<br>92.906<br>Nb<br>Niobium  | 42<br>95.94<br>Mo<br>Molybdenum | 43<br>99<br>Tc<br>Technetium    | 44<br>101.07<br>Ru<br>Ruthenium | 45<br>102.91<br>Rh<br>Rhodium | 46<br>106.4<br>Pd<br>Palladium | 47<br>107.87<br>Ag<br>Silver | 48<br>112.40<br>Cd<br>Cadmium | 49<br>114.82<br>In<br>Indium   | 50<br>118.69<br>Sn<br>Tin      | 51<br>121.75<br>Sb<br>Antimony  | 52<br>127.60<br>Te<br>Tellurium | 53<br>126.904<br>I<br>Iodine   | 54<br>131.30<br>Xe<br>Xenon  |                           |                            |                              |                            |                              |                            |     |       |        |    |     |  |
| 55<br>132.90<br>Cs<br>Cesium   | 56<br>137.34<br>Ba<br>Barium    | 57<br>138.91<br>La<br>Lanthanum | 72<br>178.49<br>Hf<br>Hafnium  | 73<br>180.95<br>Ta<br>Tantalum | 74<br>183.85<br>W<br>Tungsten   | 75<br>186.2<br>Re<br>Rhenium    | 76<br>190.2<br>Os<br>Osmium     | 77<br>192.2<br>Ir<br>Iridium  | 78<br>195.09<br>Pt<br>Platinum | 79<br>196.967<br>Au<br>Gold  | 80<br>200.59<br>Hg<br>Mercury | 81<br>204.37<br>Tl<br>Thallium | 82<br>207.19<br>Pb<br>Lead     | 83<br>208.96<br>Bi<br>Bismuth   | 84<br>210<br>Po<br>Polonium     | 85<br>210<br>At<br>Astatine    | 86<br>222<br>Rn<br>Radon     |                           |                            |                              |                            |                              |                            |     |       |        |    |     |  |
| 87<br>223<br>Fr<br>Francium    | 88<br>226<br>Ra<br>Radium       | 89<br>227<br>Ac<br>Actinium     | 104<br>Rf                      | 105<br>Ha                      | 106<br>Sg                       | 107<br>Uns                      | 108<br>Uno                      | 109<br>Une                    | 110<br>Uun                     |                              |                               |                                |                                |                                 |                                 |                                |                              |                           |                            |                              |                            |                              |                            |     |       |        |    |     |  |

↑ Nonmetals

↑ Metalloids (semimetals)

Lanthanides

Actinides

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

# Materials para Semicondutores

**Table 1** Portion of the Periodic Table Related to Semiconductors

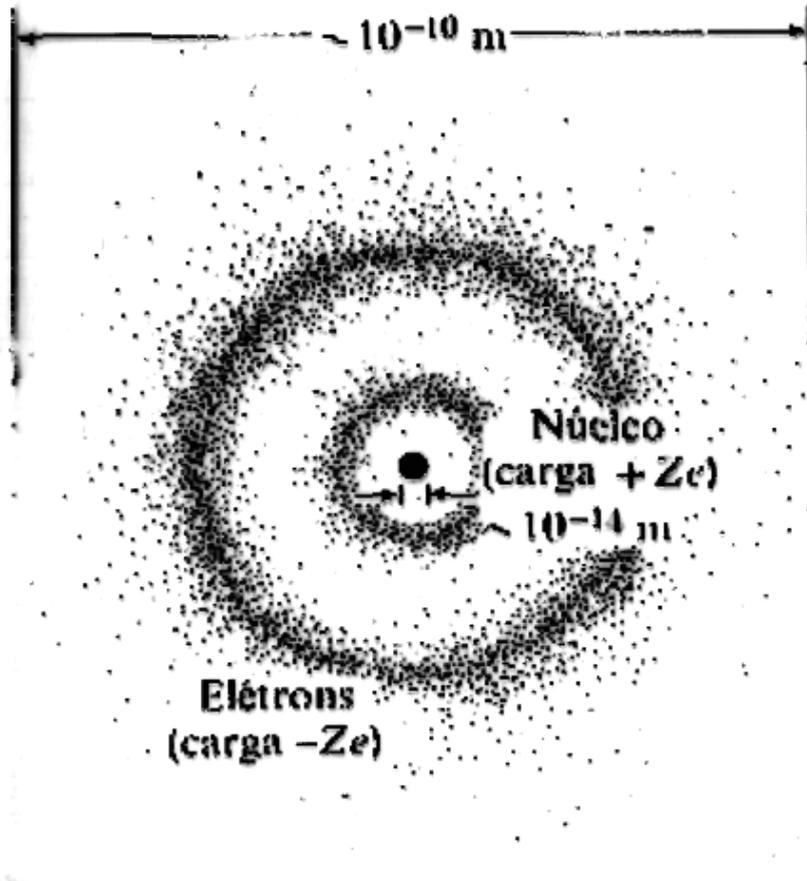
| Period | Column II       | III            | IV              | V               | VI              |
|--------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2      |                 | B<br>Boron     | C<br>Carbon     | N<br>Nitrogen   |                 |
|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

# Materials para Semicondutores

**Table 2** Element and Compound Semiconductors

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

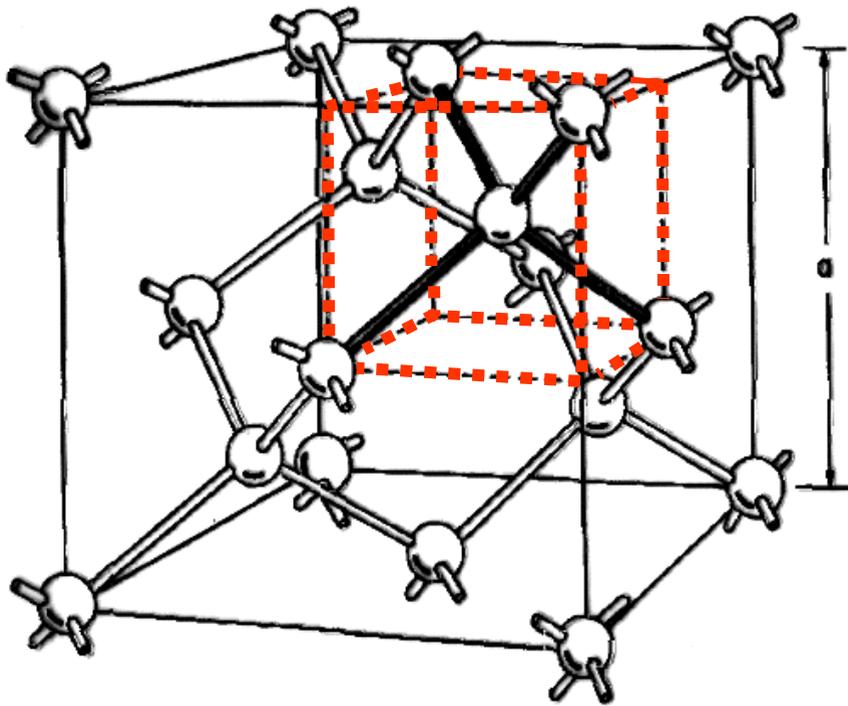
# O Átomo



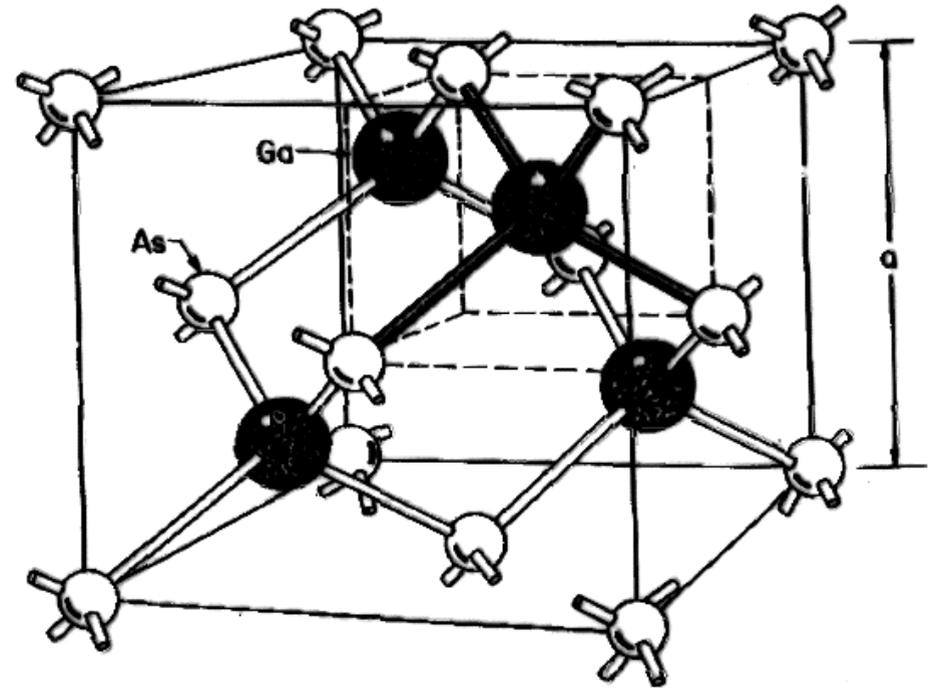
- Núcleo composto por nêutrons e prótons (+q) com massas iguais de  $1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$  (1.700 vezes a massa do elétron). O núcleo tem diâmetro de  $\sim 10^{-14} \text{ cm}$
- Uma nuvem de elétrons recobre o núcleo, estendendo-se até  $\sim 10^{-10} \text{ cm}$
- O átomo é eletricamente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

