

LOM3206 – ELETRÔNICA

AULA 3

Prof. Dr. Emerson G. Melo

☐ Materiais Semicondutores;

☐ Diodo Semicondutor;

- ☐ Modos de Operação;
- ☐ Curva Característica;
- ☐ Região Zener;
- ☐ Níveis de Resistência;
- ☐ Circuito Equivalente;
- ☐ Capacitância;
- ☐ Tempo de Recuperação Reversa;
- ☐ Outros Tipos de Diodos.

☐ Exercícios Propostos.

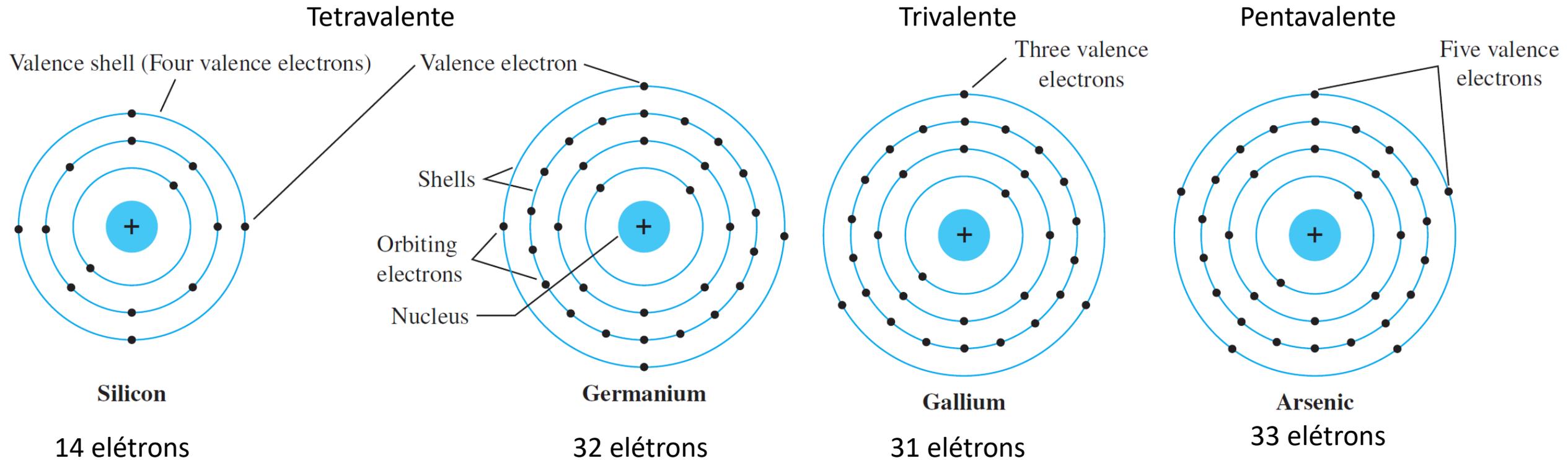
- ❑ Materiais que possuem condutividade elétrica com valores intermediários entre os condutores e os isolantes.

QUADRO 1.1 Valores de Resistividade Típicos

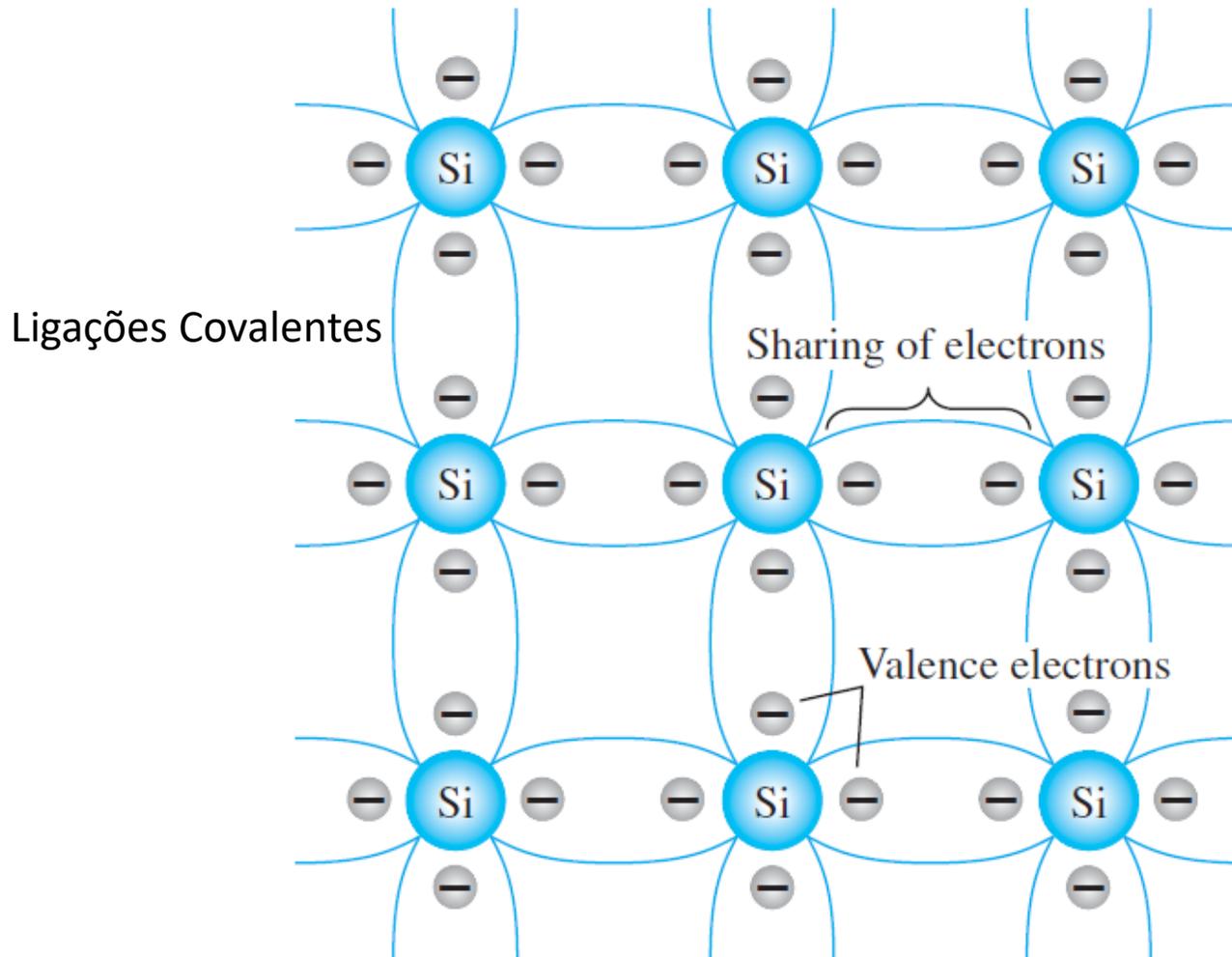
<i>Condutor</i>	<i>Semicondutor</i>	<i>Isolante</i>
$\rho \cong 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ (cobre)	$\rho \cong 50 \Omega\text{-cm}$ (germânio) $\rho \cong 50 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ (silício)	$\rho \cong 10^{12} \Omega\text{-cm}$ (mica)

- ❑ Materiais Semicondutores mais utilizados em dispositivos eletrônicos:
 - ❑ Silício (Si)
 - ❑ Germânio (Ge)
 - ❑ Arseneto de Gálio (GaAs)

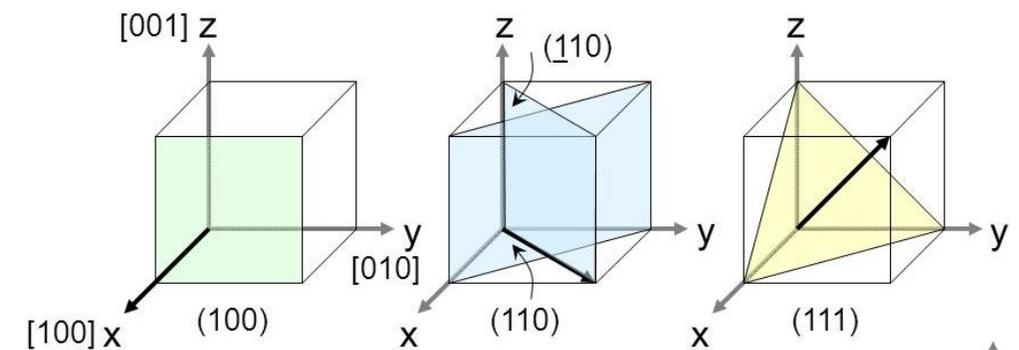
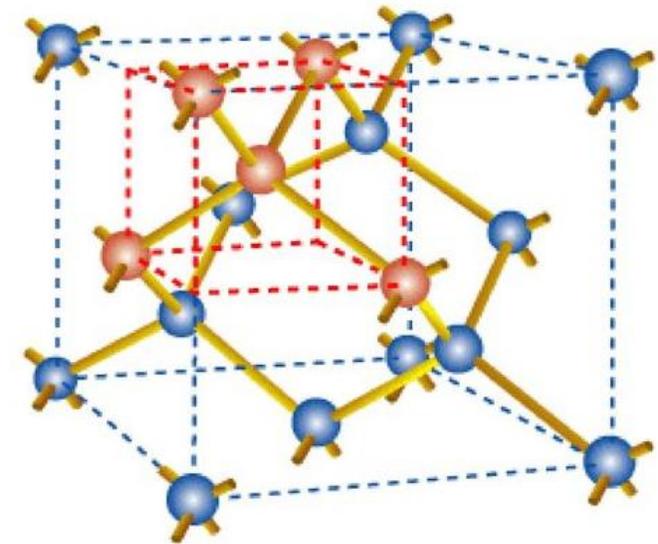
□ Estrutura atômica.



