

# DIODOS SEMICONDUCTORES

**Alexandre S. Lujan**

***Semikron Semicondutores Ltda.***  
**Carapicuíba - SP**



■ Sumário:

- ◆ Semicondutores
- ◆ Junção P-N
- ◆ Tipos de diodos semicondutores
- ◆ Fabricação de diodos de potência



## ■ Materiais Semicondutores:

⇒ Resistividade: 10 - 1000  $\Omega\text{cm}$ .

Metais -  $10^{-6}$   $\Omega\text{cm}$ ; isolantes -  $>10^{10}$   $\Omega\text{cm}$

⇒ Dois tipos de portadores de corrente:  
elétrons (negativos) e buracos (positivos).

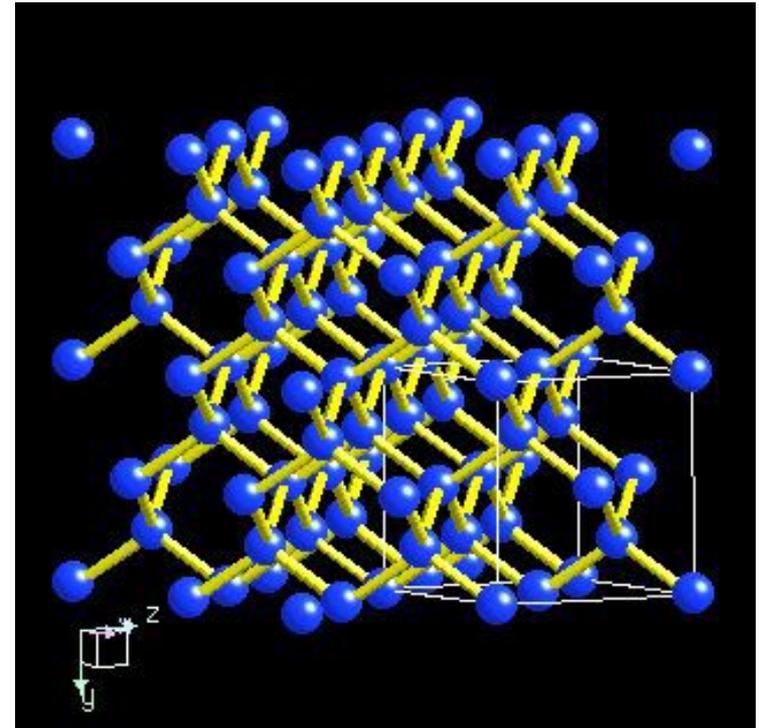
⇒ Resistividade apresenta coeficiente de temperatura negativo.



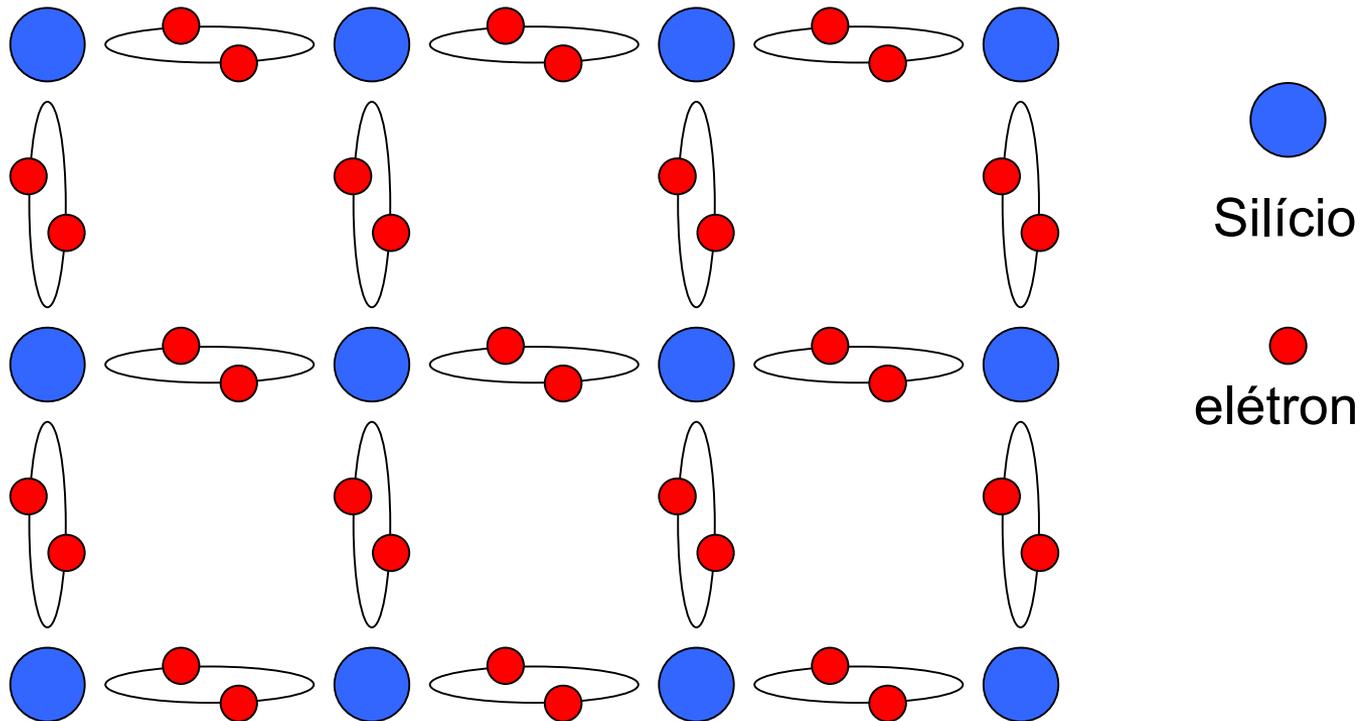


■ Estrutura de um semicondutor:

- ⇒ Estrutura cristalina.
- ⇒ Maioria possui estrutura igual à do diamante.
- ⇒ Ligações covalentes a iônicas.



## ■ Estrutura bidimensional



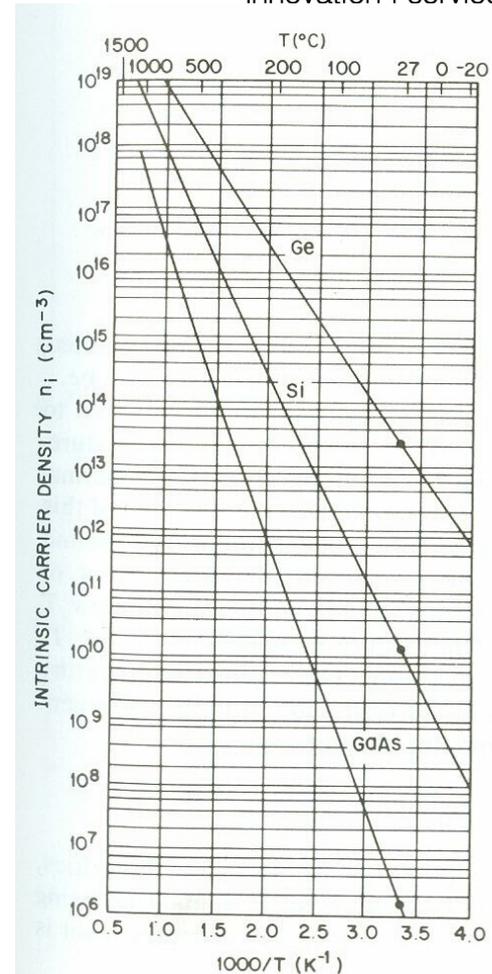
## ■ Concentração de portadores:

⇒ Materiais puros possuem igual concentração de elétrons,  $n$ , e buracos,  $p$ .

⇒ O produto das concentrações é função da temperatura:

$$n p = n_i^2(T)$$

$n_i$  é a concentração intrínseca de portadores



## ■ Dopagem:

- ⇒ Altera a resistividade do material.
- ⇒ Substituição de um átomo de Silício por átomos de impurezas dopantes das colunas III ou V da Tabela Periódica.
- ⇒ Átomos da coluna III - são chamados trivalentes ou aceitadores e usados para criar camadas com predominância de buracos, ou **tipo P**.
- ⇒ Átomos da coluna V - são chamados pentavalentes ou doadores e usados para criar camadas com predominância de elétrons, ou **tipo N**.
- ⇒ A concentração de impurezas dopantes varia de  $1 \times 10^{13}$  a  $1 \times 10^{21}$  átomos/cm<sup>3</sup>.



## ■ Exemplos de dopantes para o silício:

⇒ Tipo P:

Boro (B), Alumínio (Al) e Gálio (Ga).

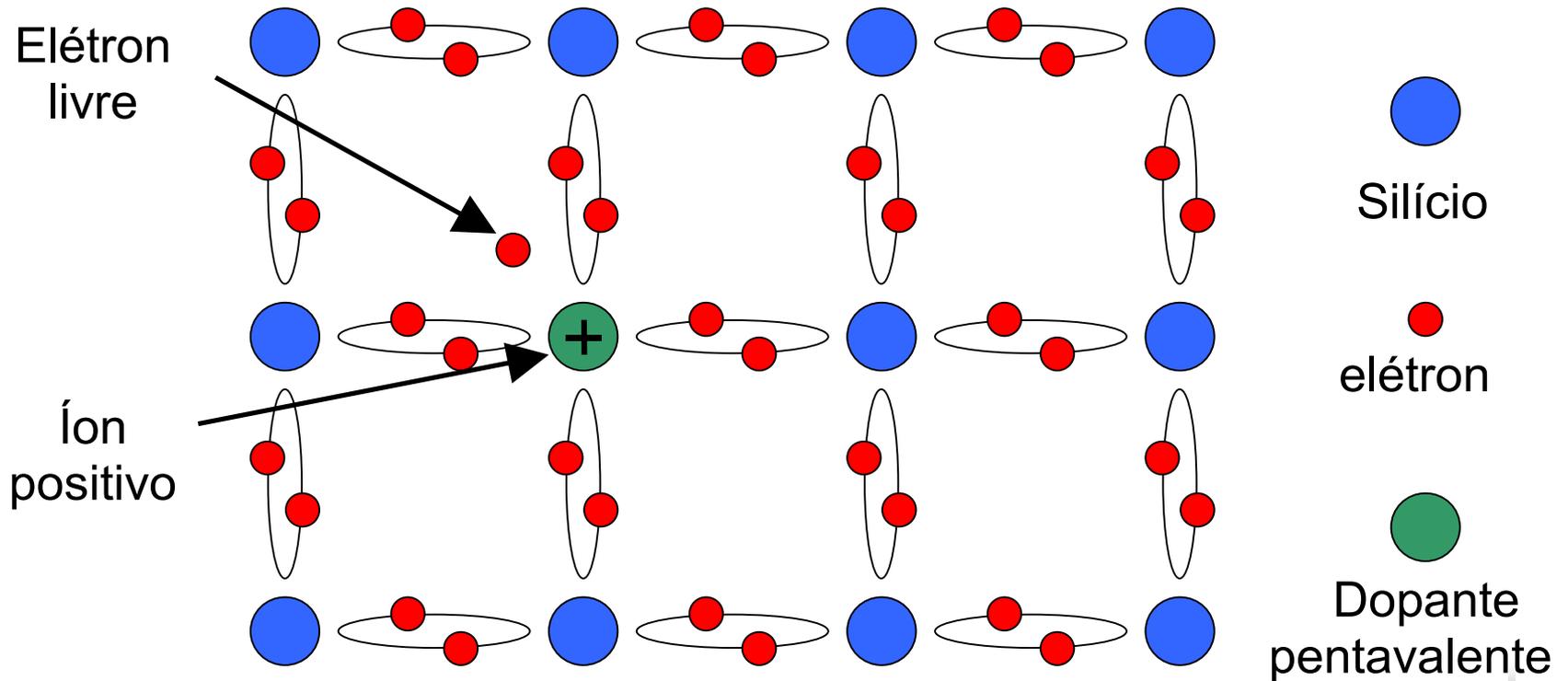
⇒ Tipo N:

Fósforo (P), Arsênio (As) e Antimônio (Sb).