# Estrutura Cristalina

A estrutura do diamante (e dos principais materiais semicondutores)

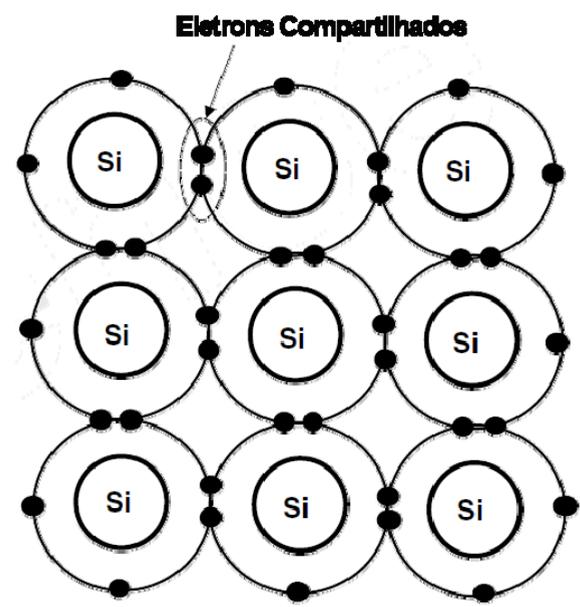
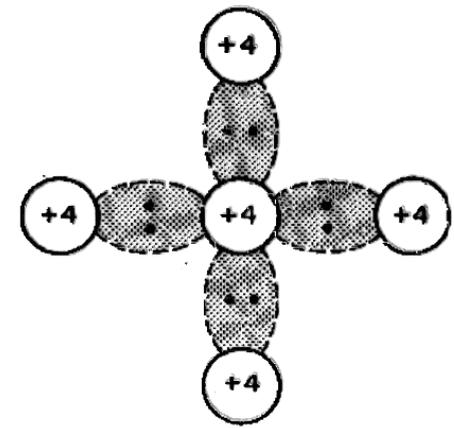
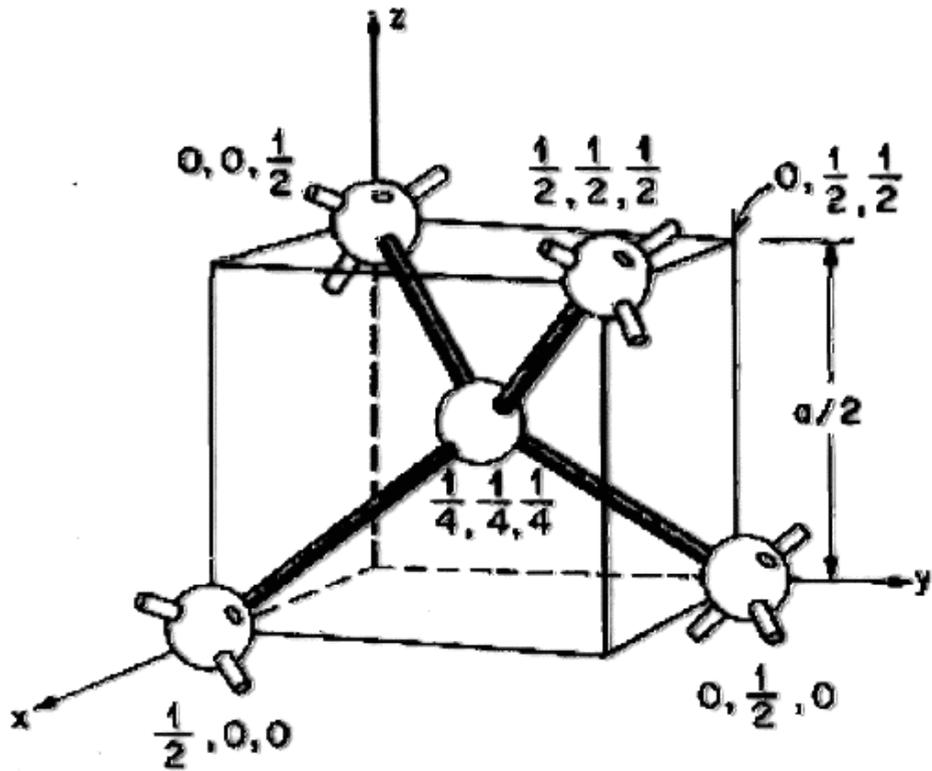


Silício ( $a = 5,43 \text{ \AA}$ )

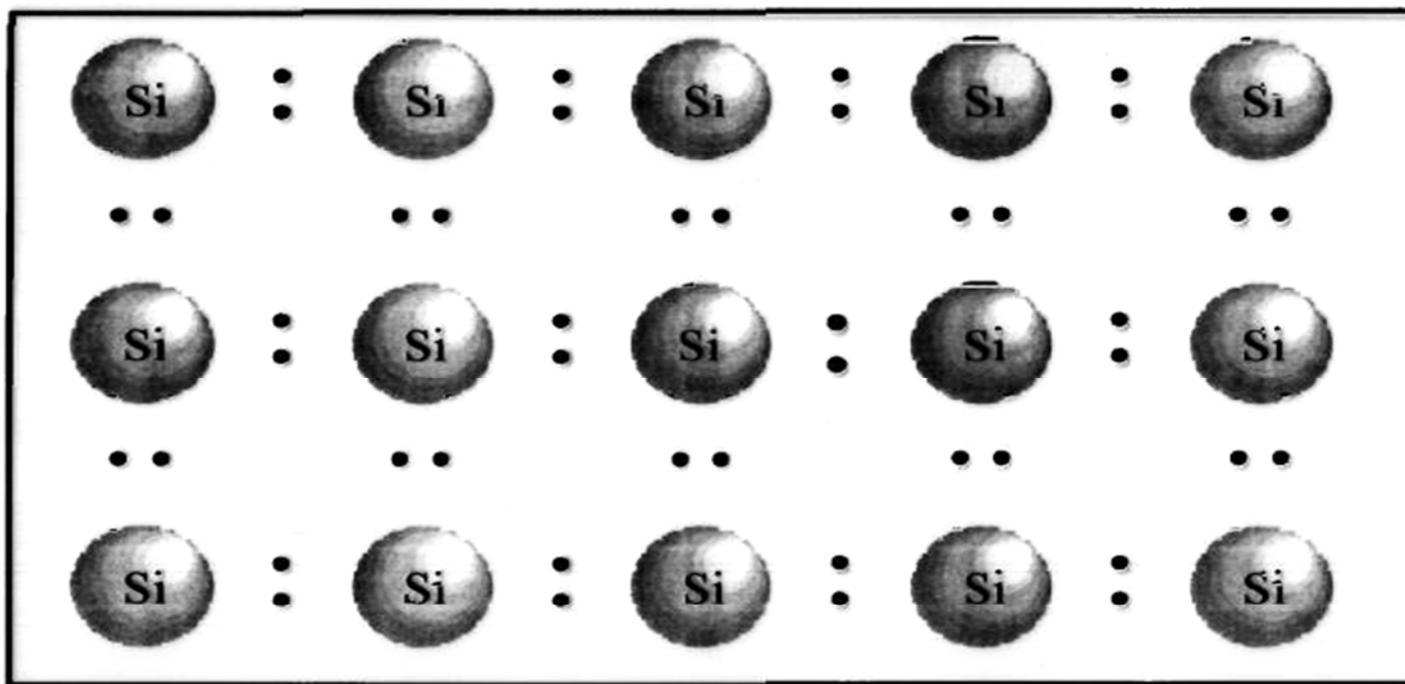


GaAs ( $a = 5,63 \text{ \AA}$ )