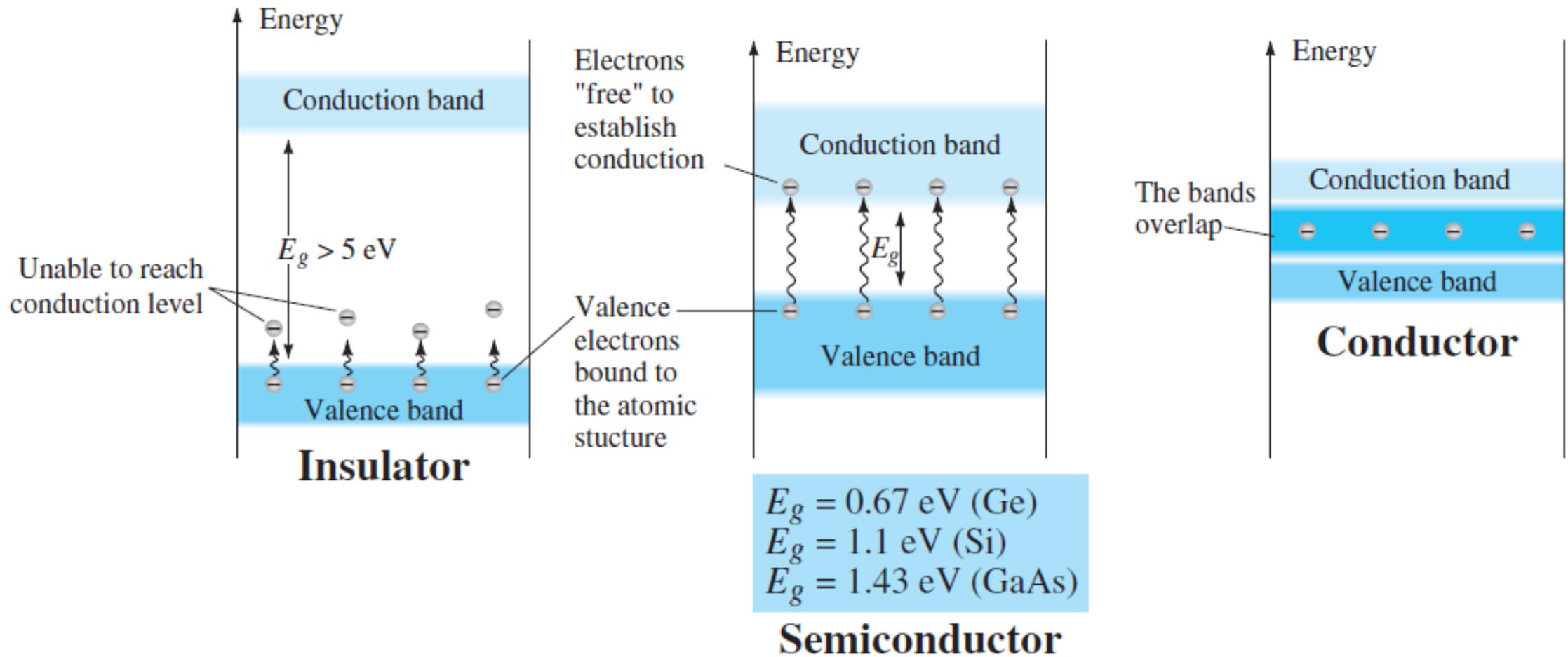
□ Estrutura atômica do Si.



Si e Ge – Diamante: FCC



□ Níveis de energia.



- ❑ Material intrínseco: semicondutor que foi cuidadosamente refinado para atingir níveis elevados de pureza (1:10.000.000.000).
- ❑ Portadores intrínsecos: elétrons livres em temperatura ambiente que foram promovidos para a banda de condução por efeitos naturais como calor e luz.

Concentração de portadores intrínsecos

Semiconductor	Intrinsic Carriers (per cubic centimeter)
GaAs	1.7×10^6
Si	1.5×10^{10}
Ge	2.5×10^{13}

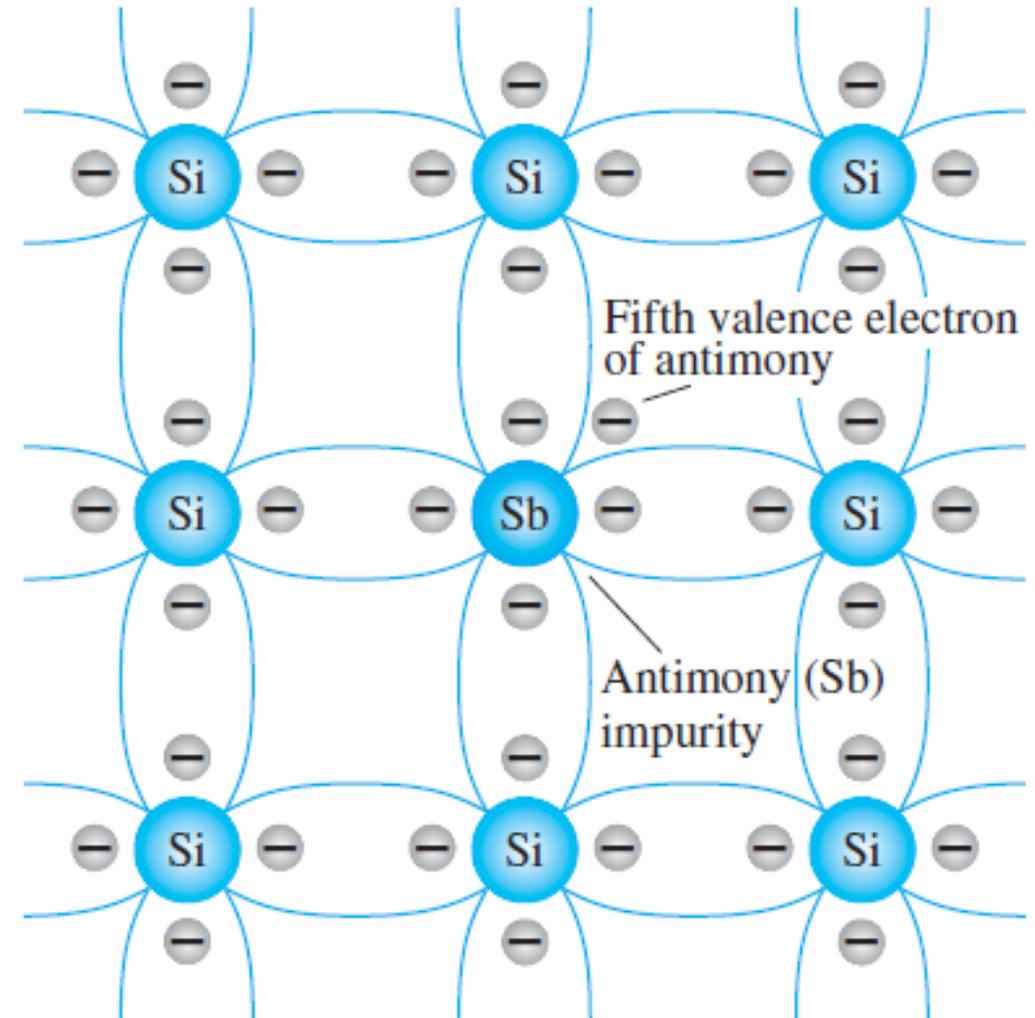
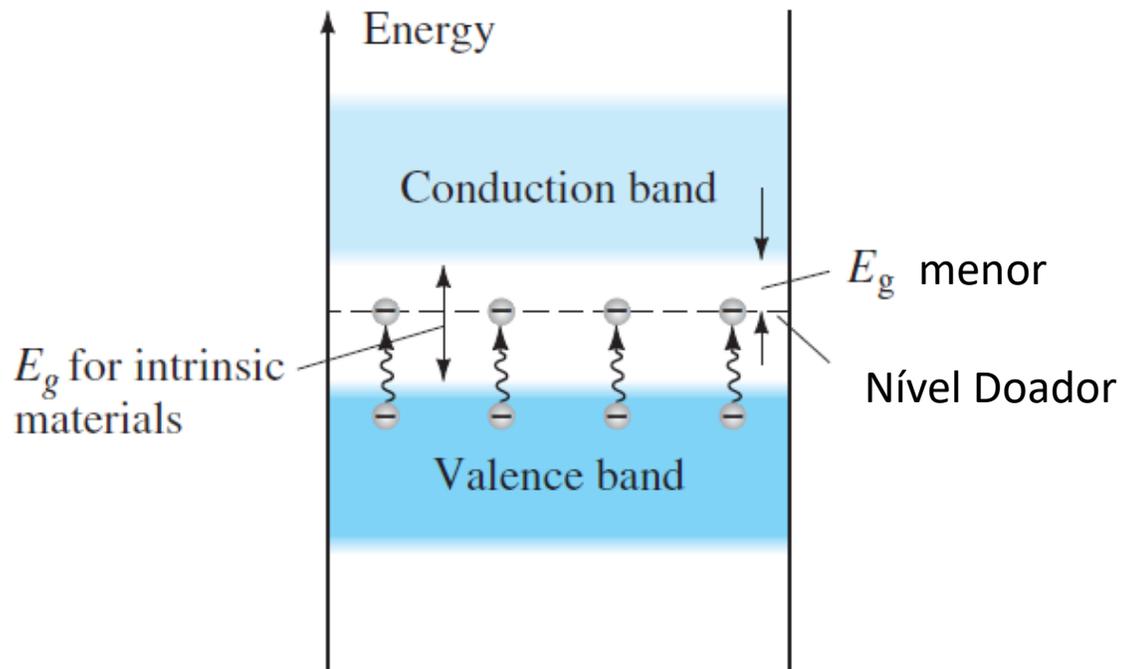
Mobilidade relativa