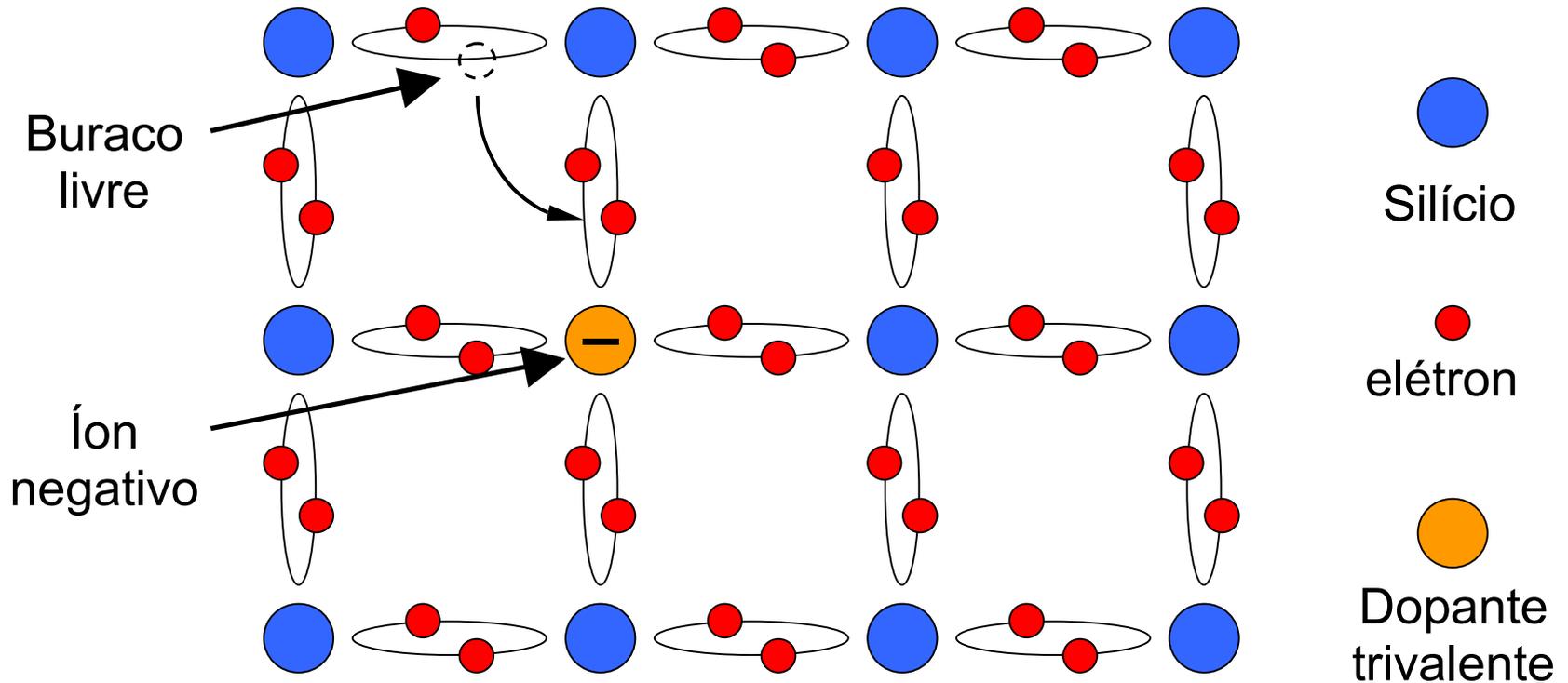
										18	
										2 4.0026 -268.9 -269.7 0.126 1s <sup>2</sup> Helium	
13	14	15	16	17							
5 10.811 - (2030) 2.34 3 <b>B</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> Boron	6 12.011 4830 ±4.2 3727g 2.26 4 <b>C</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> Carbon	7 14.0067 -195.8 ±3.2,4,5 -210 0.81 5 <b>N</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> Nitrogen	8 15.9994 -183 -2 -218.8 1.14 6 <b>O</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> Oxygen	9 18.9984 -188.2 -1 -219.6 1.505 7 <b>F</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> Fluorine	10 20.1797 -246 -248.6 1.20 8 <b>Ne</b> [He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> Neon						
13 26.9815 2450 660 2.70 3 <b>Al</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> Aluminium	14 28.0855 2680 1410 2.33 4 <b>Si</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> Silicon	15 30.9738 280w ±3,4,5 44.2w 1.82w 5 <b>P</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> Phosphorus	16 32.066 444.6 ±2,4,6 119.0 2.07 6 <b>S</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> Sulfur	17 35.4527 -34.7 ±1,3,5,7 -101.0 1.56 7 <b>Cl</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> Chlorine	18 39.948 -185.8 -189.4 1.40 8 <b>Ar</b> [Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> Argon						
9 31 69.723 2237 29.8 5.91 3 <b>Ga</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> Gallium	32 72.61 2830 937.4 5.32 4 <b>Ge</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> Germanium	33 74.9216 613 ±3,5 subl. 5.72 5 <b>As</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> Arsenic	34 78.96 685 ±2,4,6 217 4.79 6 <b>Se</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Selenium	35 79.904 58 ±1,5 -7.2 3.12 7 <b>Br</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Bromine	36 83.80 -152 -157.3 2.6 8 <b>Kr</b> [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Krypton						
1 49 114.82 2000 156.2 7.31 3 <b>In</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup> Indium	50 118.710 2270 231.9 7.30 2,4 <b>Sn</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> Tin	51 121.75 1380 ±3,5 630.5 6.62 5 <b>Sb</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> Antimony	52 127.60 989.8 ±2,4,6 449.5 6.24 6 <b>Te</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> Tellurium	53 126.9045 183 ±1,5,7 113.7 4.94 7 <b>I</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> Iodine	54 131.29 -108.0 -111.9 3.06 8 <b>Xe</b> [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Xenon						
9 81 204.3833 1457 303 11.85 1,3 <b>Tl</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> Thallium	82 207.2 1725 327.4 11.4 2,4 <b>Pb</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup> Lead	83 208.9804 1560 271.3 9.8 3,5 <b>Bi</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup> Bismuth	84 (208.9824) - 254 (9.2) 2,4 <b>Po</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup> Polonium	85 (209.9871) - (302) ±1,3,5,7 - 7 <b>At</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup> Astatine	86 (222.0176) (-61.8) (-71) - 8 <b>Rn</b> [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup> Radon						



## ■ Silício tipo N



## ■ Silício tipo P



## ■ Portadores majoritários e minoritários:

⇒ A dopagem altera a concentração de portadores.

⇒ Concentração de doadores,  $N_D$ ; aceitadores,  $N_A$ .

⇒ Tipo N:

$$N_D = 1 \times 10^{18} / \text{cm}^3, n \cong 1 \times 10^{18} / \text{cm}^3, n_i = 1 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

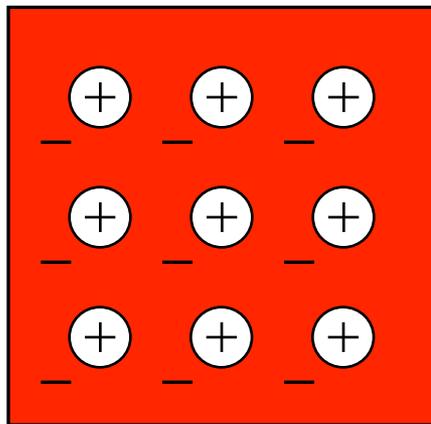
$$p = n_i^2 / n = 1 \times 10^{20} / 1 \times 10^{18} = 1 \times 10^2 / \text{cm}^3$$

⇒ Portadores majoritários possuem maior concentração, exemplo, tipo N - elétrons, tipo P - buracos.

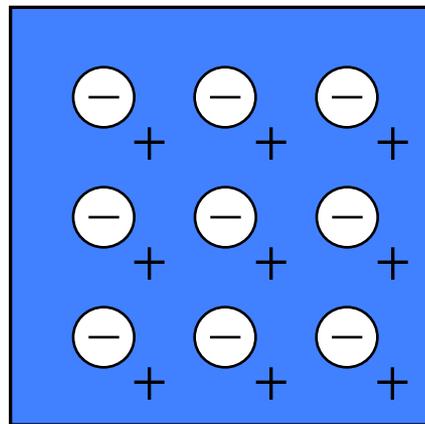
⇒ Portadores minoritários possuem menor concentração, exemplo, tipo N - buracos, tipo P - elétrons.



- Uma junção P-N é formada pela união de dois semicondutores, um tipo P e outro N.



