

# TE 046

## DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS

**Oscar C. Gouveia Filho**  
**Departamento de Engenharia Elétrica**  
**UFPR**

URL:  
[www.eletrica.ufpr.br/ogouveia/te046](http://www.eletrica.ufpr.br/ogouveia/te046)  
E-mail: [ogouveia@eletrica.ufpr.br](mailto:ogouveia@eletrica.ufpr.br)

## 2. FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

### 2.1. Materiais Semicondutores

CLASSIFICAÇÃO ELÉTRICA DOS MATERIAIS DE ESTADO SÓLIDO	
MATERIAIS	RESISTIVIDADE ( $\Omega \cdot \text{CM}$ )
Isolantes	$10^5 < \rho$
Semicondutores	$10^{-3} < \rho < 10^5$
Condutores	$\rho < 10^{-3}$

# SEMICONDUCTORES NA TABELA PERIÓDICA

	IIIA	IVA	VA	VIA
	5 10.811 <b>B</b> Boron	6 12.01115 <b>C</b> Carbon	7 14.0067 <b>N</b> Nitrogen	8 15.9994 <b>O</b> Oxygen
	13 26.9815 <b>Al</b> Aluminum	14 28.086 <b>Si</b> Silicon	15 30.9738 <b>P</b> Phosphorus	16 32.064 <b>S</b> Sulfur
<b>IIB</b>	30 65.37 <b>Zn</b> Zinc	31 69.72 <b>Ga</b> Gallium	32 72.59 <b>Ge</b> Germanium	34 78.96 <b>Se</b> Selenium
	48 112.40 <b>Cd</b> Cadmium	49 114.82 <b>In</b> Indium	50 118.69 <b>Sn</b> Tin	52 127.60 <b>Te</b> Tellurium
	80 200.59 <b>Hg</b> Mercury	81 204.37 <b>Tl</b> Thallium	82 207.19 <b>Pb</b> Lead	83 208.980 <b>Bi</b> Bismuth
				84 (210) <b>Po</b> Polonium

Fonte: Microelectronic circuit design / Richard C. Jaeger, Travis N. Blalock. — 4th ed.

Semicondutores elementares:

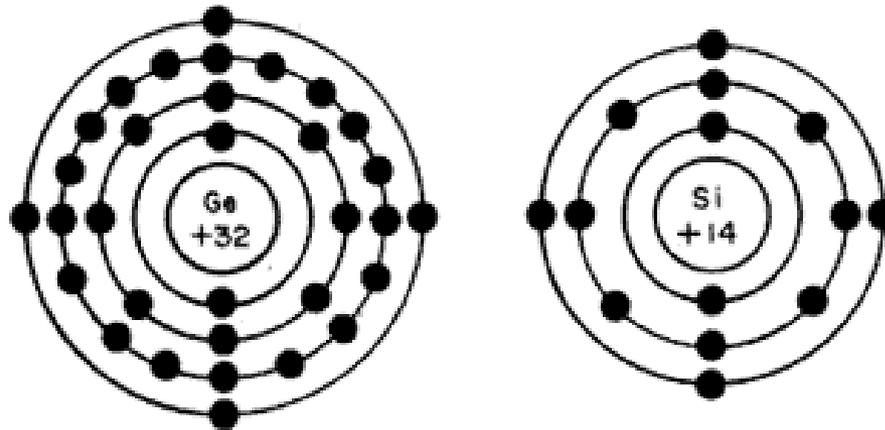
Grupo IV A da Tabela Periódica → **Si, Ge**

Semicondutores compostos:

Grupos III A e VA → **Arseneto de Galiumm (GaAs)**

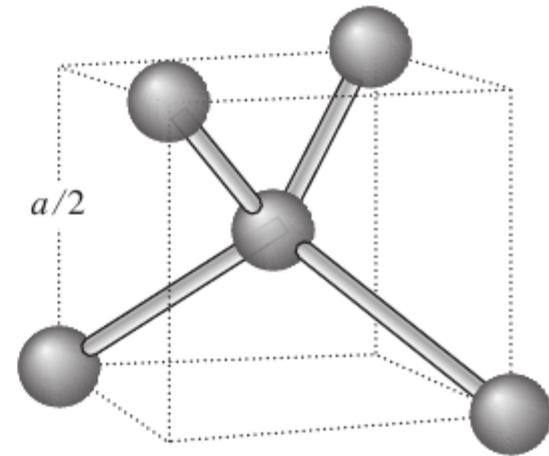
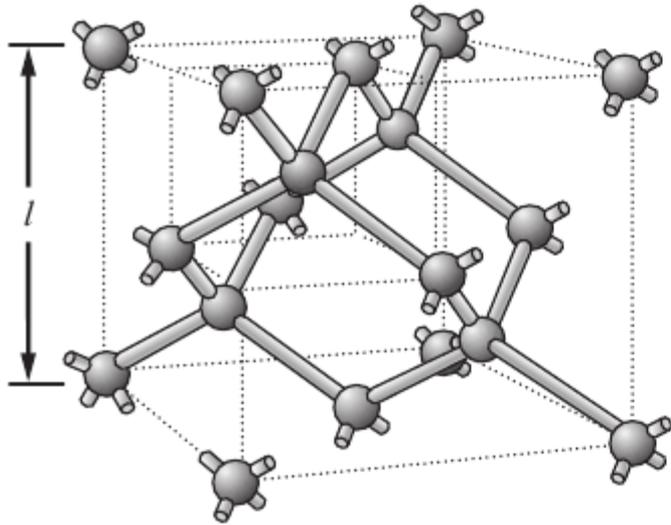
II A e VI A → **Seleneto de Cádmiio (CdS)**

## 2.2. Ligações Covalentes

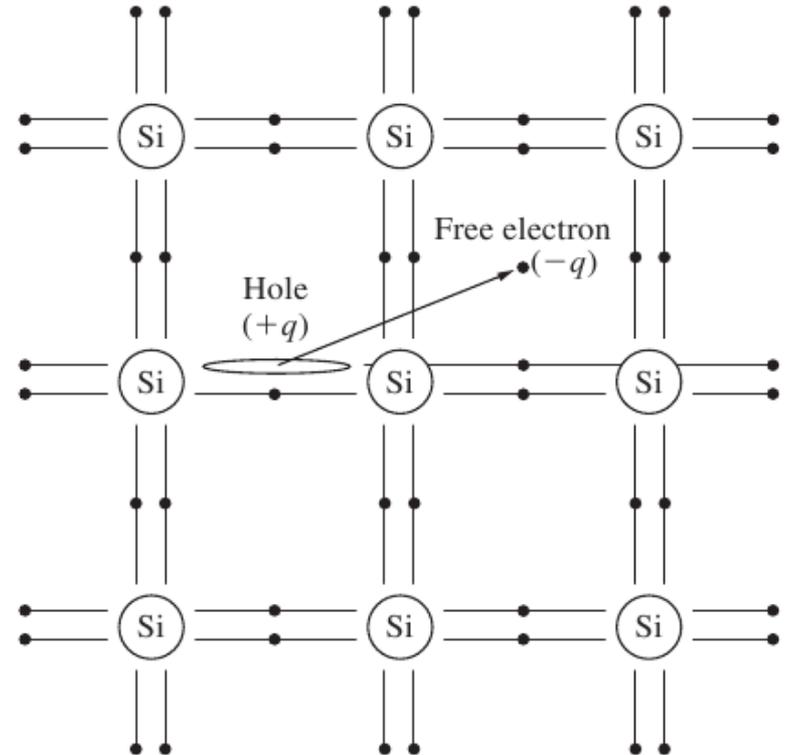
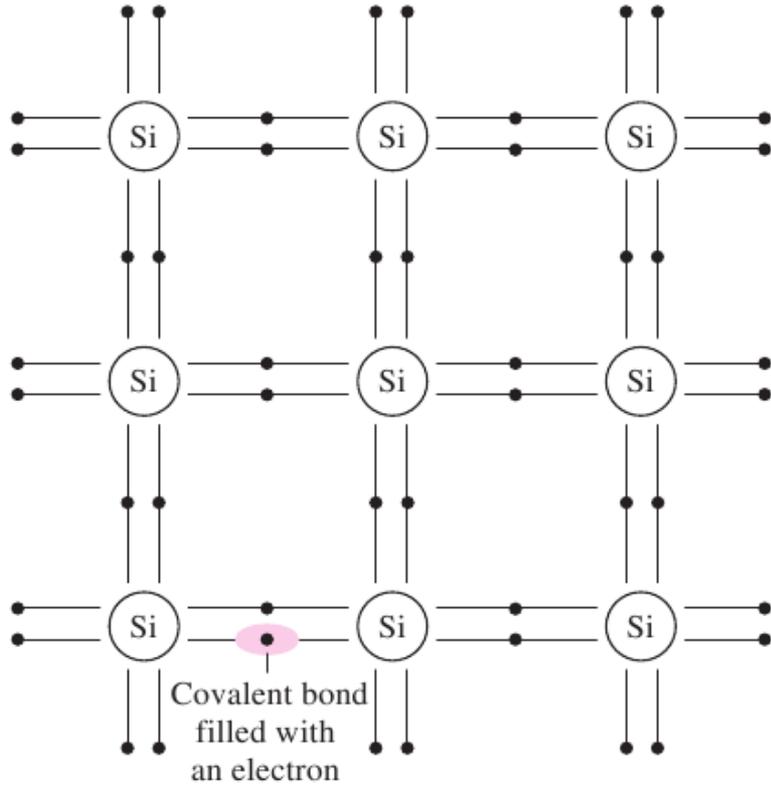