# Estrutura Cristalina do Silício

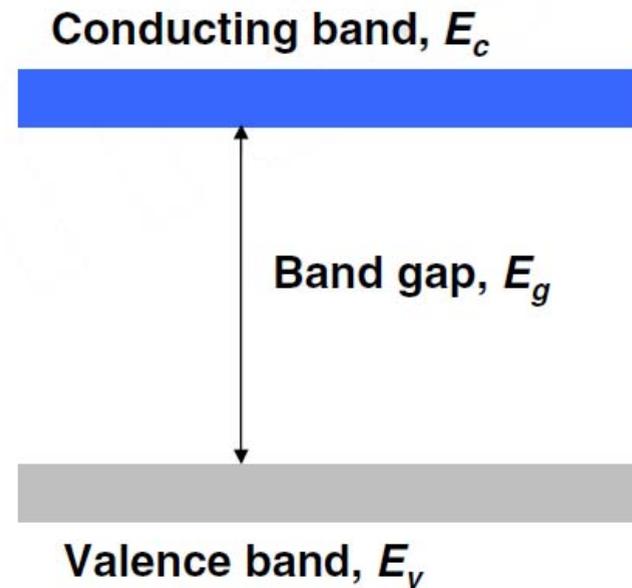
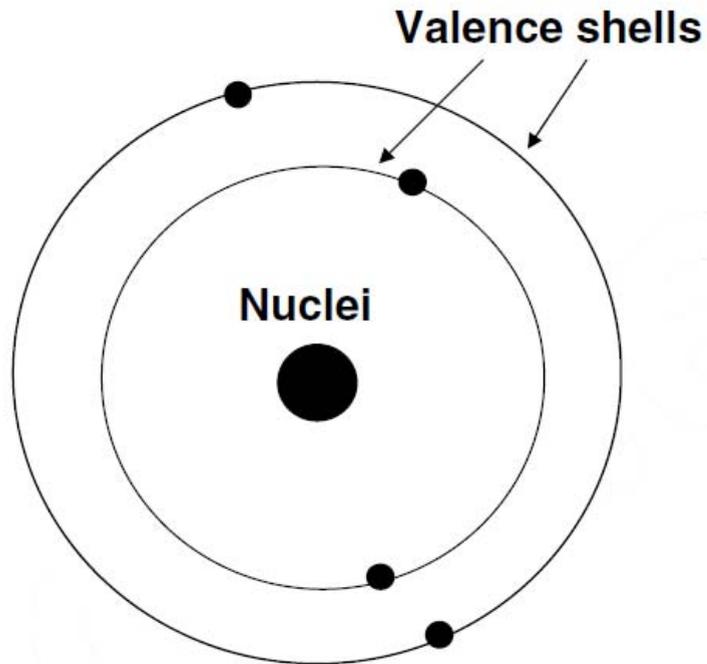


Utilizando uma representação bidimensional (simplificação), cada átomo de silício (4 elétrons na última camada) precisa de 4 ligações covalentes (4 átomos de Si) para atingir a estabilidade.



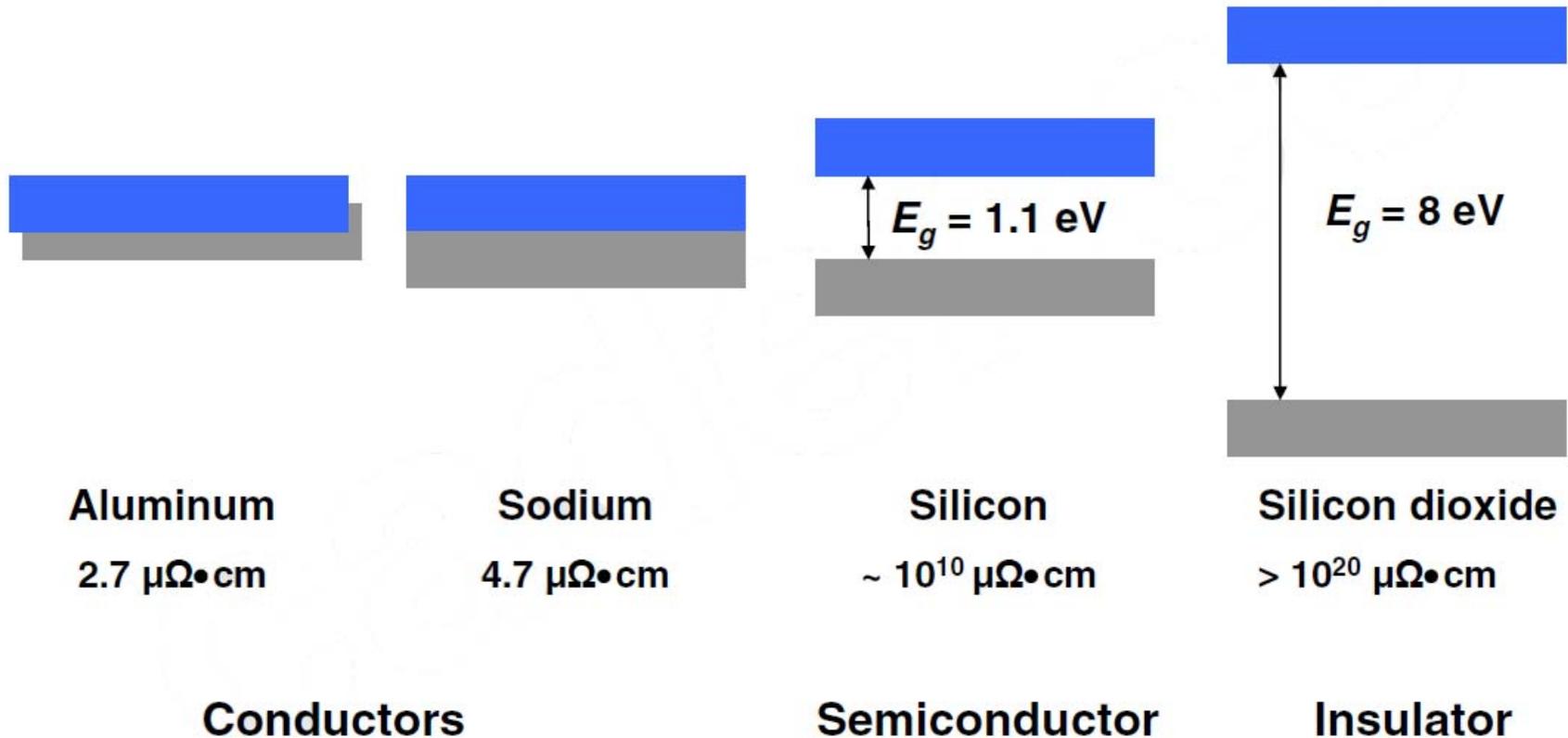
**Em 0 Kelvin todos os elétrons estão presos em suas ligações covalentes**