Tipo N

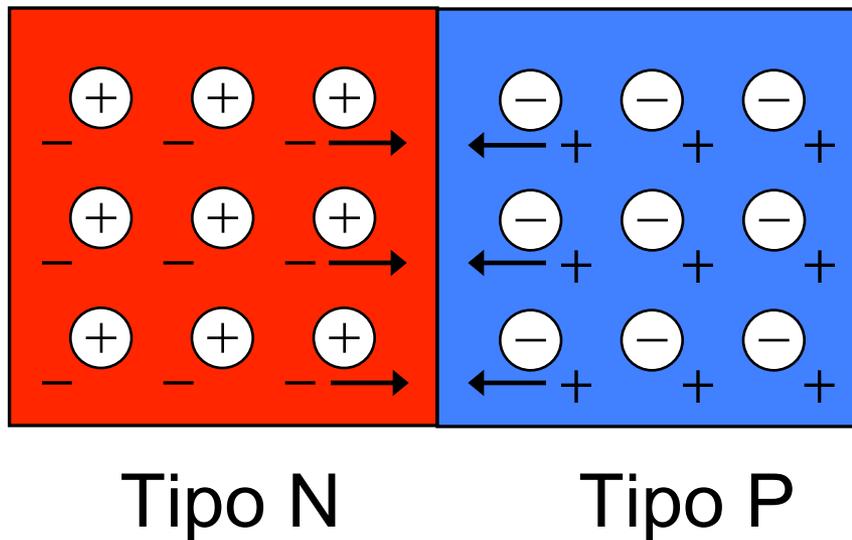


Tipo P

- ⊖ - Íon negativo
- ⊕ - Íon positivo
- - Elétron livre
- + - Buraco livre



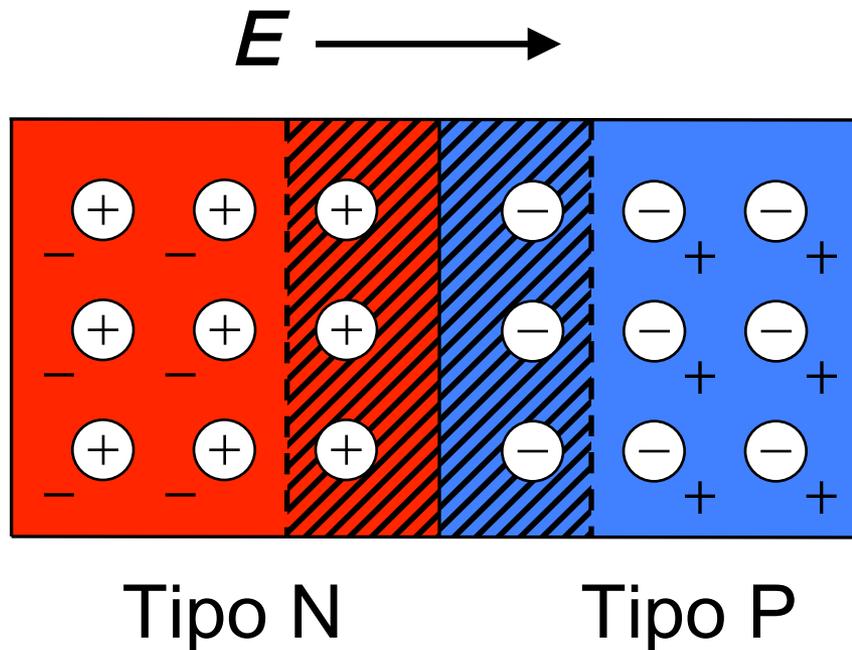
- As cargas livres movimentam-se próximo à junção.



**Junção P-N**



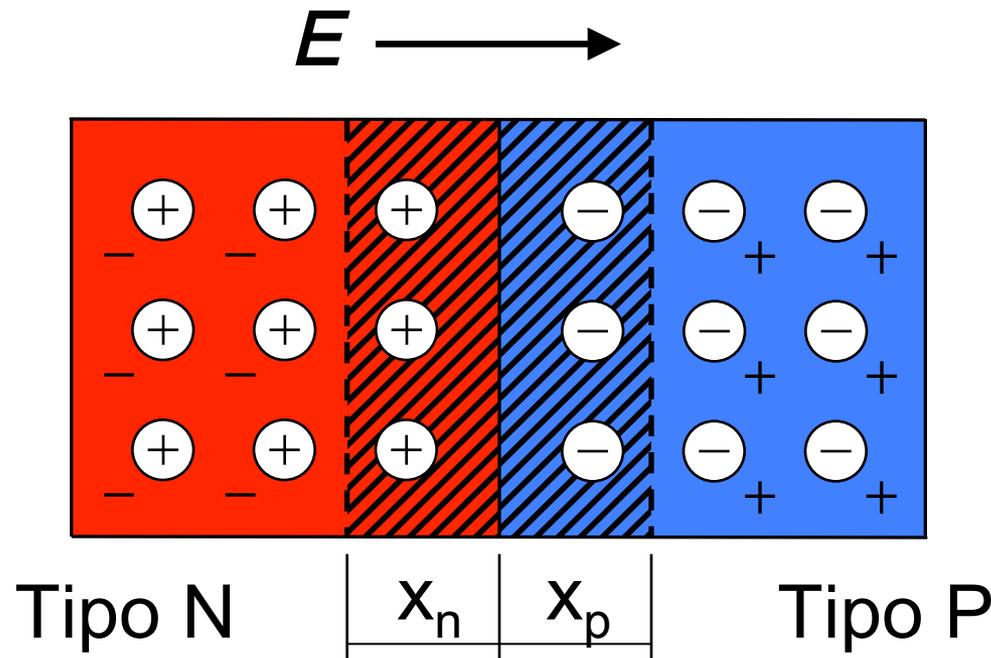
- É formado um campo elétrico que impede este movimento.



## Junção P-N



- A região onde o campo foi formado não possui cargas livres, e é chamada de região de depleção.



$$N_D x_n = N_A x_p$$

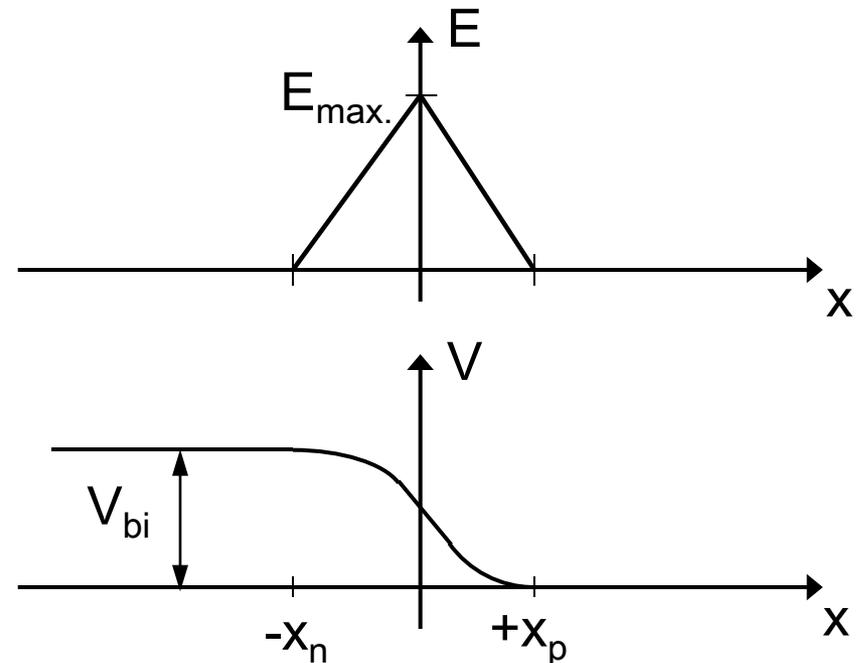
$$W = x_n + x_p$$

**Junção P-N**



- O campo elétrico da região de depleção cria uma diferença de potencial,  $V_{bi}$ , entre os dois lados da junção.
- Tipicamente  $V_{bi}$  possui valores entre 0,2V e 1,5V.
- $V_{bi}$  diminui cerca de 2,5mV/K com o aumento da temperatura.

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$



## Junção P-N



- A região de depleção possui uma capacitância:

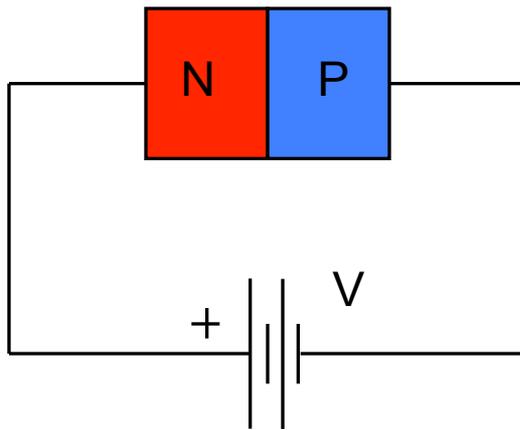
$$C = \epsilon_s \frac{A}{W} \quad W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}}$$

$$C = A \sqrt{\frac{q\epsilon_s}{2V_{bi}} \left( \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right)}$$

$\epsilon_s = 1,05 \times 10^{-10}$  F/m, para o silício.

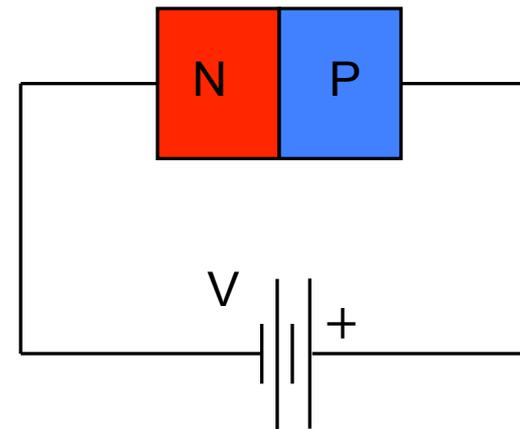


- Um potencial externo aplicado ao diodo irá somar-se ou subtrair-se ao potencial intrínseco da junção.