Modelo simplificado dos átomos de Si e Ge  
4 elétrons na última camada

## Estrutura cristalina do Silício



## Representação 2D do cristal de Silício



## Energia de “Bandgap”

Energia mínima necessária para retirar um elétron da ligação covalente

$$n_i = 5,2 * 10^{15} T^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \text{ eletrons/cm}^3$$

$n_i$  é a concentração de elétrons

$T$  é a temperatura absoluta (K)

$k$  é a constante de Boltzmann  $k = 1,38 * 10^{-23} \text{ J/K}$

$E_g$  é a energia de “bandgap”  $E_g = 1,12 \text{ eV}$  para o Si

Obs.: 1 eV é a energia necessária para mover um elétron através da diferença de potencial de 1 V.  $1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

**Exemplo:** Determine a densidade de elétrons no Si à temperatura de 300 K.

Como elétrons e lacunas são gerados aos pares a concentração de lacunas  $p$  é igual à de elétrons  $n$ .

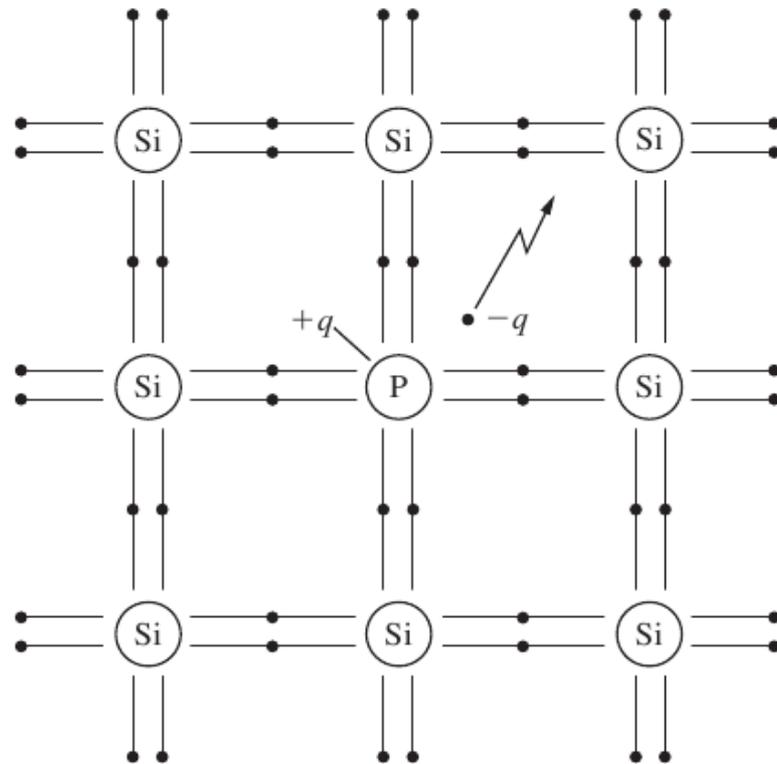
$$p \cdot n = n_i^2$$

## 2.3. Semicondutor Extrínseco

Para aumentar a quantidade de portadores (elétrons ou lacunas) adiciona-se impurezas ao cristal de Semicondutor.