# A Interpretação da Física de Estado Sólido

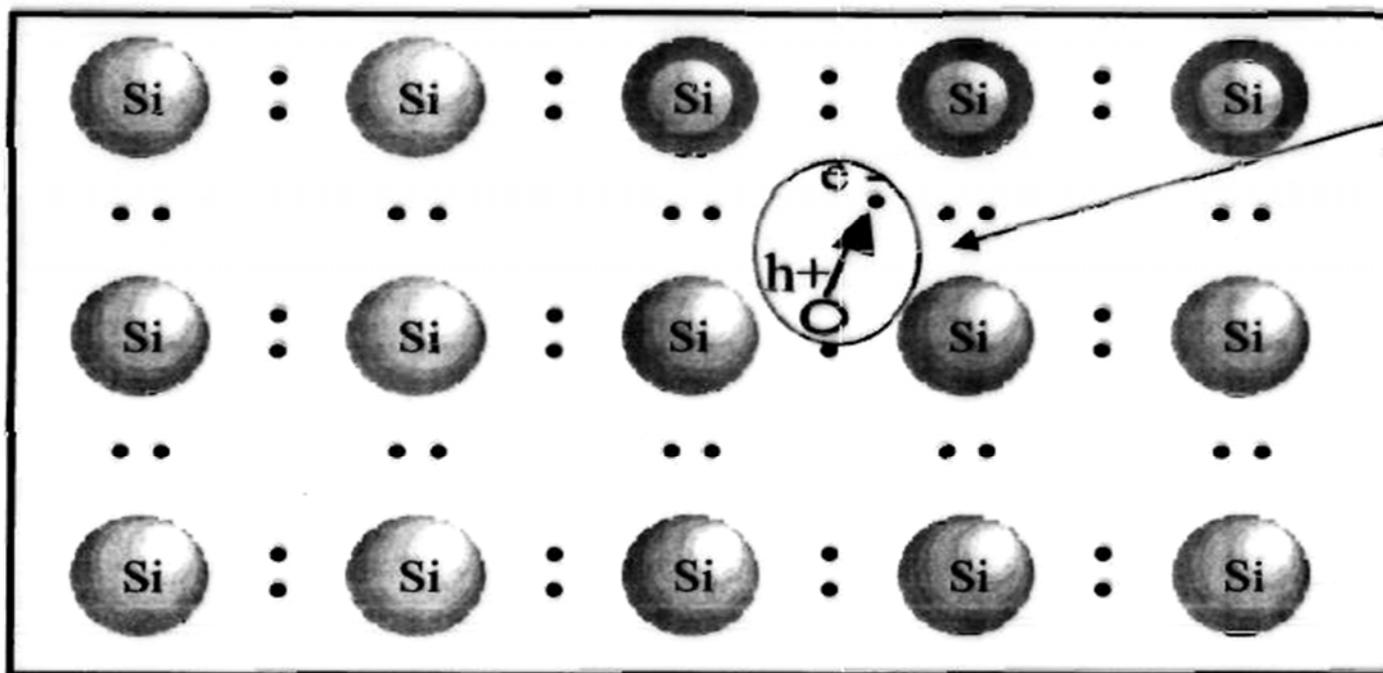


# A Interpretação da Física de Estado Sólido

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

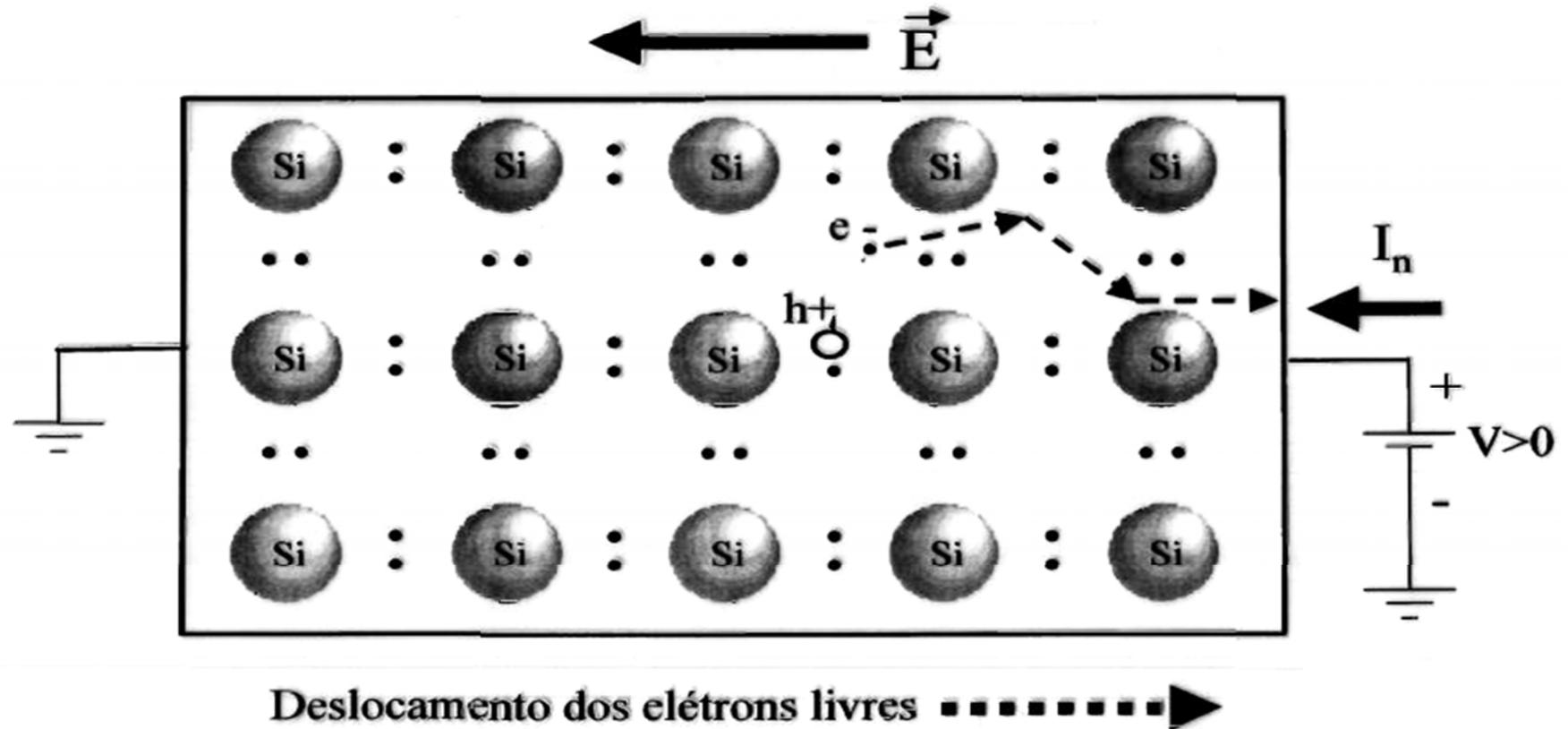
$$n_i(T) = [B \cdot T^3 \cdot e^{-E_G/kT}]^{1/2}$$

- **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)
- $K = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

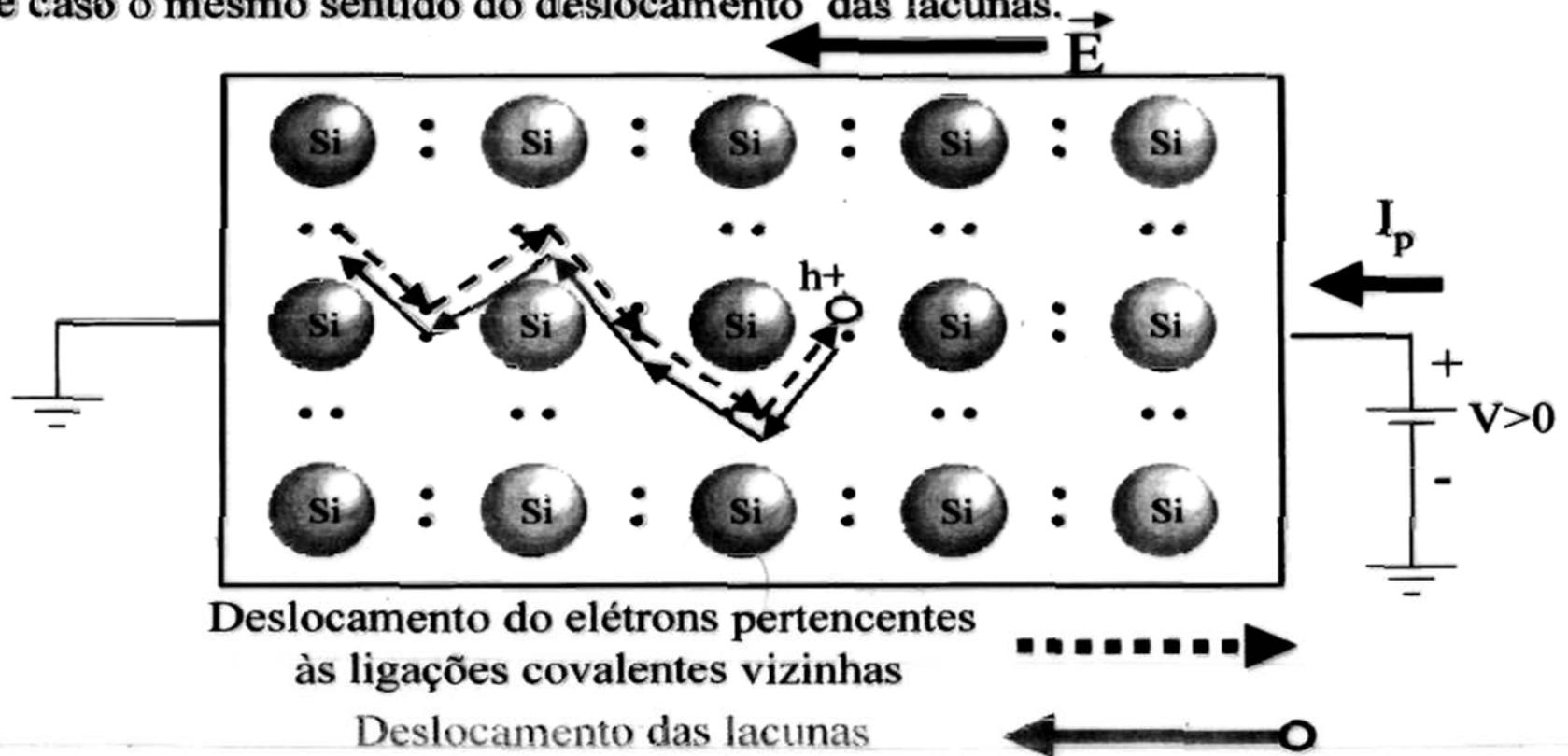
**Exemplo:** Para  $T = 300 \text{ K} \rightarrow n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ portadores/cm}^3$ , ou seja,  $1,45 \cdot 10^{10} \text{ elétrons/cm}^3$  e  $1,45 \cdot 10^{10} \text{ lacunas/cm}^3$ , já que no silício intrínseco  $n = p = n_i$

**Lembrar que o silício tem  $5 \cdot 10^{22}$  átomos de silício/cm<sup>3</sup>**

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.