Polarização reversa

$$V_{bi} + V$$



Polarização direta

$$V_{bi} - V$$



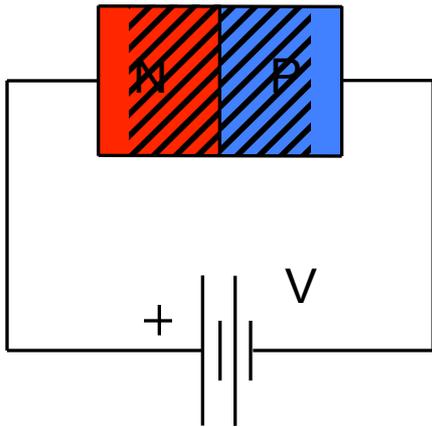
- A largura da região de depleção e a capacitância da junção podem ser alteradas pelo potencial externo:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} \pm V)}$$

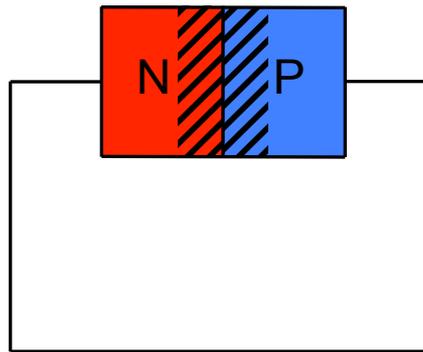
$$C = A \sqrt{\frac{q\epsilon_s}{2(V_{bi} \pm V)} \left( \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right)}$$



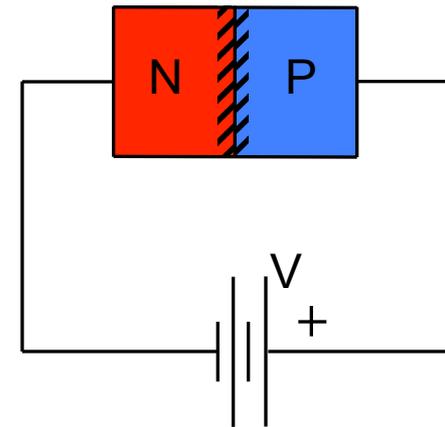
■ Largura da região de depleção:



Reversa  
 $W > W_0$



Sem polarização  
 $W = W_0$



Direta  
 $W < W_0$

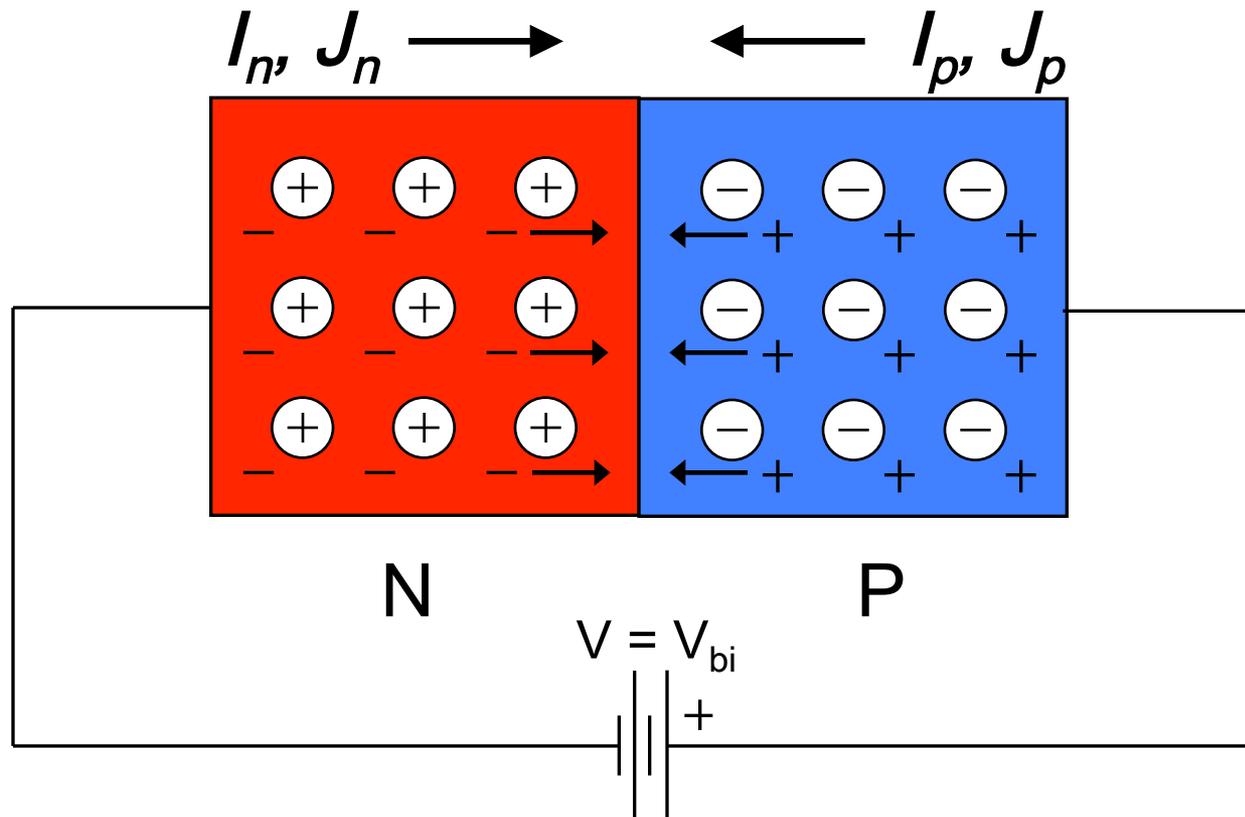


## ■ Retificação de corrente pela junção P-N:

- ◆ **Polarização reversa**  $\Rightarrow$  largura da depleção aumenta. **Fluxo de corrente é zero.**
- ◆ **Polarização direta**  $\Rightarrow$  para um potencial  $V$  suficientemente alto, a largura da depleção é zero. Neste caso, elétrons no lado N são injetados no lado P, enquanto que buracos são injetados do lado P para o N  $\Rightarrow$  **Fluxo de corrente diferente de zero.** Ocorre recombinação em ambos os lados da junção.



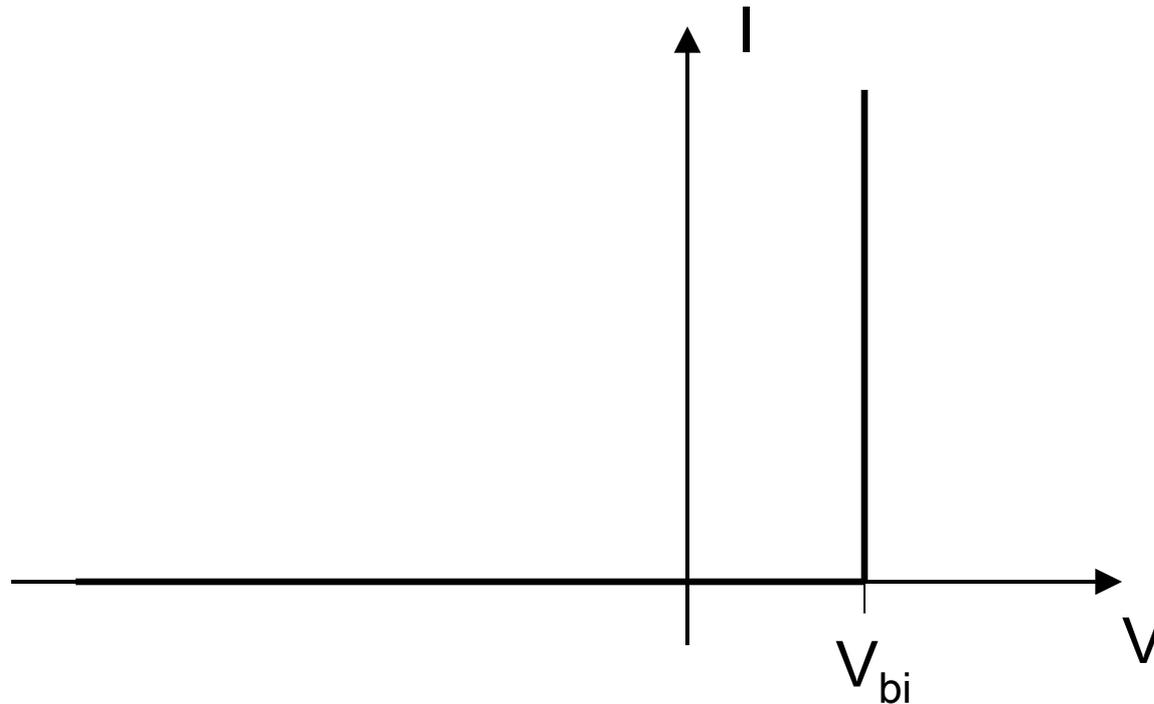
■ Retificação de corrente pela junção P-N (cont.):



Junção P-N



■ Retificação de corrente pela junção P-N (cont.):  
Curvas características:



**Junção P-N**



## ■ Modelo de Shockley:

- ◆ A corrente em polarização direta varia exponencialmente com a tensão aplicada.
- ◆ No sentido reverso, uma pequena corrente constante circula pelo diodo  $\Rightarrow$  corrente de saturação,  $I_S$ .

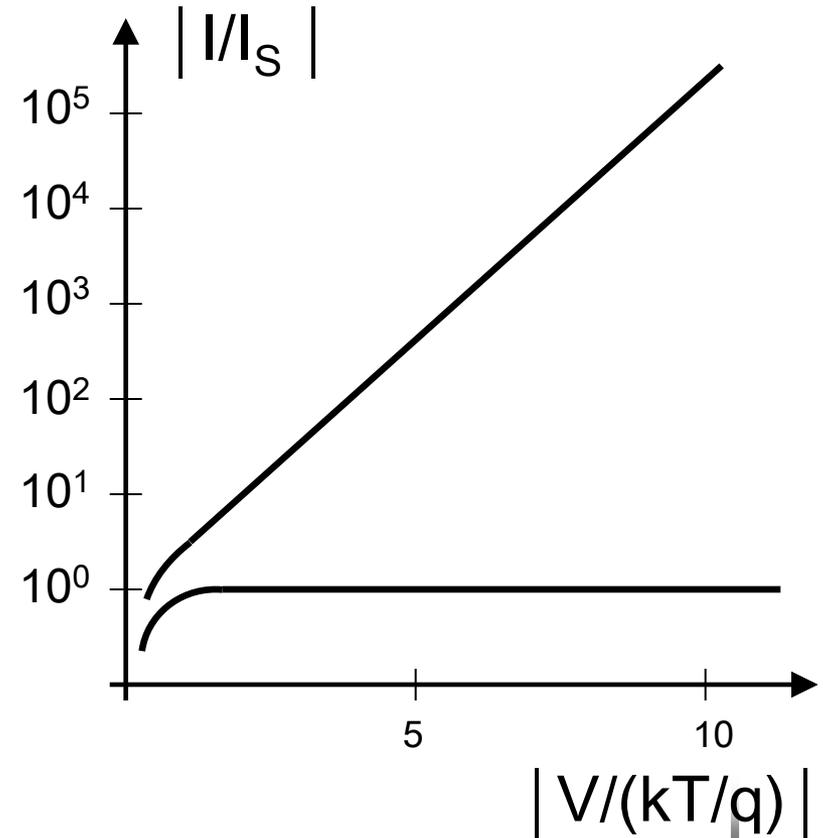
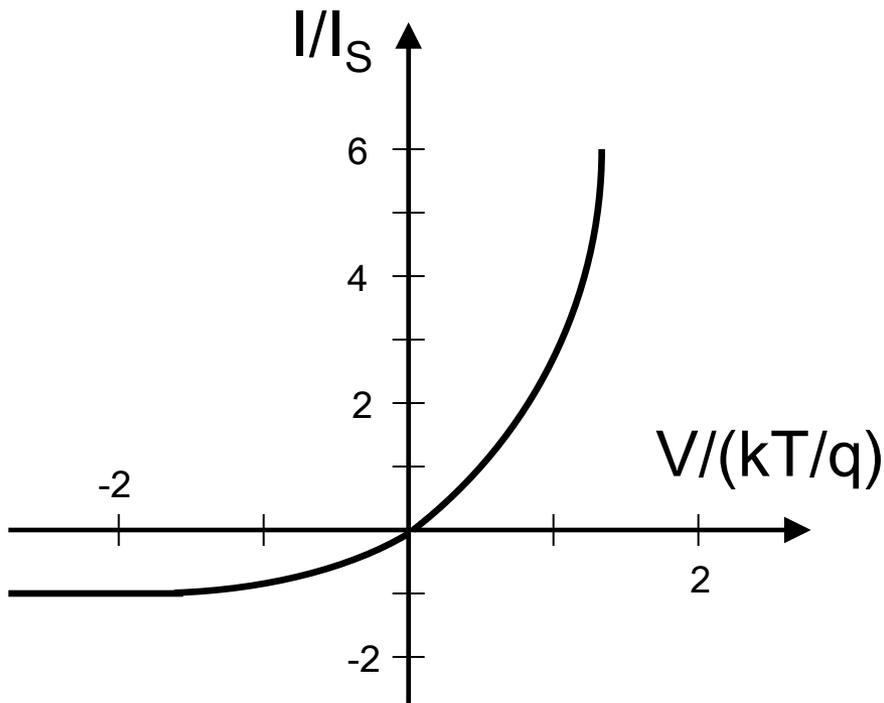
$$I = I_S \left( e^{qV/kT} - 1 \right)$$