### Semicondutor tipo *n*

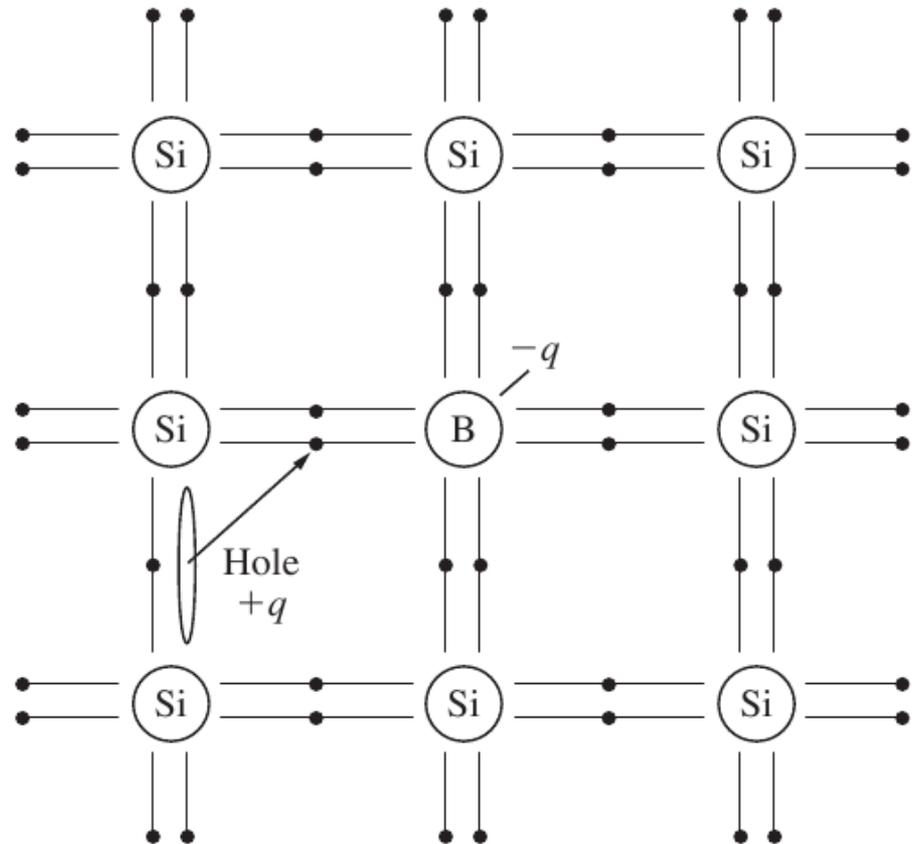
Acrescentando-se um átomo de Fósforo (P), pentavalente, sobra um elétron livre no cristal.  
Impurezas pentavalentes são chamadas de *DOADORAS*.



## Semicondutor tipo $p$

Acrescentando-se um átomo de Boro (B), trivalente falta um elétron nas ligações covalentes (lacuna).

Impurezas trivalentes são chamadas de *ACEITADORAS*.



Apesar do número de portadores aumentar em um semicondutor dopado (elétrons no tipo n e lacunas no tipo p), o produto  $pn$  permanece constante.

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

**Por que?**

RECOMBINAÇÃO

*Exemplo:* Um pedaço de Si cristalino é dopado uniformemente com átomos de Fósforo. A densidade de dopantes é  $N_D = 10^{16}$  átomos/cm<sup>3</sup>. Determine a densidade de elétrons e lacunas nesse material à temperatura ambiente (300 K).

Para  $N_D \gg n_i$

Portadores Majoritários:  $n \approx N_D$

Portadores Minoritários:  $p \approx n_i / N_D$

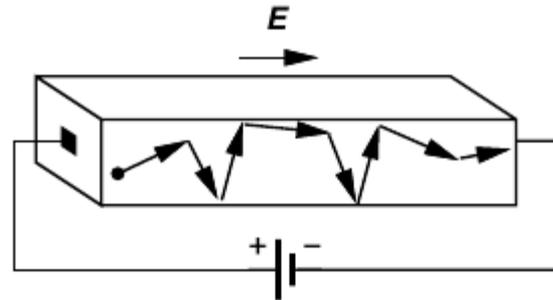
Para  $N_A \gg n_i$

Portadores Majoritários:  $p \approx N_A$

Portadores Minoritários:  $n \approx n_i / N_A$

## 2.4. Transporte de Portadores no Semicondutor

### 2.4.1. Deriva



$$v = \mu E$$

$\mu \rightarrow$  mobilidade [ $\text{cm}^2/\text{V.s}$ ]

Para o Si:  $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  , mobilidade dos elétrons