Semiconductor	μ_n (cm ² /V·s)
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

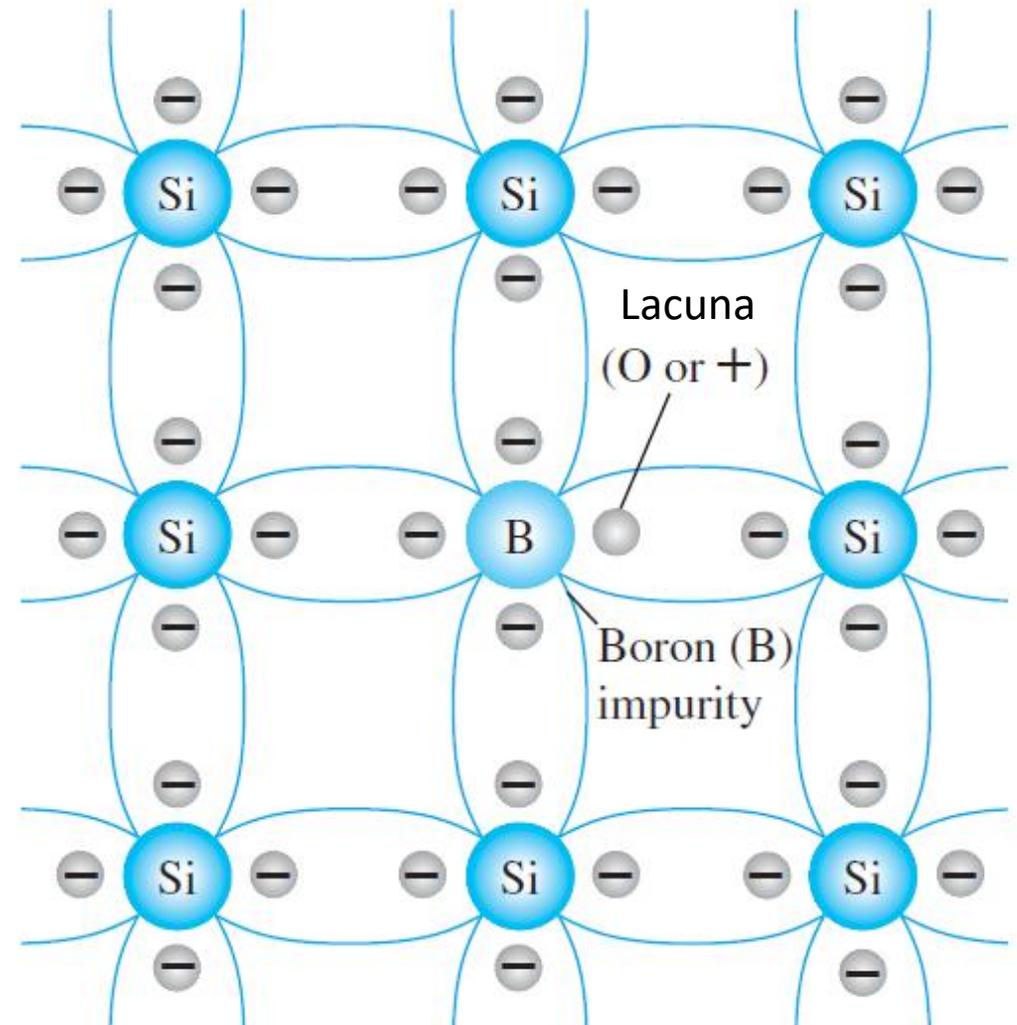
- ❑ A mobilidade relativa define a facilidade com que os portadores livres se deslocam através do semicondutor. Influencia no tempo de resposta do dispositivo.

- ❑ Material extrínseco: semicondutor que sofreu um processo de dopagem.
- ❑ Dopagem: adição de uma quantidade específica de átomos de impureza em um material intrínseco como Si ou Ge.
- ❑ A introdução de impurezas na ordem de 1:10.000.000 pode alterar profundamente os níveis de energia e alterar as propriedades elétricas do semicondutor.

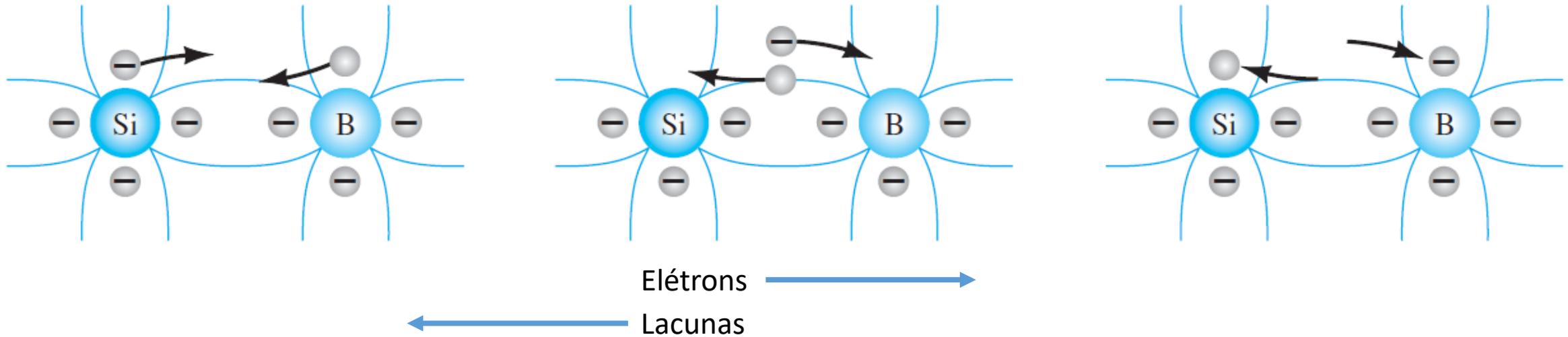
- Material tipo *n*.
- Introdução de impurezas DOADORAS (cinco elétrons de valência).
- Antimônio (Sb); Arsênio (As); Fósforo (P).