para  $V < 0$  (reverso),  $I = I_S$

para  $V > 0$  (direto),  $I = I_S e^{qV/kT}$



■ Modelo de Shockley (cont.):  
Curvas características:



**Junção P-N**



## ■ Efeito de alta injeção:

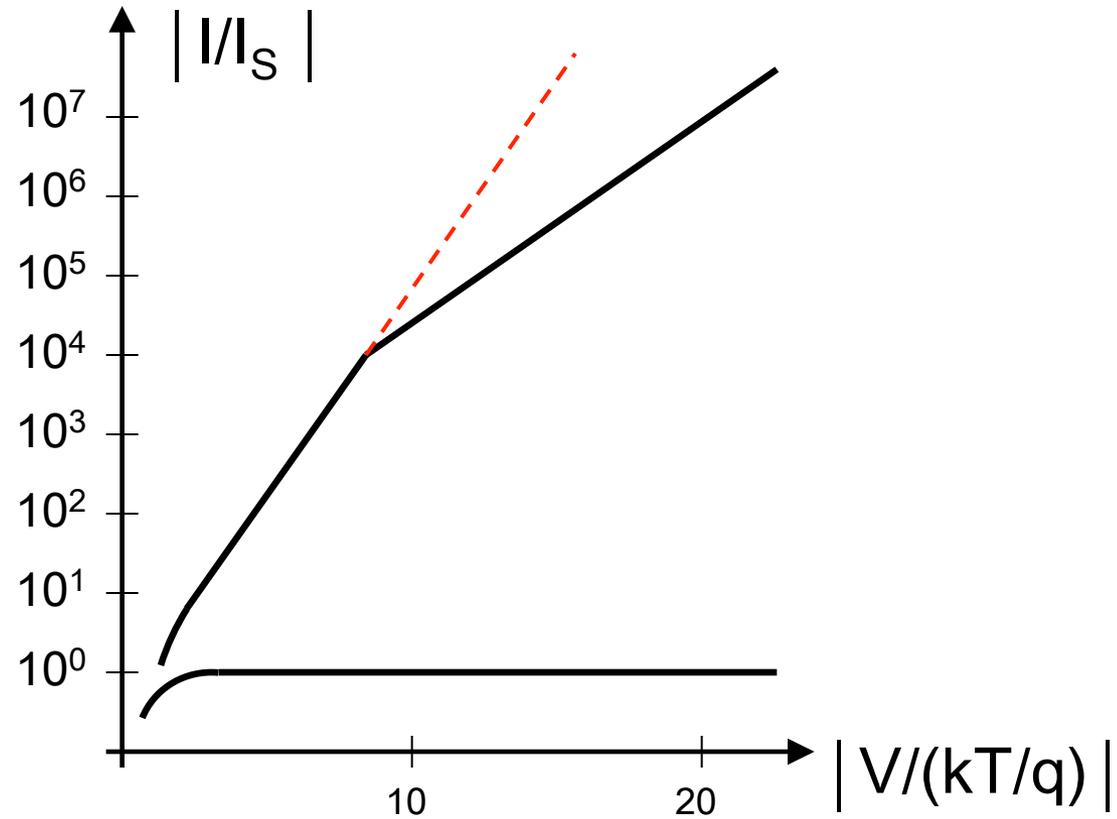
- ◆ Para tensões de polarização direta suficientemente altas, a concentração de portadores em ambos os lados da junção fica maior que o valor de equilíbrio,  $n p > n_i^2$ .
- ◆ A corrente direta passa a ter menor variação com a tensão direta.

$$I = I_s \left( e^{qV/2kT} - 1 \right)$$

- ◆ A alta injeção ocorre para densidades de corrente maiores que  $1000\text{A}/\text{cm}^2$ .



■ Efeito de alta injeção:  
Curvas características:

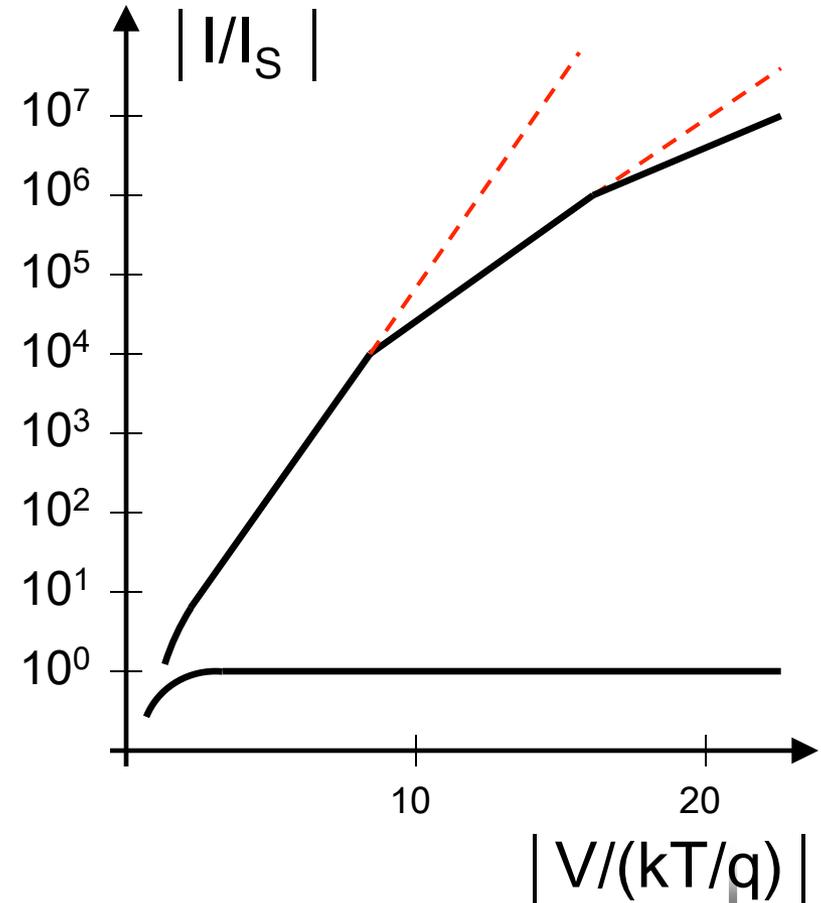


**Junção P-N**



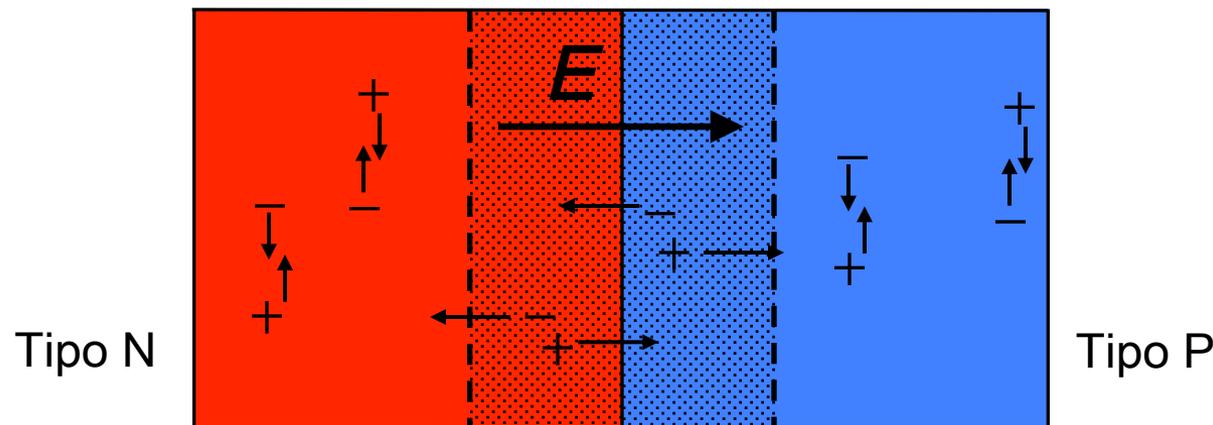
■ Efeito da resistência série:

- ◆ Correntes muito altas pelo diodo causam queda de potencial nas resistências parasitas do diodo.



## ■ Corrente reversa:

- ◆ Portadores de corrente são gerados termicamente no semicondutor.
- ◆ Defeitos são responsáveis pela geração de portadores.
- ◆ O campo elétrico da junção separa os portadores gerados na região de depleção.
- ◆ Fora da região ocorre recombinação.