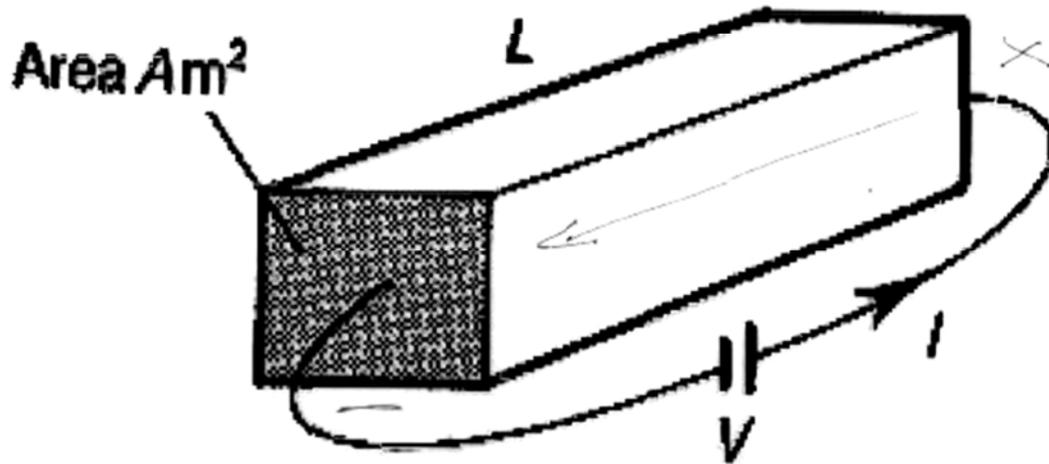


A lacuna gerada pode ser ocupada por um outro elétron vizinho (também pertencente a uma ligação covalente), que por sua vez deixará uma lacuna no seu lugar e assim sucessivamente. Por exemplo, se for aplicada uma tensão como indicada abaixo, o campo elétrico induzirá o deslocamento dos elétrons pertencentes às 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 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  $\rho_e$  ( $\Omega.m$ ), comprimento  $L$  (m) e seção  $A$  ( $m^2$ ), submetido a um campo elétrico  $E$ :



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

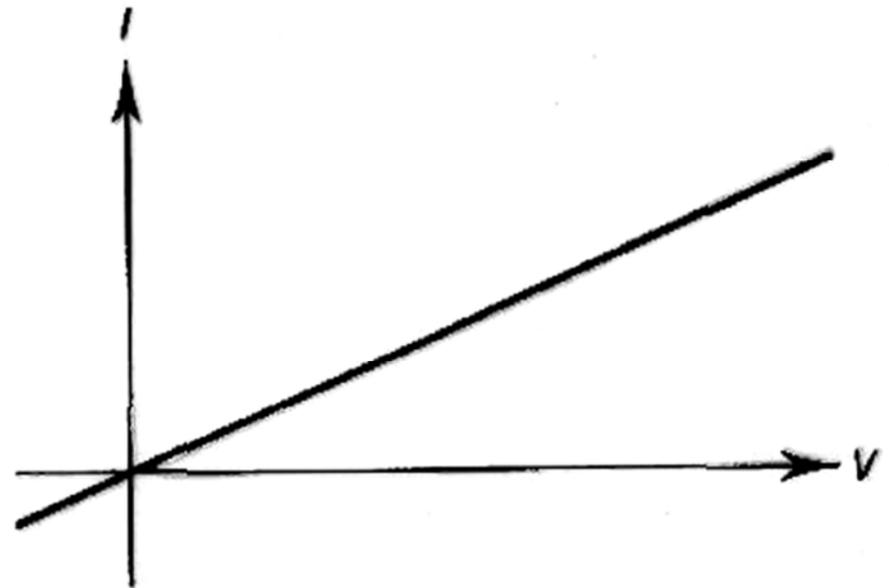
**Podemos reescrever essa relação de outra forma:**

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

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

**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

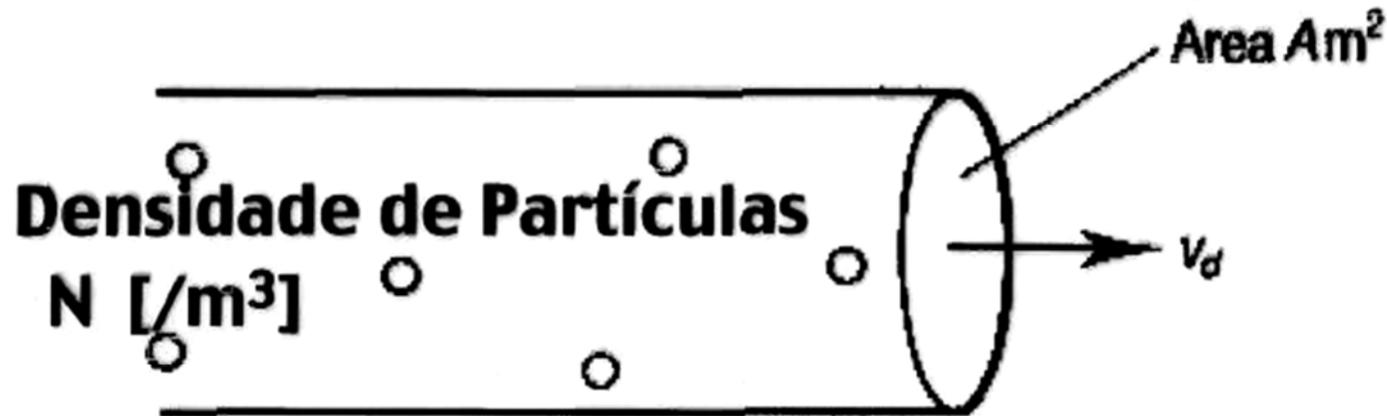
## Condutividade elétrica:

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

# Velocidade de Deriva

$$\mathbf{I, V} \rightleftharpoons \mathbf{J, E}$$

Vamos olhar melhor para  $\sigma$  :



Número de partículas em 1 m de tubo:  $N.A$  [1/m]

Número de partículas em um

determinado ponto/segundo :  $N.A.v_d$  [1/s]

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:**

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

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

**Logo:**

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

**Essa constante,  $\sigma / \mathbf{Q.N}$ , é conhecida como MOBILIDADE  $\mu$  [ $\text{m}^2/\text{V.s}$ ]**

**Podemos reescrever  $\mathbf{J}$  como:**

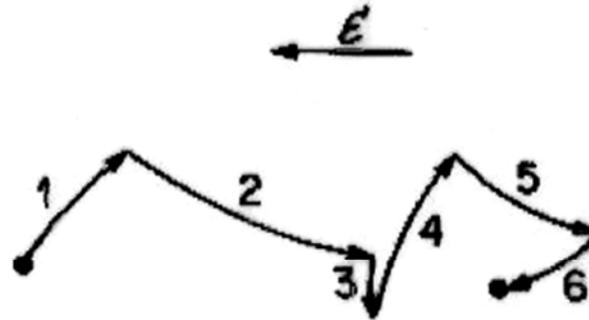
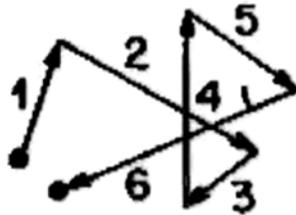
$$\mathbf{J} = \mathbf{Q.N.\mu.E} \quad [\text{A/m}^2]$$