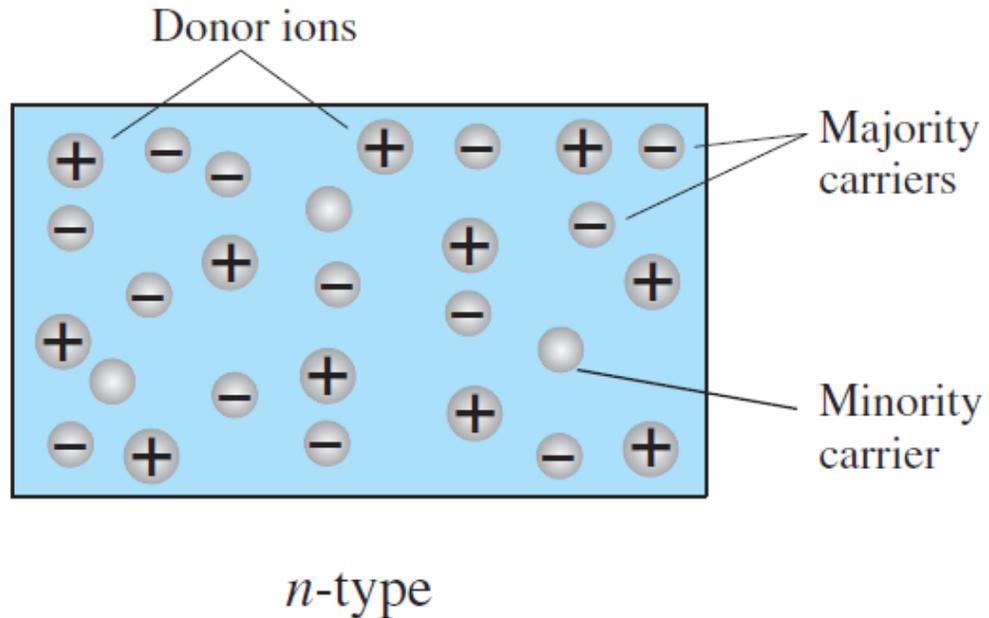
- ❑ Material tipo p .
- ❑ Introdução de impurezas ACEITADORAS (três elétrons de valência).
- ❑ Boro (B); Gálio (Ga); Índio (In).



□ Movimento de elétrons e lacunas.

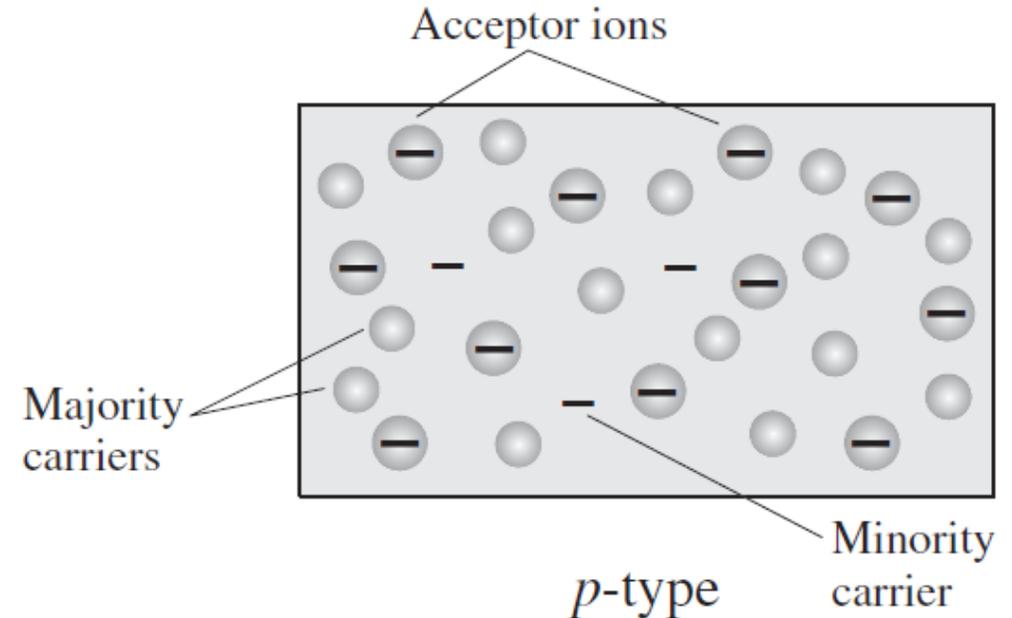


Portadores majoritários e minoritários.



Material tipo *n*:

- Elétrons: portadores majoritários
- Lacunas: portadores minoritários

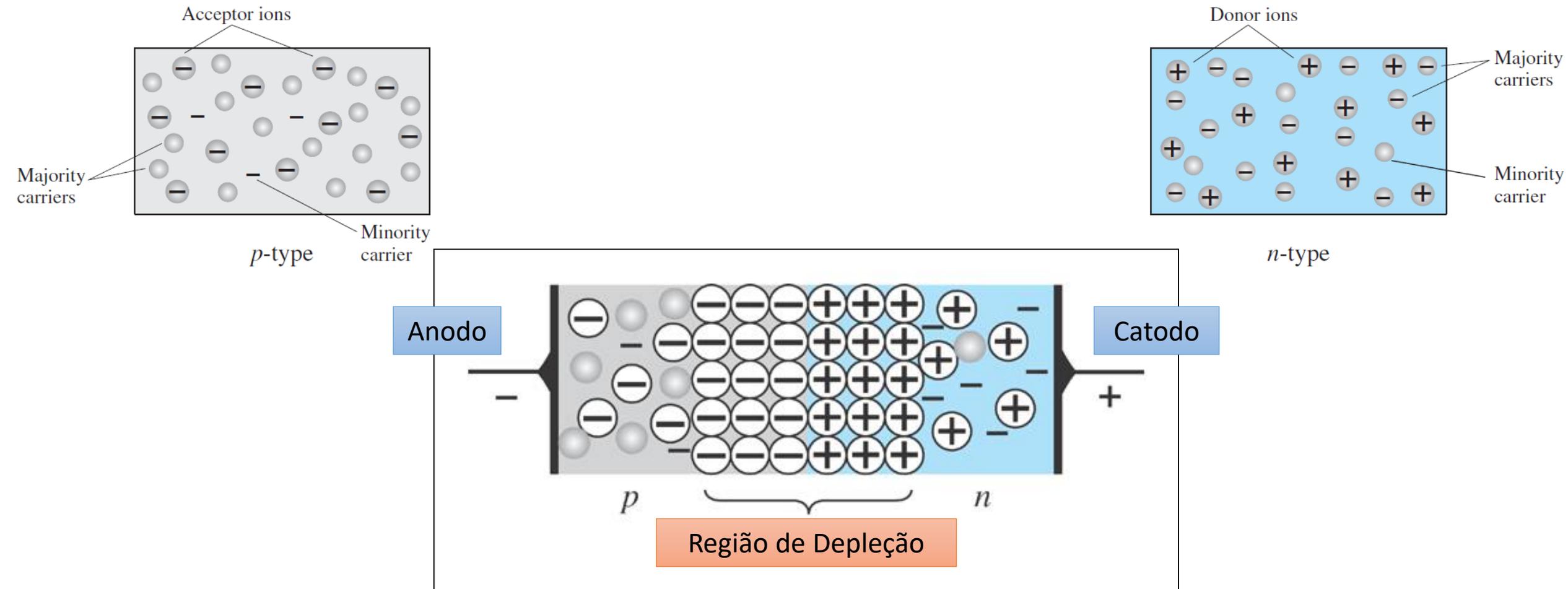


Material tipo *p*:

- Elétrons: portadores minoritários
- Lacunas: portadores majoritários

Diodo Semicondutor

Dispositivo eletrônico formado por uma junção *pn*.

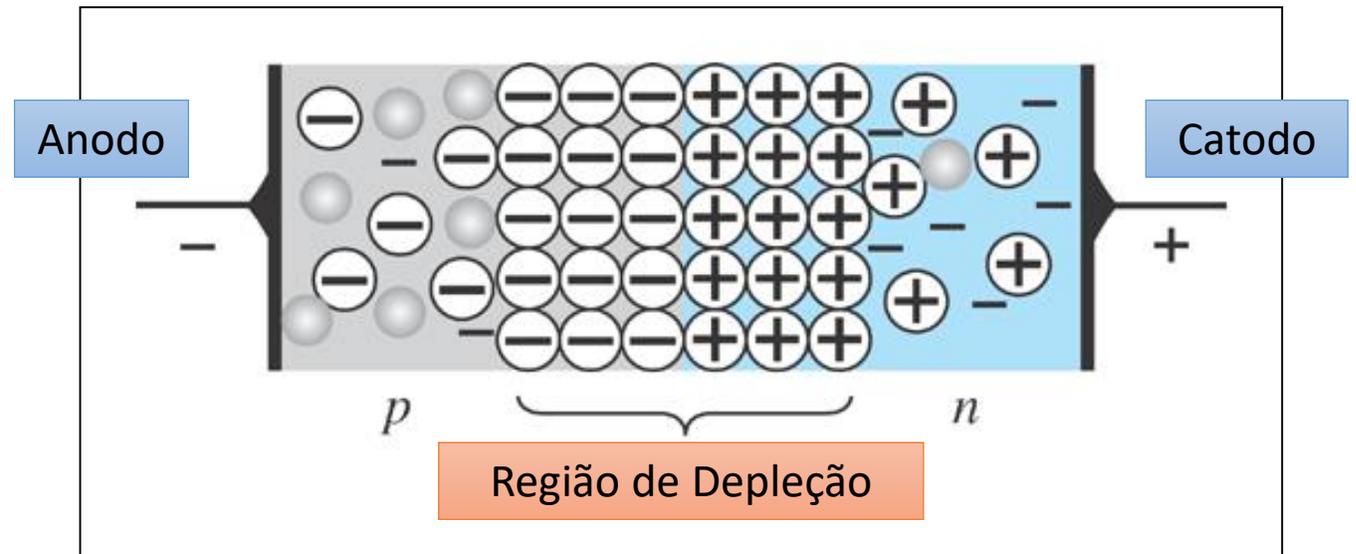
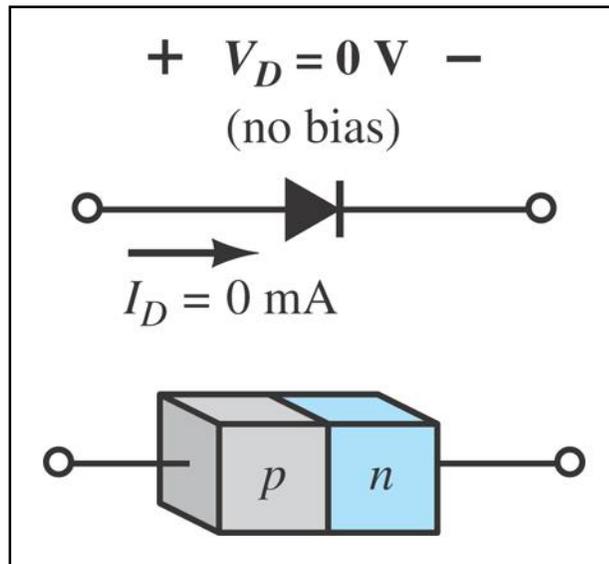