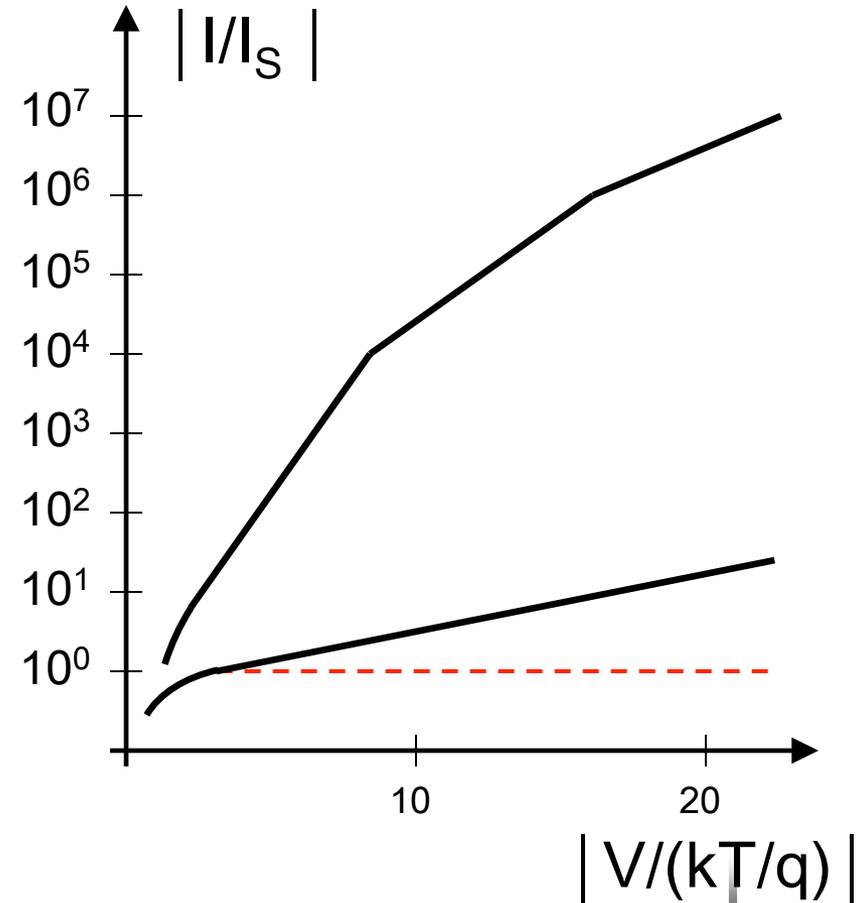
**Junção P-N**



■ Corrente reversa:

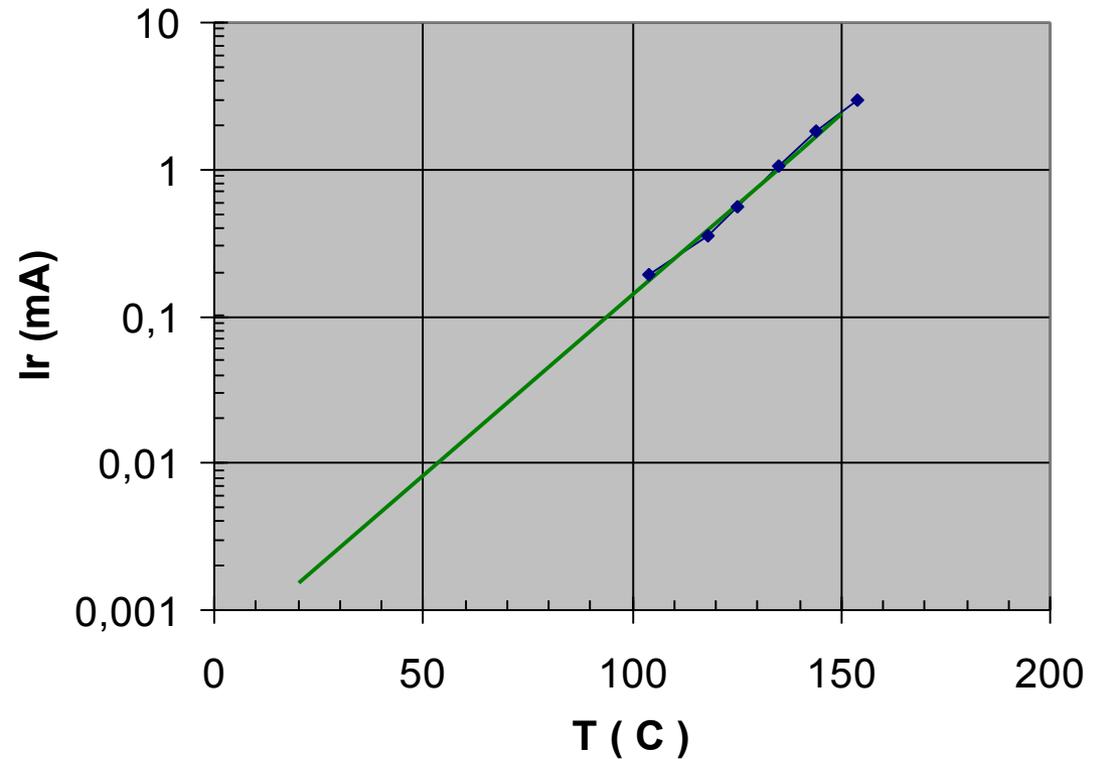
- ◆ A corrente é proporcional ao volume da região de depleção:

$$I \propto \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} \pm V)}$$



■ Corrente reversa:

- ◆ A corrente reversa dobra para cada aumento da temperatura de cerca de 12 a 14°C.



## ■ Ruptura da junção em polarização reversa:

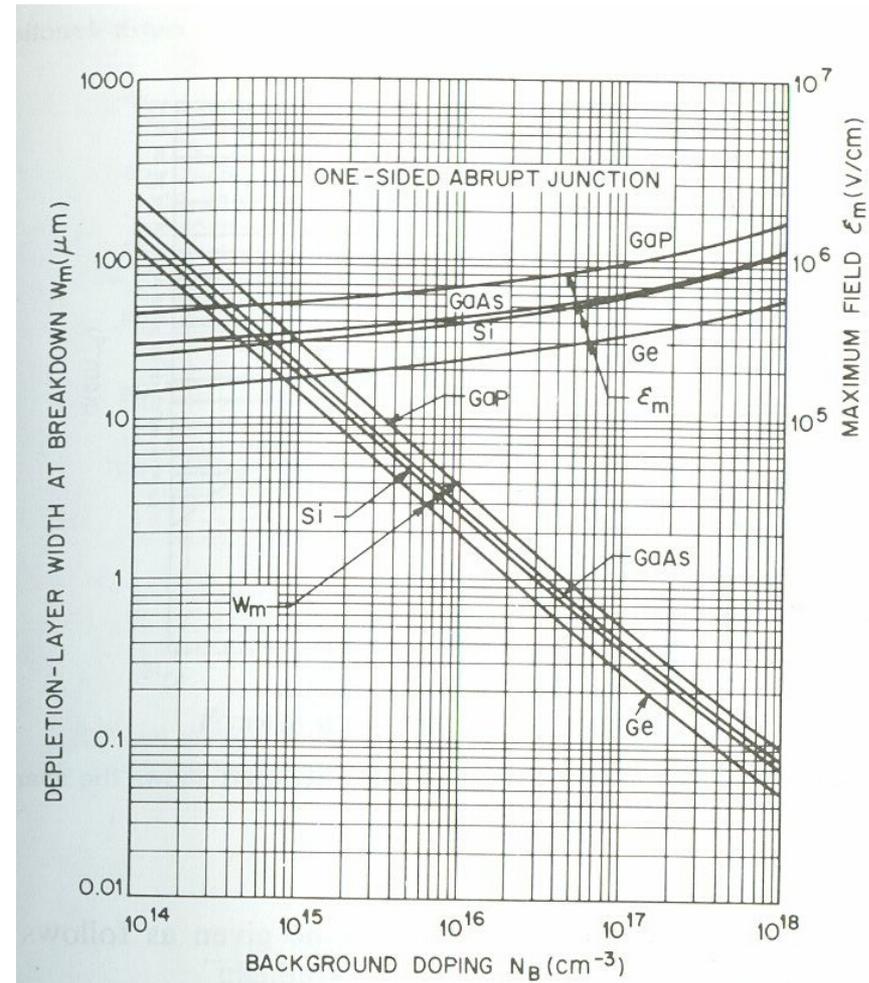
- ◆ O aumento do potencial de polarização reversa aumenta o campo elétrico na junção:

$$E_{\max} = \frac{2(V_{bi} + V)}{W} = \sqrt{\frac{2q}{\epsilon_s} \left( \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) (V_{bi} + V)}$$



■ Ruptura da junção em polarização reversa (cont.):

- ◆ O silício suporta um máximo campo na faixa de  $2 \times 10^5$  a  $1 \times 10^6$  V/cm antes de entrar em ruptura dielétrica.



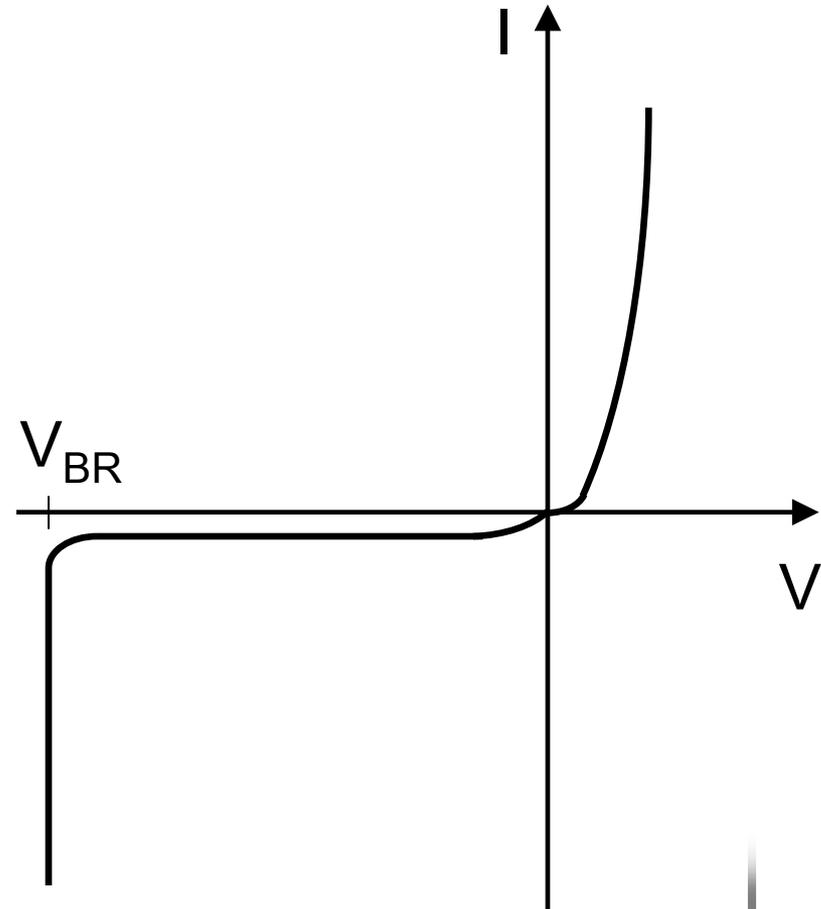
**Junção P-N**



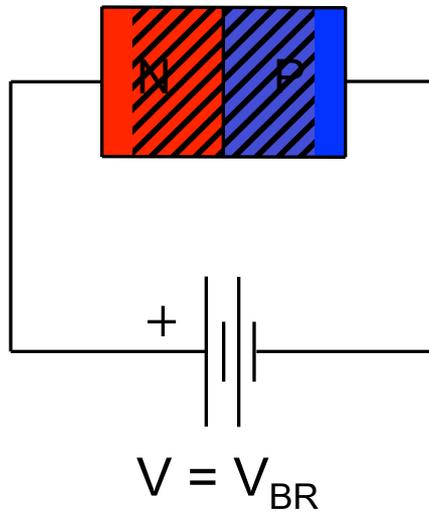
- Ruptura da junção em polarização reversa (cont.):
  - ◆ Na ruptura portadores livres são gerados por ionização.
  - ◆ Estes portadores são acelerados pelo campo elétrico e sofrem choques com os átomos do cristal.
  - ◆ Nos choques novos portadores são gerados  
⇒ efeito avalanche.