**E a condutividade como:**

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

# Velocidade de Deriva e Velocidade Térmica

$$\mathcal{E} = 0$$



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

**$10^5$  m/s a 300K**

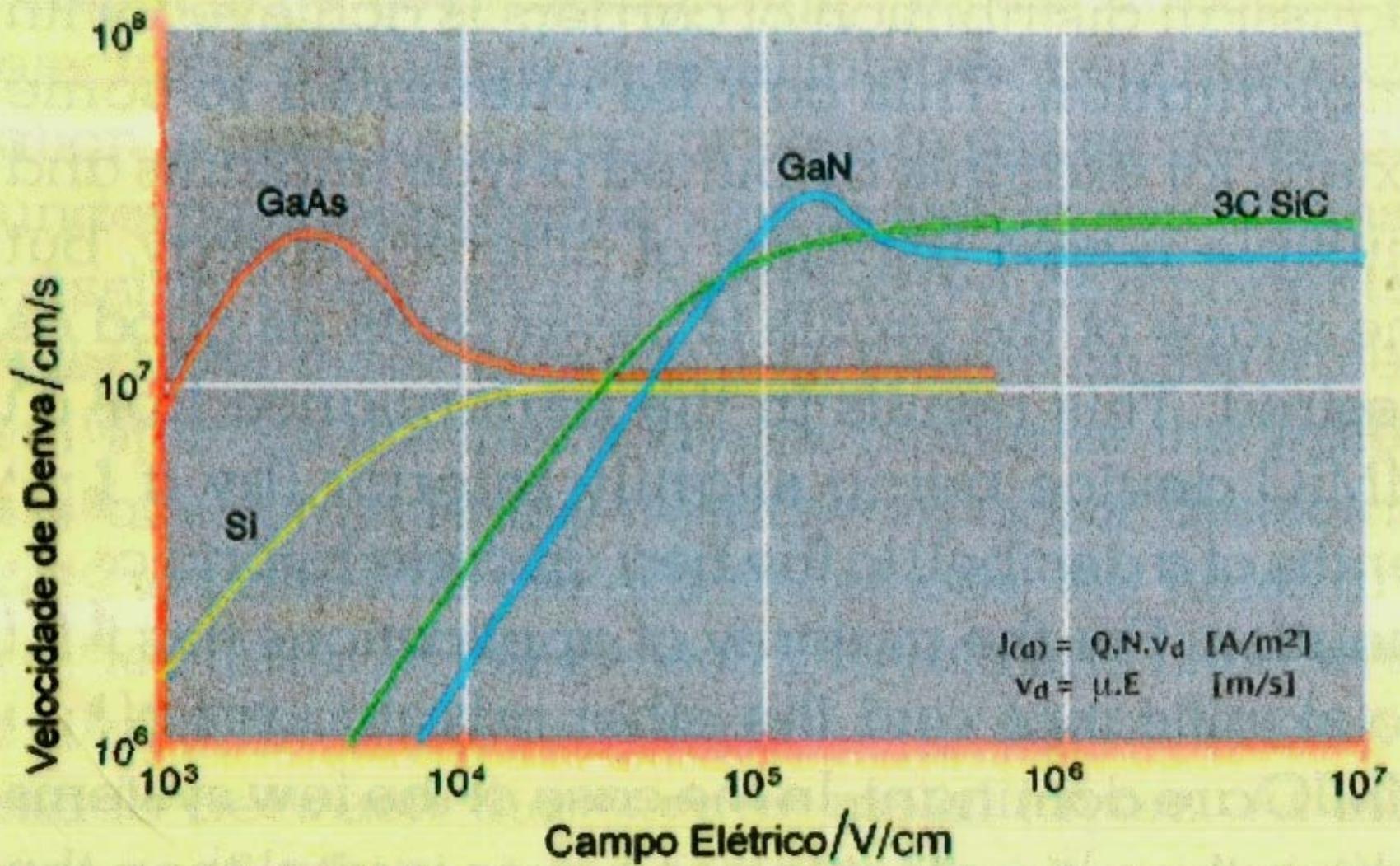
**ou 0,026 eV**

para elétrons em Si

$$v_d = \mu \times E$$

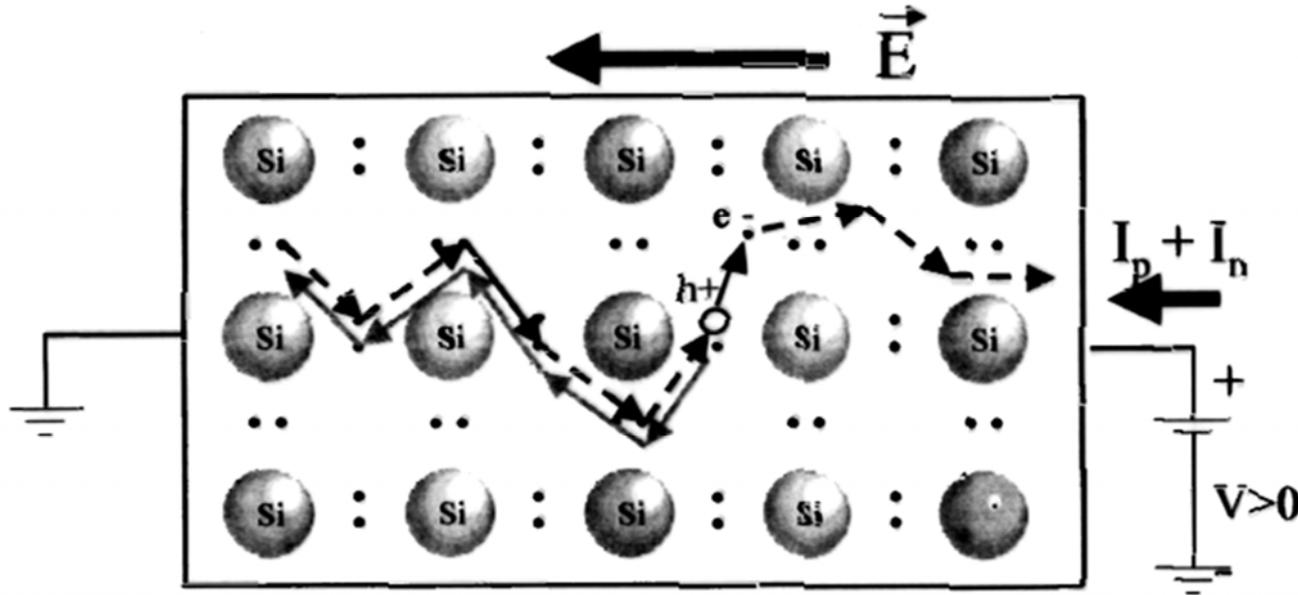
$\mu \cong 0,1 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$

$$v_d \ll v_{th}$$



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

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



Resistividade:

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

$\mu_p$  e  $\mu_n$  = mobilidade das lacunas e elétrons respectivamente.

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

Relação de Einstein:

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

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

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

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

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

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

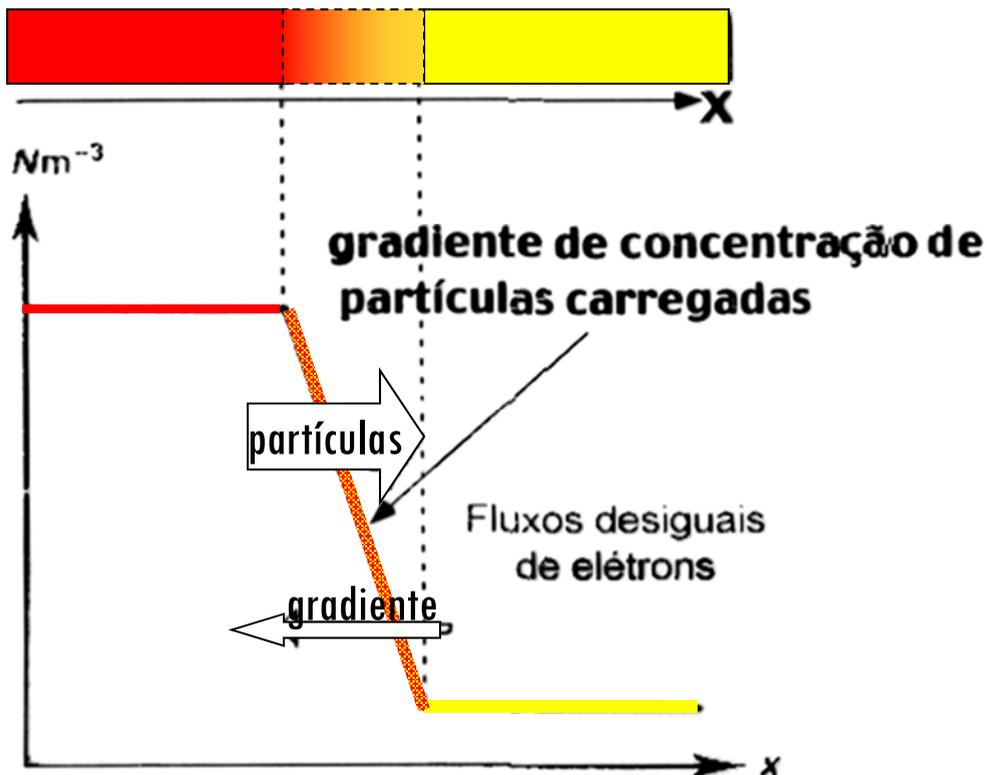
$$I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