Modos de operação:

- Sem polarização;
- Polarização reversa;
- Polarização direta.

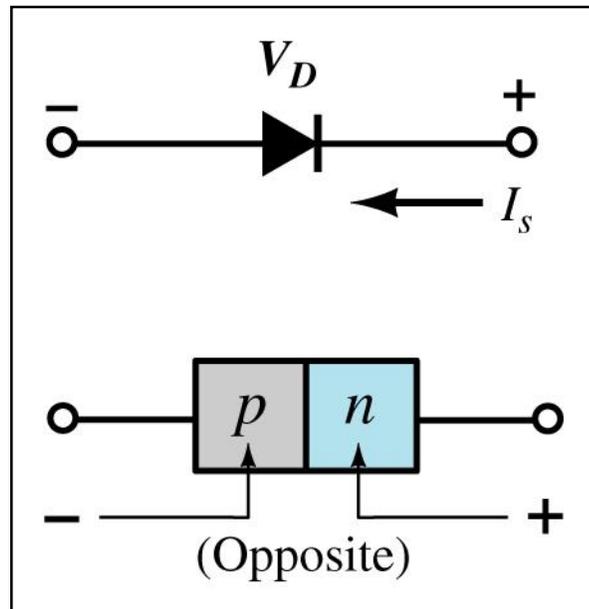
Diodo Semicondutor: Sem polarização

- ❑ Operação sem tensão aplicada entre anodo e catodo: $V_D = 0$ V.
- ❑ Não existe circulação de corrente: $I_D = 0$ A
- ❑ A região de depleção é mantida naturalmente.

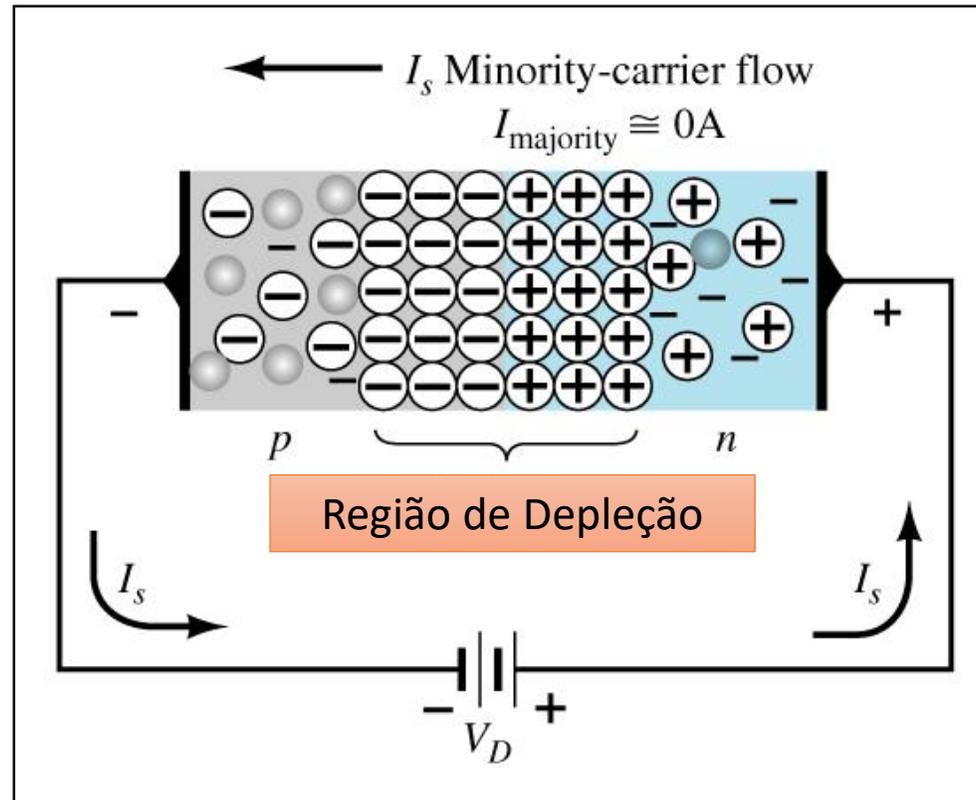


Diodo Semicondutor: Polarização Reversa

- ❑ As lacunas da região p são atraídas para o polo negativo e os elétrons da região n são atraídos para o polo positivo.
- ❑ A polarização reversa causa o AUMENTO da região de depleção.