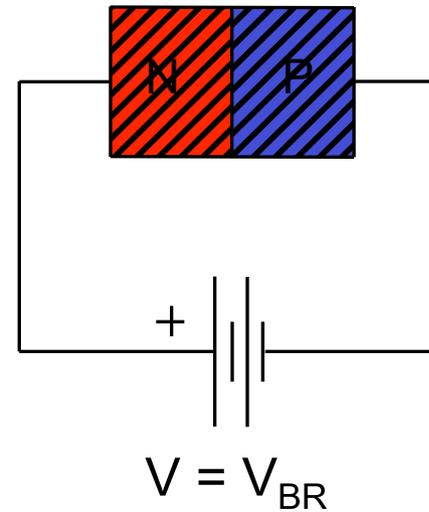
- A corrente pelo diodo aumenta rapidamente na ruptura. Na ruptura a tensão sobre o diodo é constante,  $V_{BR}$  (tensão de “breakdown”).
- Tensões de ruptura variam de 3V a mais de 5000V.
- Ruptura também pode ocorrer através de tunelamento.



- Na ruptura a região de depleção pode se estender ou não por todo o diodo.

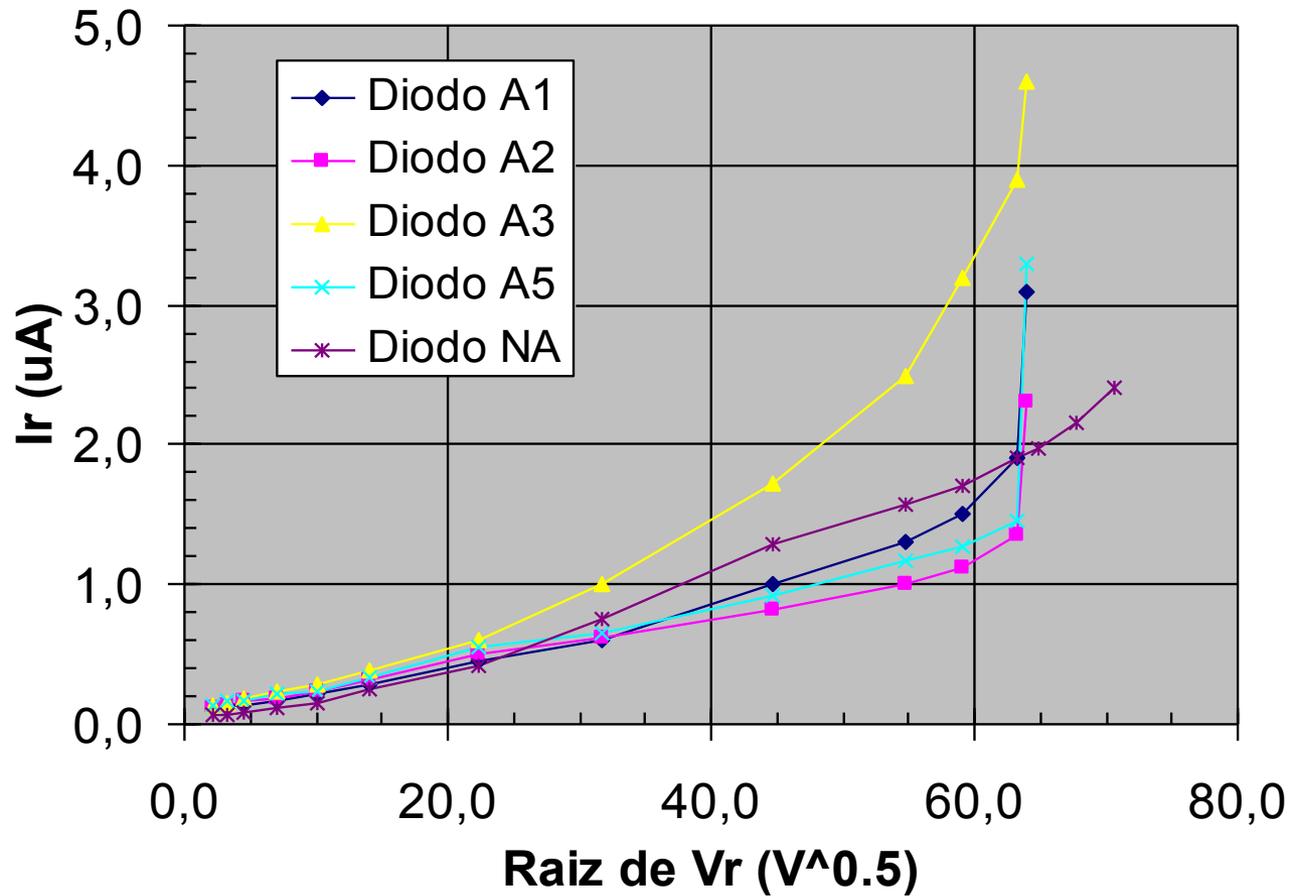


Avalanche



“Punch-through”





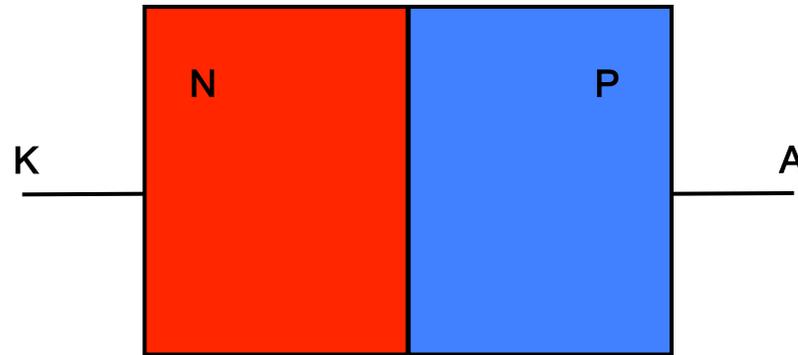
**Junção P-N**



- Existem vários tipos de diodos, cada um construído para um tipo específico de aplicação:
  - ◆ Diodos retificadores
  - ◆ Diodos retificadores de avalanche
  - ◆ Diodos de referência de tensão, ou tipo Zener
  - ◆ Diodos de capacitância variável
  - ◆ Diodos tipo Schottky

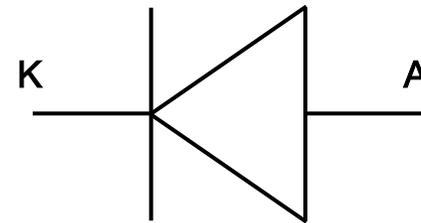


## ■ Simbologia:



Catodo

Anodo



Catodo

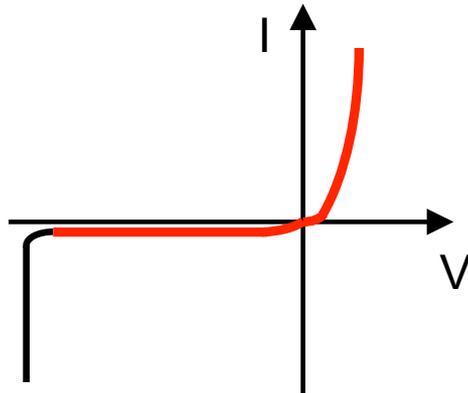
Anodo

## Tipos de Diodos Semicondutores



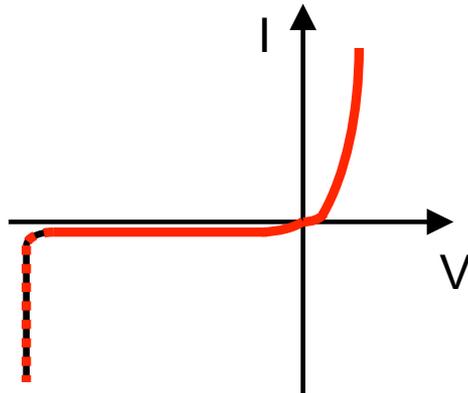
## ■ Retificadores

- ◆ Suportam altas correntes em polarização direta, de 1A até cerca de 1000A.
- ◆ Tensão de ruptura de 50V a 5000V.
- ◆ Não podem entrar em condução reversa.
- ◆ Dissipam alta potência.
- ◆ São fabricados com baixas concentrações de impurezas, n e p.



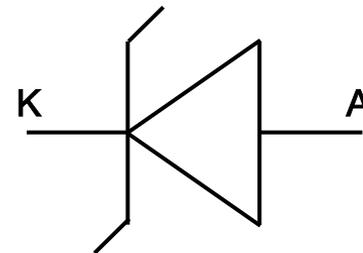
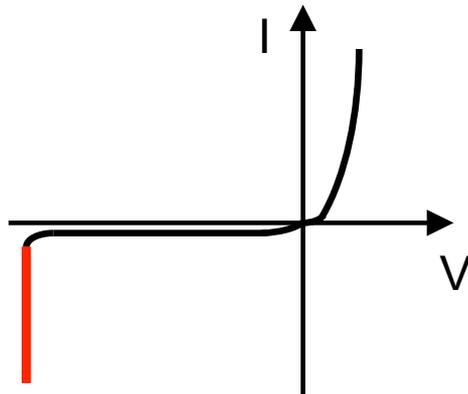
## ■ Retificadores de avalanche

- ◆ Suportam altas correntes em polarização direta, de 1A até cerca de 1000A.
- ◆ Tensão de ruptura de 50V a 5000V.
- ◆ Podem entrar em condução reversa por períodos curtos de tempo.
- ◆ São fabricados com baixas concentrações de impurezas, n e p, e com lâminas espessas.