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

# A Corrente de Difusão

**Devido a agitação térmica, as partículas carregadas movem-se aleatoriamente, mesmo na ausência de campo elétrico.**

**Considere a situação a seguir:**



**Note:**

- a) Há movimento aleatório**
- b) Há um gradiente de concentração**

# A Corrente de Difusão

$$\text{Fluxo}_{\text{dif}} = -D \frac{dN}{dx} \quad [1/(m^2.s)]$$

onde  $D$  é o coeficiente de difusão das partículas

**Logo:**

$$J_{\text{dif}} = -qD \frac{dN}{dx} \quad [A/m^2]$$

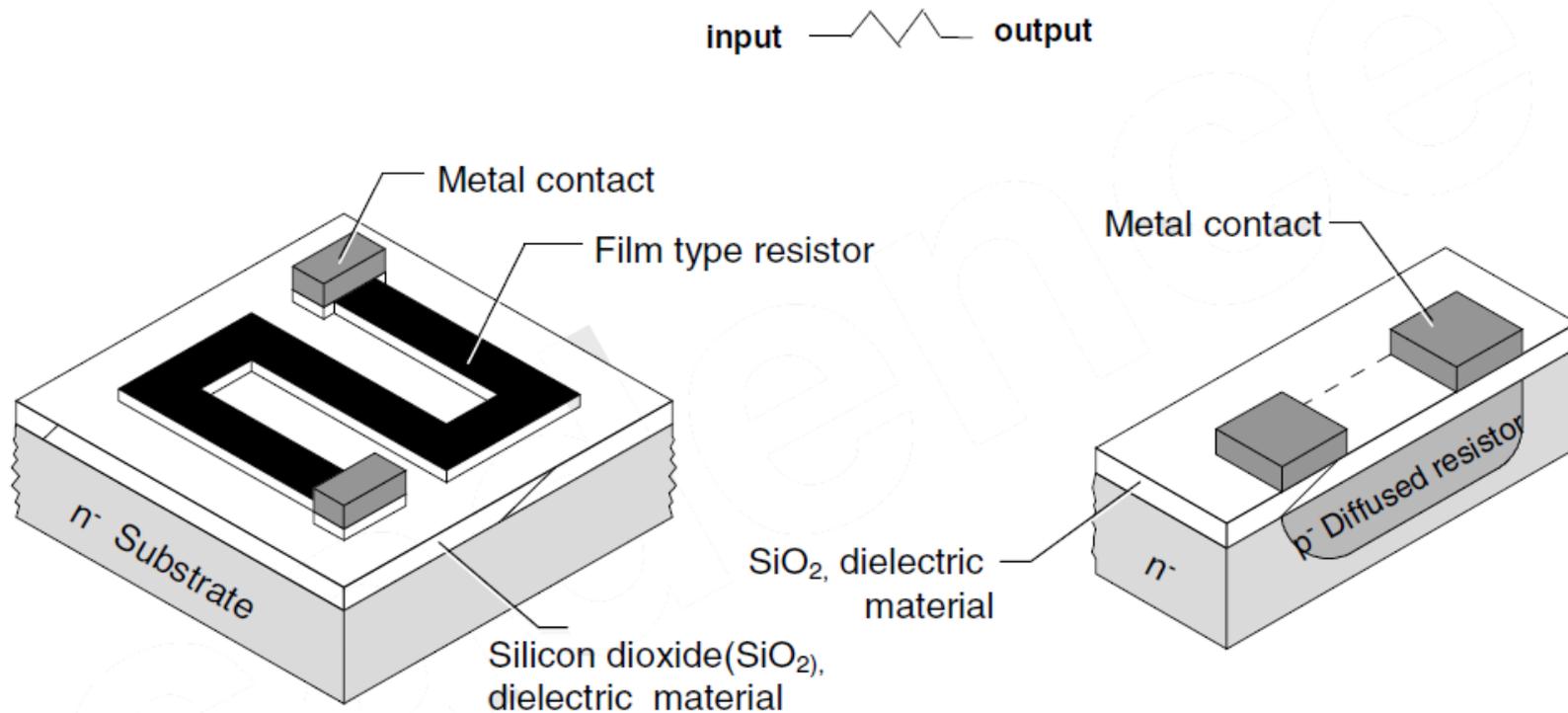
# As Correntes de Deriva e de Difusão

**Em semicondutores observamos que em condições normais as correntes de deriva e de difusão constituem praticamente toda a corrente que flui no material. Logo:**

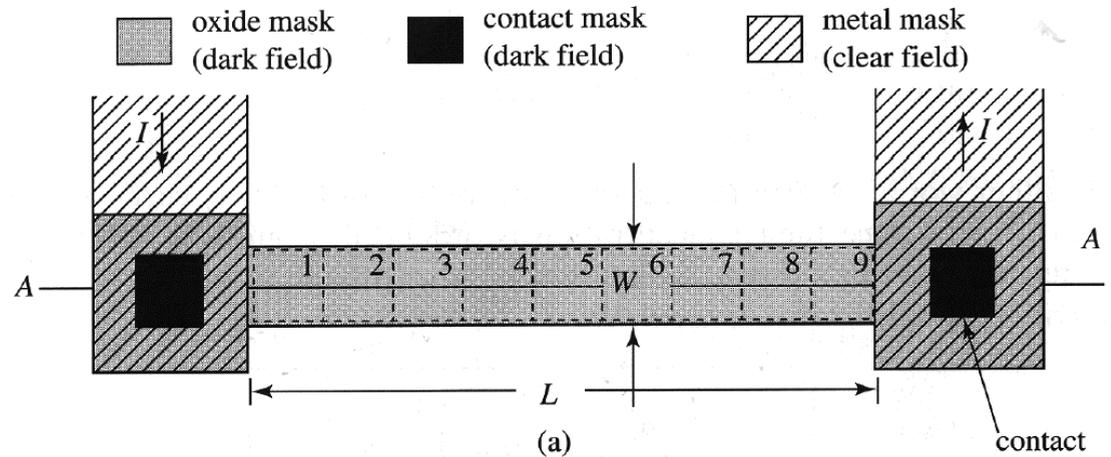
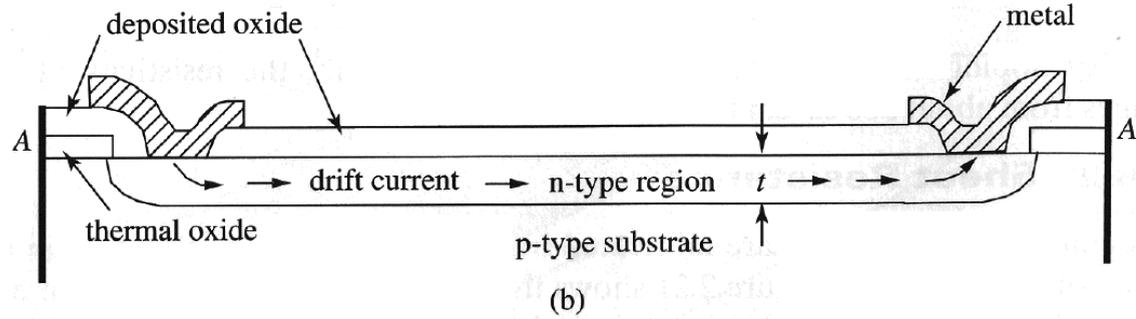
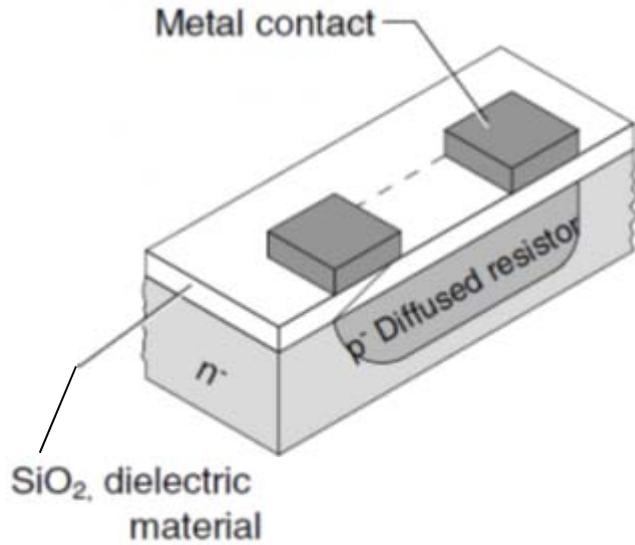
$$\mathbf{J_{TOTAL} = J_{der} + J_{dif}} \quad \text{(vale a lei da superposição!)}$$

$$\mathbf{J_{TOTAL} = Q \cdot N \cdot \mu \cdot E - QD \frac{dN}{dx} \quad [A/m^2]}$$