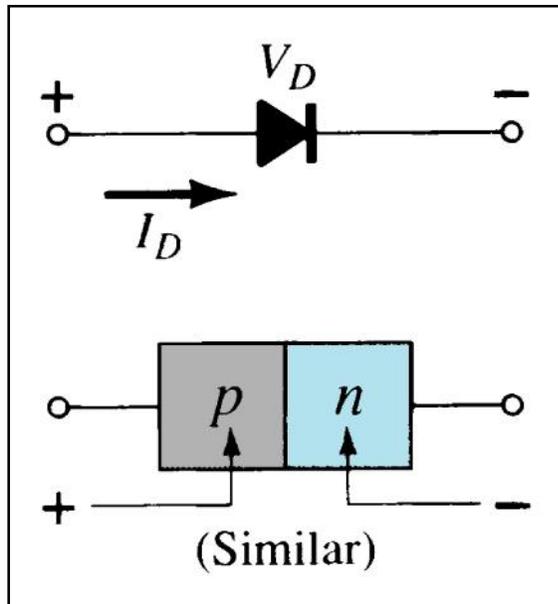


I_s = Corrente de Saturação Reversa

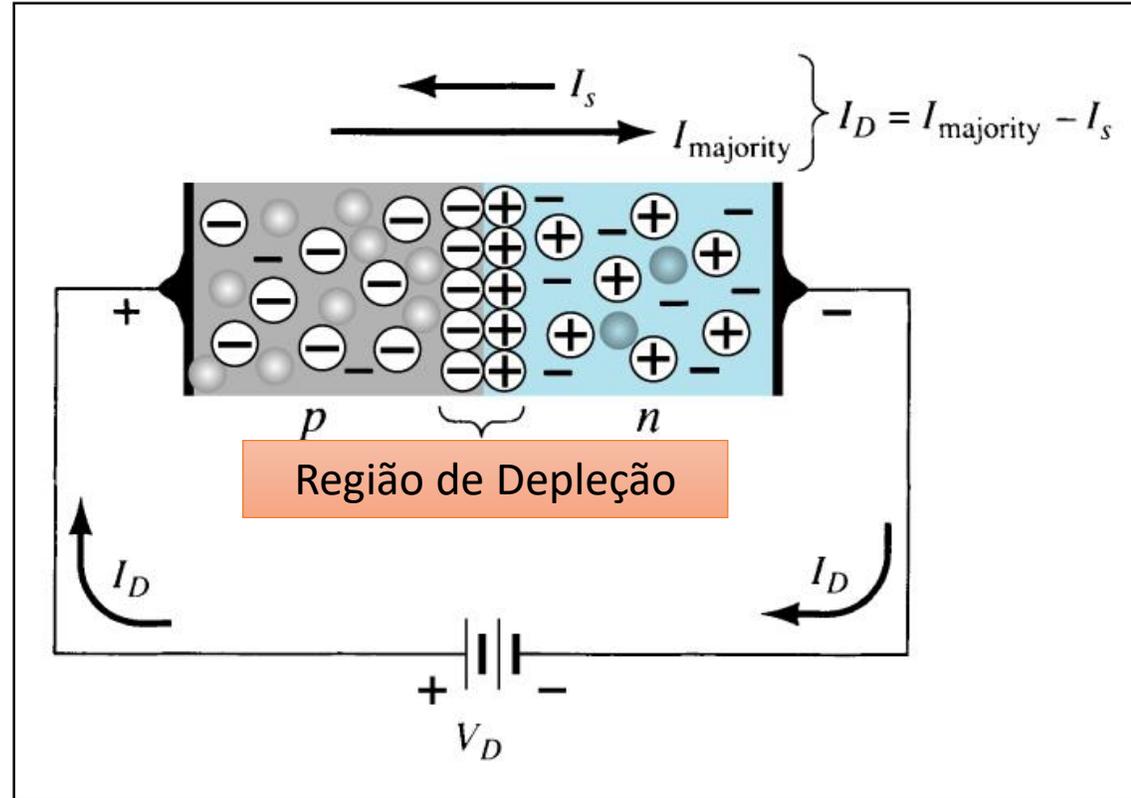


Diodo Semicondutor: Polarização Direta

- Os elétrons da região p são atraídos para o polo positivo e as lacunas da região n são preenchidas por elétrons do polo negativo.
- A polarização direta causa a DIMINUIÇÃO da região de depleção.

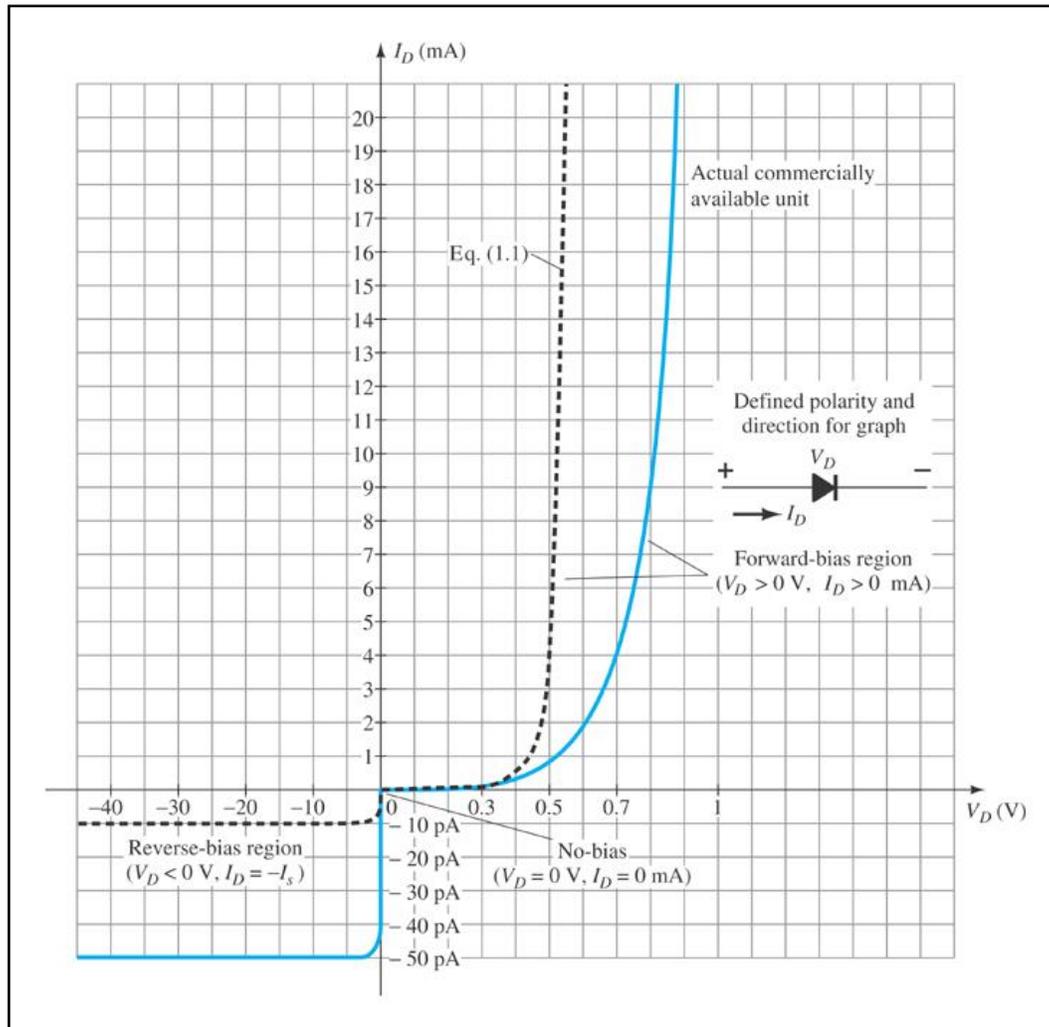


I_D = Corrente de Polarização Direta



Diodo Semicondutor: Curva Característica

Resumo da operação do diodo.



Equação de Shockley

$$I_D = I_s(e^{V_D/nV_T} - 1)$$

I_D = Corrente de Polarização Direta

I_s = Corrente de Saturação Reversa

V_D = Tensão de Polarização Direta

n = Fator de idealidade ($1 < n < 2$)

V_T = Tensão térmica: 25 mV à 25 °C

GaAs: $V_D \cong 1.2$ V

Si: $V_D \cong 0.7$ V

Ge: $V_D \cong 0.3$ V

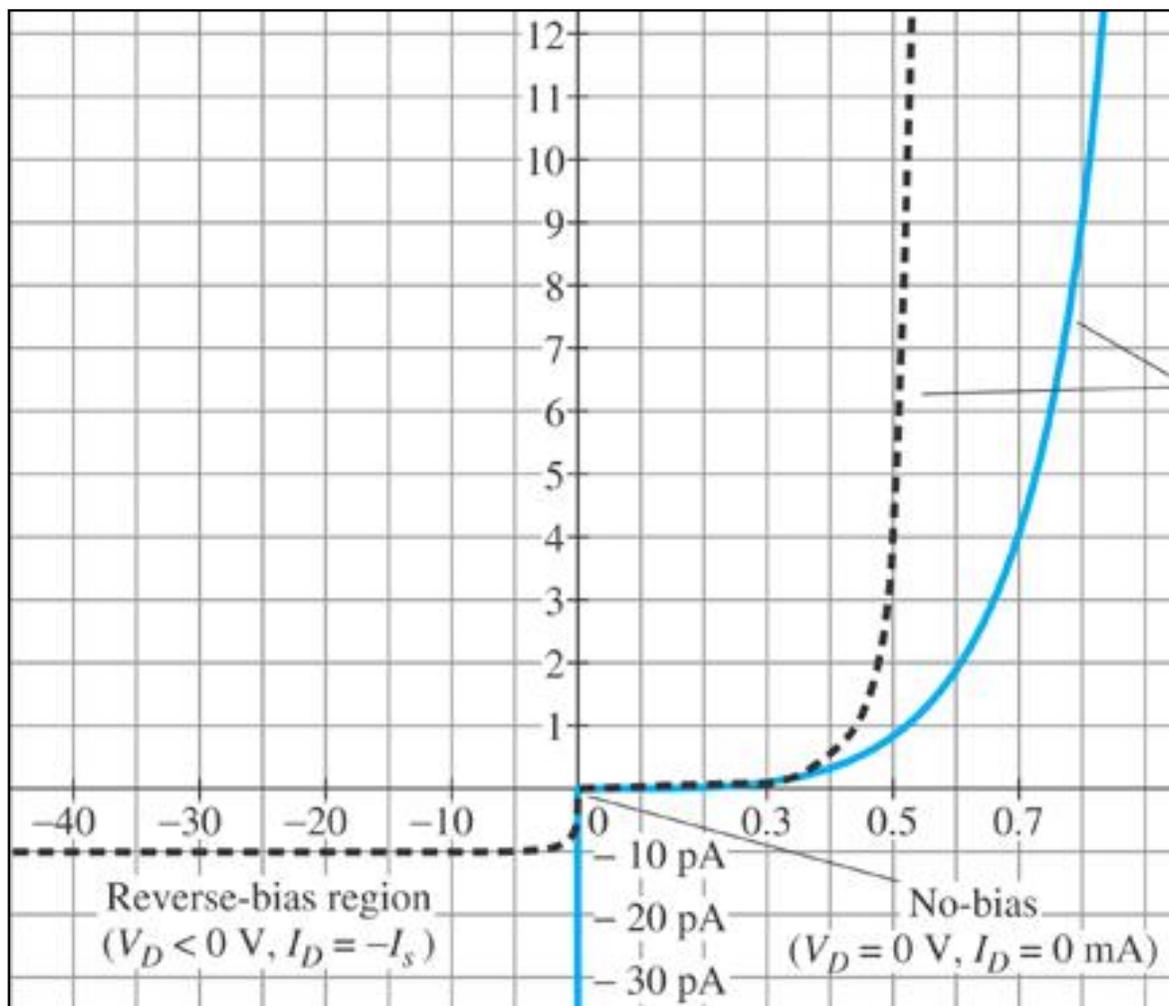
$$V_T = \frac{kT_K}{q}$$

k = Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T_K = Temperatura em Kelvin ($273,15 + T$ °C)

q = carga fundamental ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

Resumo da operação do diodo.