$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  , mobilidade das lacunas

Como os elétrons se movimentam no sentido contrário a  $E$

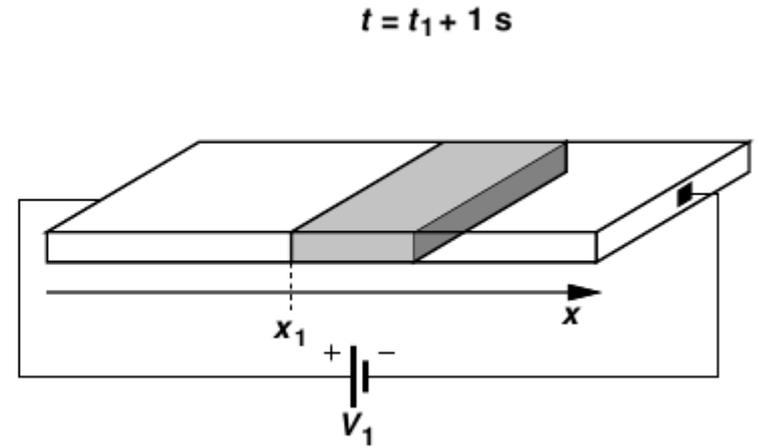
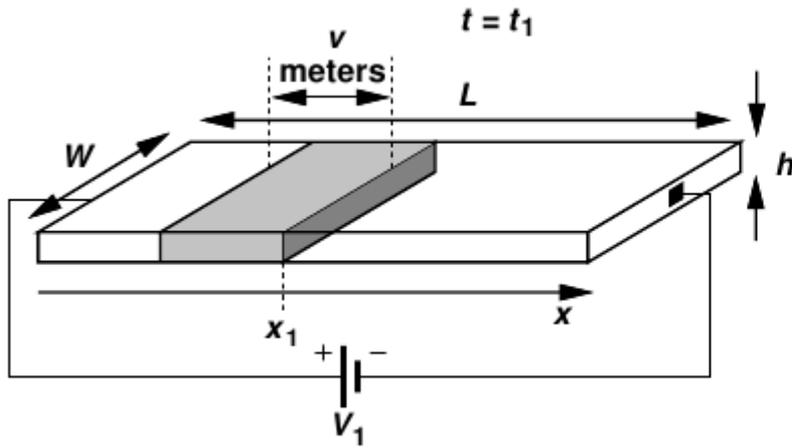
$$\vec{v} = -\mu_n \vec{E}$$

Para lacunas

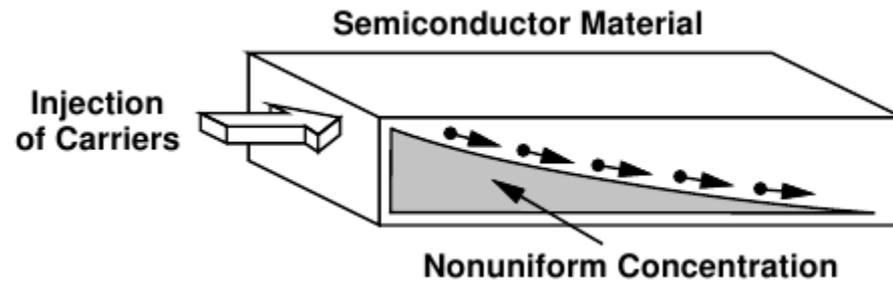
$$\vec{v} = \mu_p \vec{E}$$

*Exemplo:* Um pedaço de Si tipo n com 1  $\mu\text{m}$  de comprimento é submetido a uma tensão de 1V. Qual a velocidade dos elétrons?

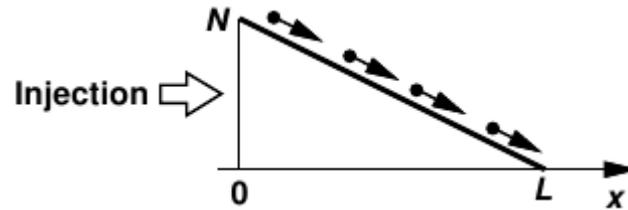
## Corrente de Deriva



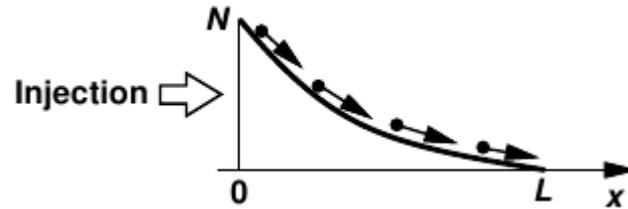
## 2.4.2. Difusão



*Exemplo:* Considere a concentração de portadores mostrada na figura abaixo. Determine a corrente de difusão.

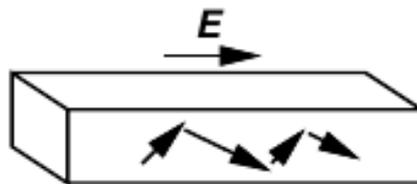


*Exemplo:* Considere a concentração de portadores mostrada na figura abaixo. Determine a corrente de difusão.



### 2.4.3. Relação de Einstein

Drift Current



$$J_n = q n \mu_n E$$

$$J_p = q p \mu_p E$$

Diffusion Current



$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$