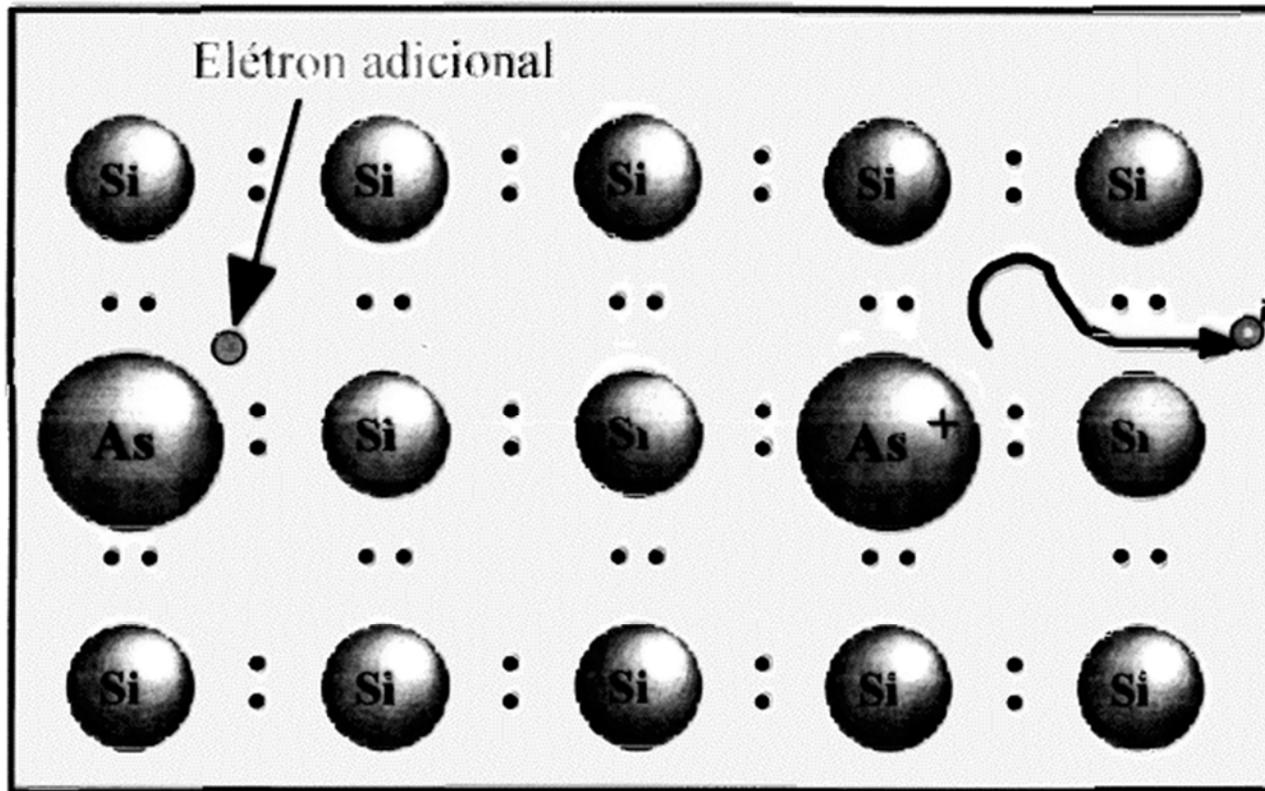
# Exemplos de Resistores em um CI



# Exemplos de Resistores em um CI



# Silício Tipo $n$ (elétrons adicionais)



Elétron livre  
se deslocando

Em equilíbrio térmico:

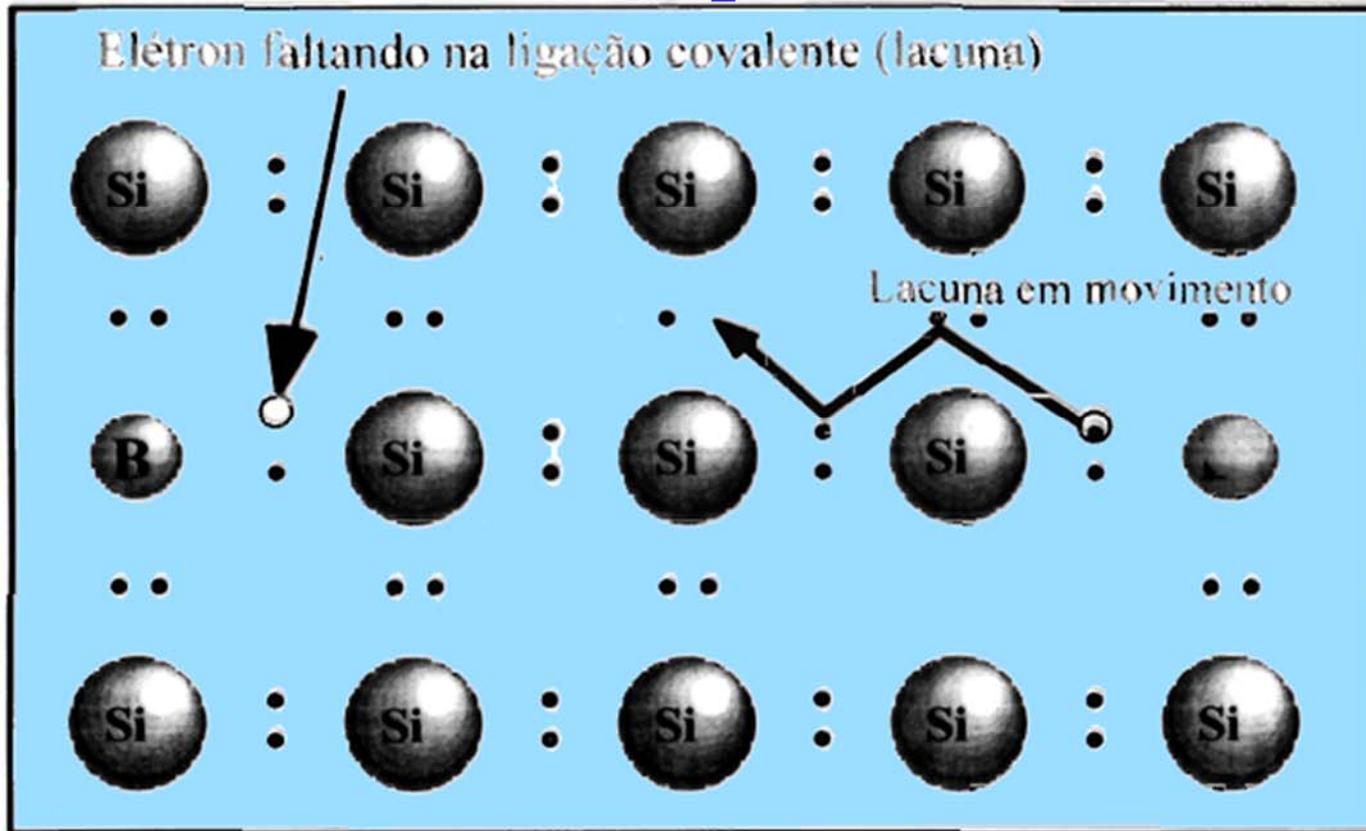
$$n \cdot p = n_i^2$$

$$n = N_D + n_i \cong N_D$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

No processo de dopagem do silício com elementos PENTAVALENTES (Arsênio por exemplo), cada átomo de arsênio que ocupa a posição de um átomo de silício doa um elétron livre para a estrutura cristalina (DOADORA), já que os 4 outros estarão fazendo parte das ligações covalentes. Quando este elétron se distancia das proximidades do arsênio, diz-se que o átomo ficou “ionizado” com carga positiva igual em módulo à carga do elétron perdido.

# Silício Tipo *p* (lacunas adicionais)



Em equilíbrio  
térmico:

$$n \cdot p = n_i^2$$

$$p = N_A + n_i \cong N_A$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

No processo de dopagem do silício com elementos TRIVALENTES (BORO por exemplo), cada átomo de boro que ocupa a posição de um átomo de silício dá origem a uma lacuna para a estrutura cristalina (ACEITADORA), já que uma das ligações covalentes não se concretiza. Quando esta lacuna se desloca das proximidades do boro, diz-se que o átomo ficou “ionizado” com carga negativa igual à carga do elétron que ocupou a lacuna.

# Resumo

**Tabela 3.1** RESUMO DASEQUAÇÕES IMPORTANTES PARA OPERAÇÃO DA JUNÇÃO *pn*.

| Grandeza                                                                | Relação                                                    | alores de Constantes e Parâmetros<br>(para Si intrínseco a T = 300 K)                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Concentração de portadores no silício intrínseco (/cm <sup>3</sup> )    | $n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$                                 | $B = 5,4 \times 10^{31}/(\text{K}^3 \text{cm}^6)$<br>$E_G = 1,12 \text{ eV}$<br>$k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$<br>$n_i = 1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ |
| Densidade da corrente de difusão (A/cm <sup>3</sup> )                   | $J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$<br>$J_n = -qD_n \frac{dn}{dx}$ | $q = 1,60 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$<br>$D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$<br>$D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$                                               |
| Densidade da corrente de deriva (A/cm <sup>3</sup> )                    | $J_{\text{deriva}} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$                  | $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$<br>$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$                                                                                    |
| Resistividade ( $\Omega \text{ cm}$ )                                   | $\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$                            | $\mu_p$ e $\mu_n$ diminuem com o aumento na concentração de dopantes                                                                                             |
| Relação entre mobilidade e difusividade                                 | $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$              | $V_T = kT/q$<br>$\cong 25 \text{ mV}$                                                                                                                            |
| Concentração de portadores no silício tipo <i>n</i> (/cm <sup>3</sup> ) | $n_{n0} \cong N_D$<br>$p_{n0} = n_i^2/N_D$                 |                                                                                                                                                                  |
| Concentração de portadores no silício tipo <i>p</i> (/cm <sup>3</sup> ) | $p_{p0} \cong N_A$<br>$n_{p0} = n_i^2/N_A$                 |                                                                                                                                                                  |
| Tensão interna da junção (V)                                            | $V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$          |                                                                                                                                                                  |