Equação de Shockley

$$I_D = I_s(e^{V_D/nV_T} - 1)$$

I_D = Corrente de Polarização Direta
 I_s = Corrente de Saturação Reversa
 V_D = Tensão de Polarização Direta
 n = Fator de idealidade ($1 < n < 2$)
 V_T = Tensão térmica: 25 mV à 25 °C

GaAs: $V_D \cong 1.2$ V

Si: $V_D \cong 0.7$ V

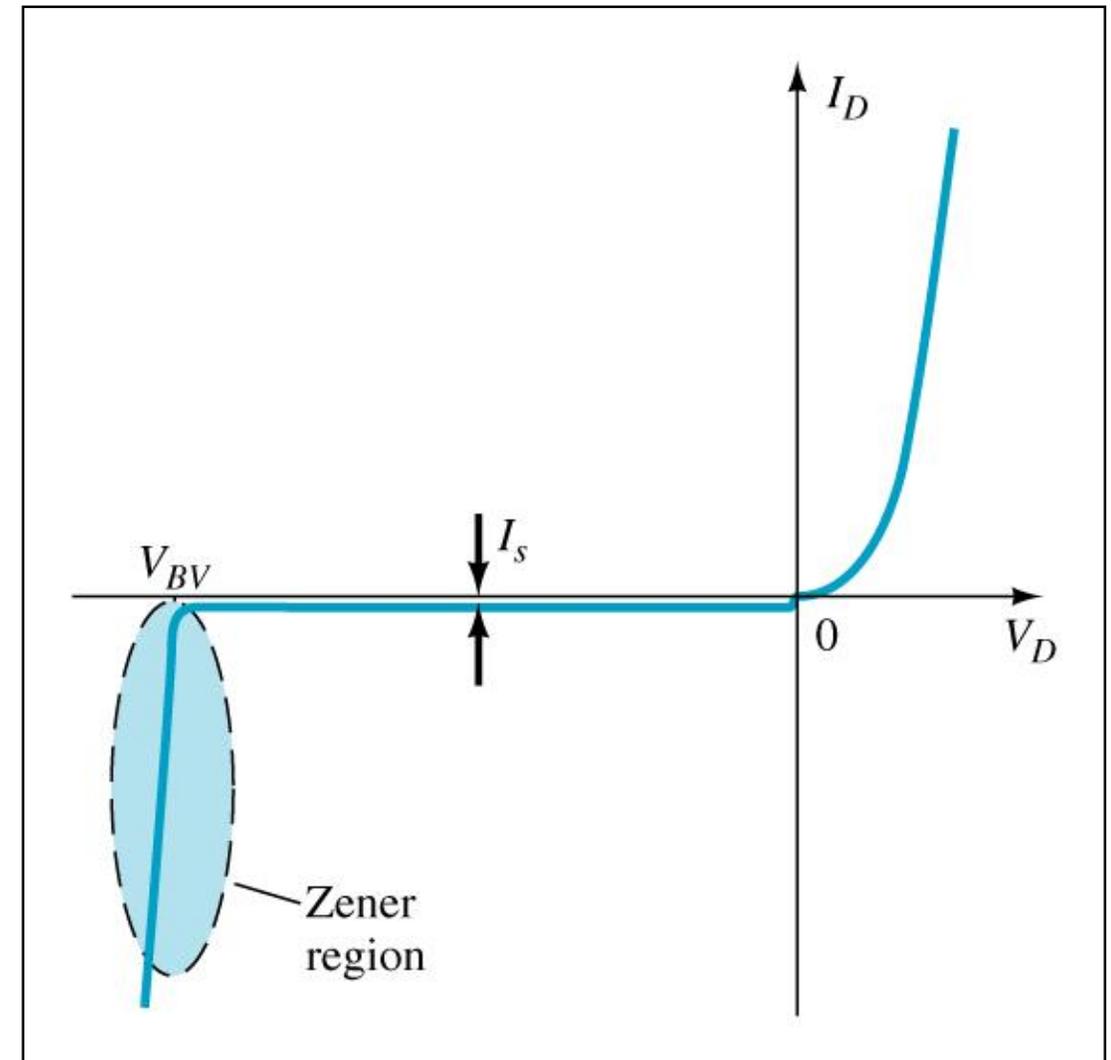
Ge: $V_D \cong 0.3$ V

$$V_T = \frac{kT_K}{q}$$

k = Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
 T_K = Temperatura em Kelvin ($273,15 + T$ °C)
 q = carga fundamental ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

Diodo Semicondutor: Região Zener

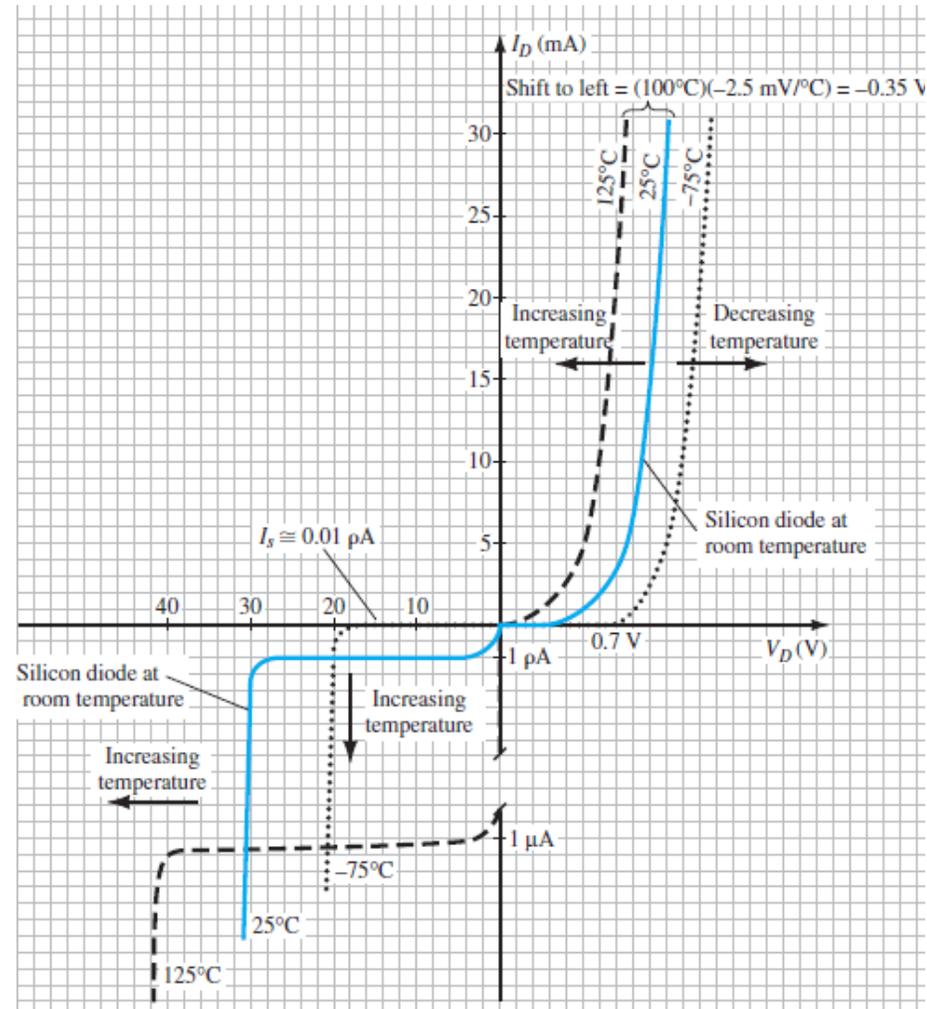
- ❑ Tensão Zener (V_Z): Tensão que causa a ruptura da barreira de potencial quando é aplicada polarização reversa.
- ❑ A corrente no diodo aumenta exponencialmente.
- ❑ A máxima tensão reversa suportada pelo diodo sem que ele entre na região zener é chamada Tensão de Pico Reversa.
- ❑ Diodos que empregam essa característica são chamados Diodo Zener.