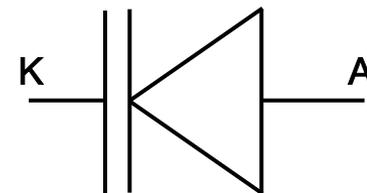
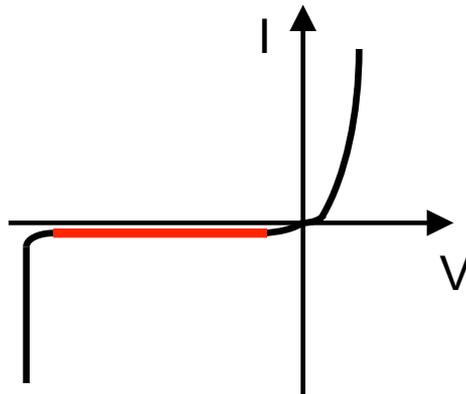
## ■ Diodos de referência de tensão ou Zener

- ◆ Trabalham polarizados reversamente, em ruptura.
- ◆ Correntes máximas de 1A a 10A.
- ◆ Tensão de ruptura de entre 3V e 200V.
- ◆ São fabricados com camadas de média concentrações de impurezas.



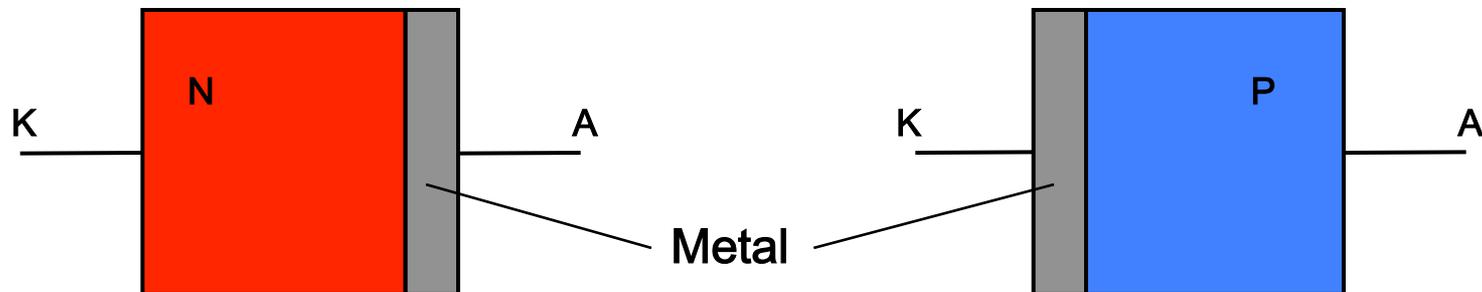
## ■ Diodos de capacitância variável

- ◆ São fabricados com altas concentrações de impurezas, n e p - maior capacitância.
- ◆ Operam em polarização reversa, antes da ruptura.
- ◆ Possuem baixa tensão de ruptura.
- ◆ Usados em circuitos ressonantes para sintonia.

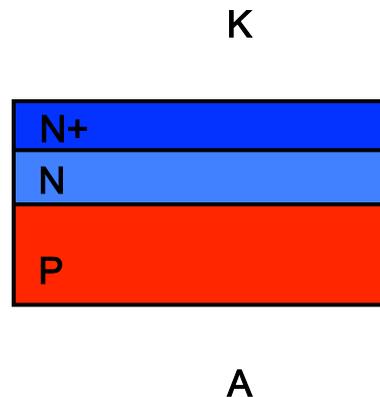


## ■ Diodos Schottky

- ◆ São diodos extremamente rápidos, usados em alta frequência.
- ◆ Fabricados apenas com um tipo de semicondutor, p ou n.
- ◆ A junção é formada por um contato metal-semicondutor.
- ◆ Possuem baixa tensão de ruptura.



- As camadas N e P são obtidas por difusão, partindo-se geralmente de uma lâmina tipo N.
- É difundida uma camada N de alta dopagem para o contato de catodo.

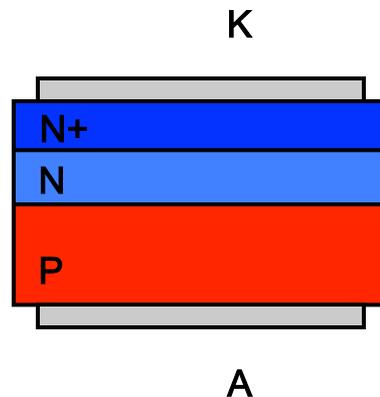


■ Diodo

## Fabricação de Diodos de Potência



- Após a difusão são feitos contatos metálicos para as camadas de catodo, anodo.

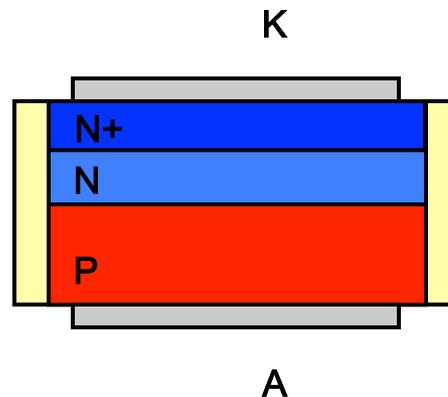


■ Diodo

## Fabricação de Diodos de Potência



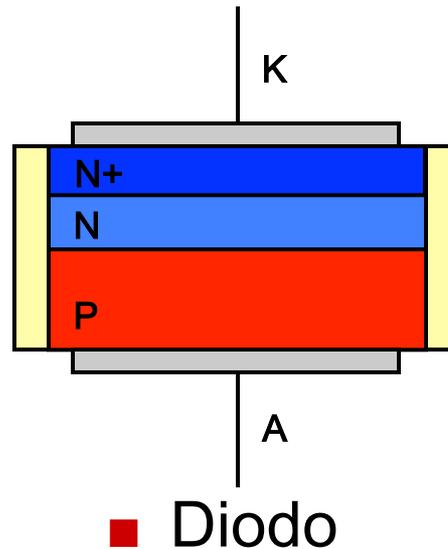
- O próximo passo é “passivar” as junções, evitando que circulem correntes de fuga pela superfície do silício.
- O material para passivação pode ser vidro ou um polímero do tipo silicone ou poliamida.



■ Diodo

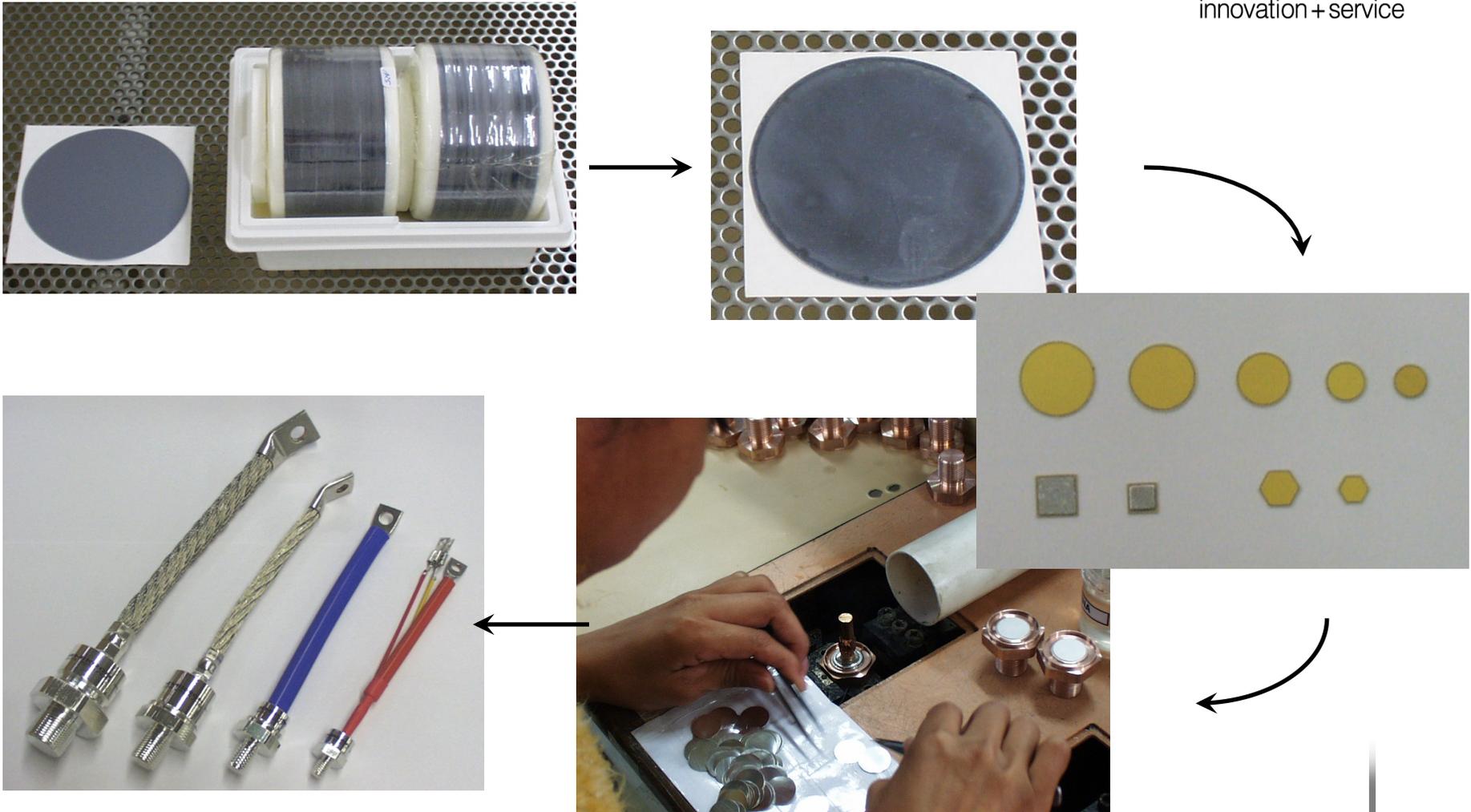


- Por fim são soldados os terminais e o chip é encapsulado.



## Fabricação de Diodos de Potência





## Fabricação de Diodos de Potência



## ■ Referências:

- ◆ *Physics of Semiconductor Devices*, S. M. Sze, 2<sup>a</sup> edição, Editora John Wiley & Sons, New York, 1981.
- ◆ *Solid State Physics*, N. W. Ashcroft e N. D. Mermin, Editora Holt, Rinehart and Winston, New York, 1976.





Obrigado!