Diodo Semicondutor: Temperatura

❑ O diodo sofre influência das variações de temperatura. Um aumento de temperatura causa:

- ❑ Diminuição de V_D
- ❑ Aumento de I_S
- ❑ Aumento de V_Z

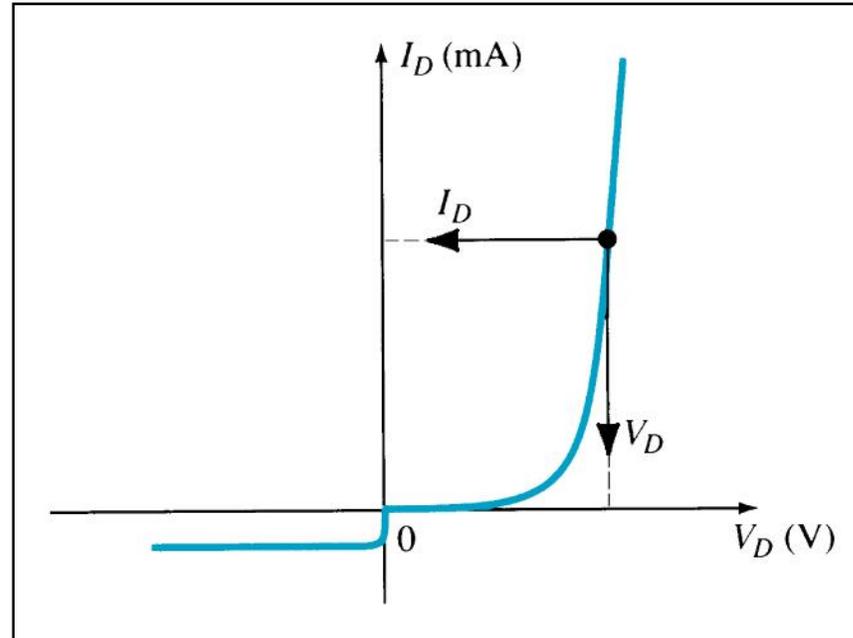


- A resistência de um diodo pode ser avaliada de acordo com sua operação em:
 - Resistência DC (estática);
 - Resistência AC (dinâmica);
 - Resistência AC média.

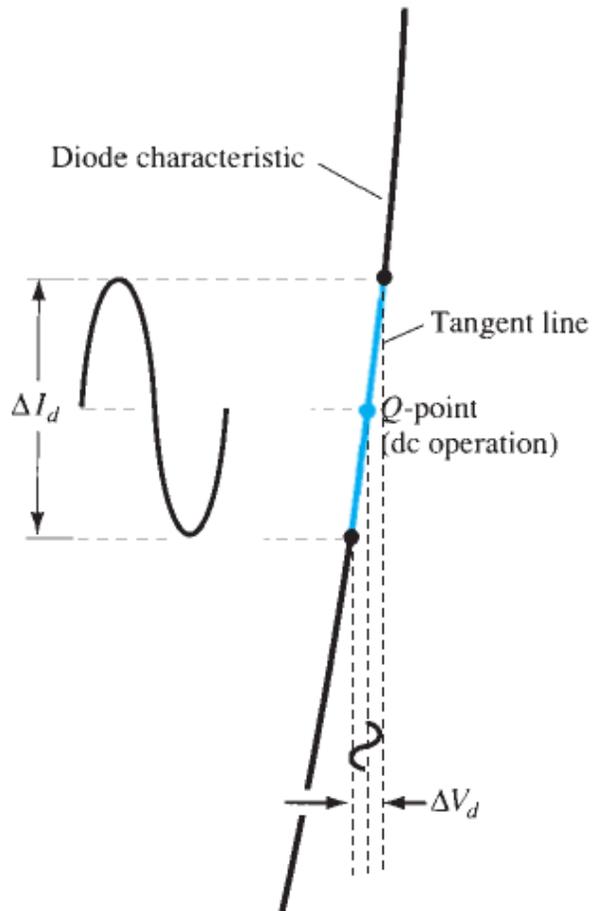
Diodo Semicondutor: Resistência DC (estática)

- ❑ Determinada pelo ponto de operação do diodo.
- ❑ Para um valor específico de V_D , o diodo terá uma corrente direta I_D e uma resistência DC R_D .

$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$



- Determinada pela derivada da corrente pela tensão no ponto quiescente (Q), ou ponto de operação estático.



Polarização Direta:

$$r'_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} + r_B$$

r'_d = Resistência AC (Ω)

I_D = Corrente Direta (A)

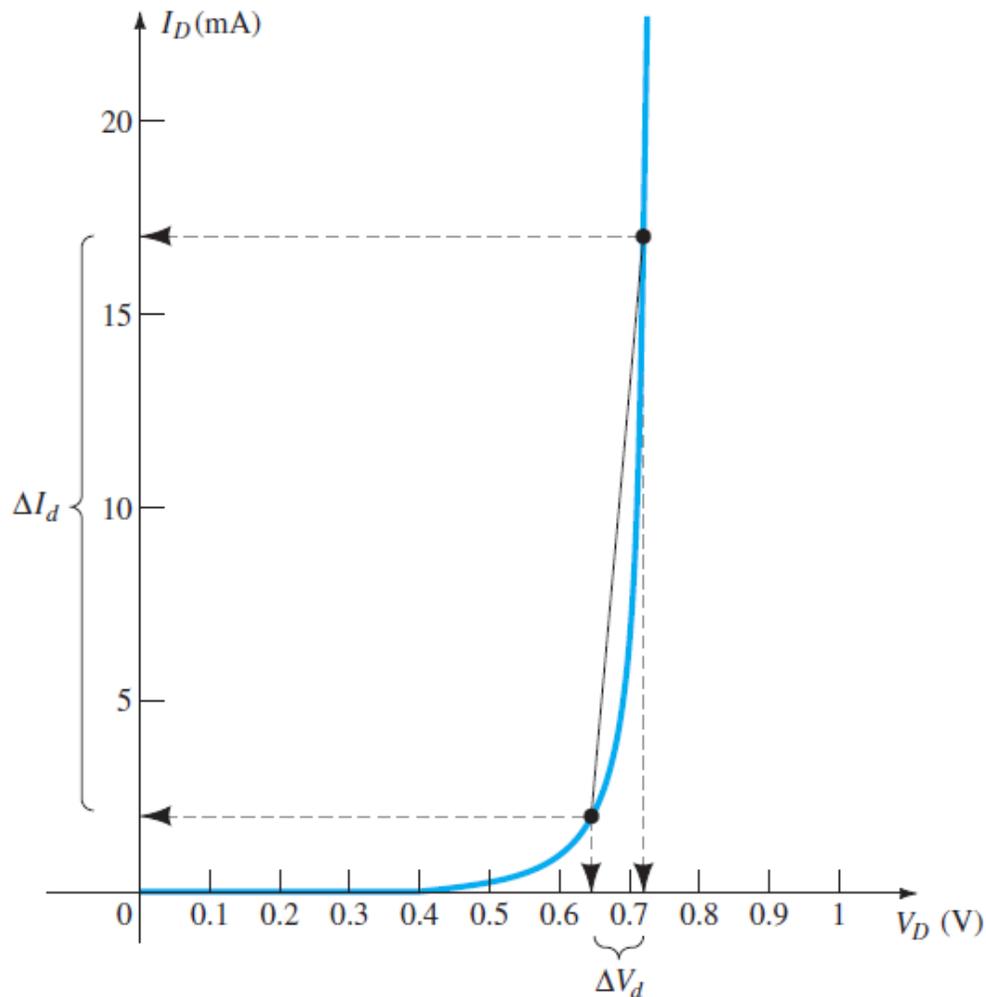
r_B = Resistência de Corpo + Resistência de Contato (Ω)

Polarização Reversa:

$$r'_d = \infty$$

Diodo Semicondutor: Resistência AC Média

- Determinada pela variação de corrente e tensão entre dois pontos.



$$r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}$$

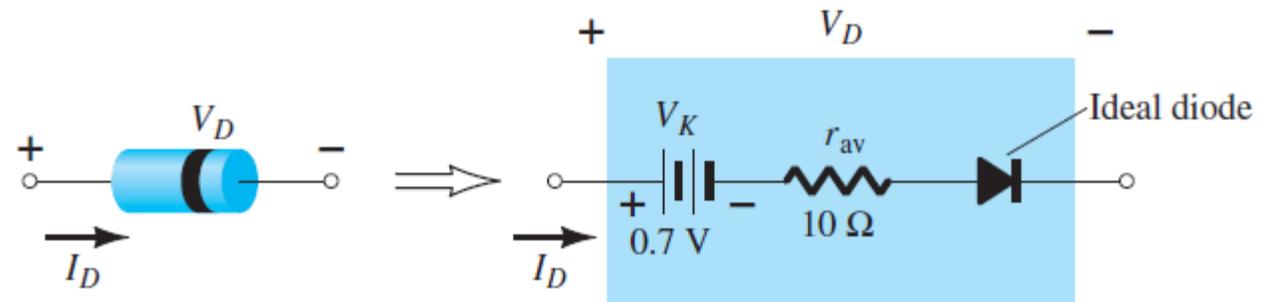
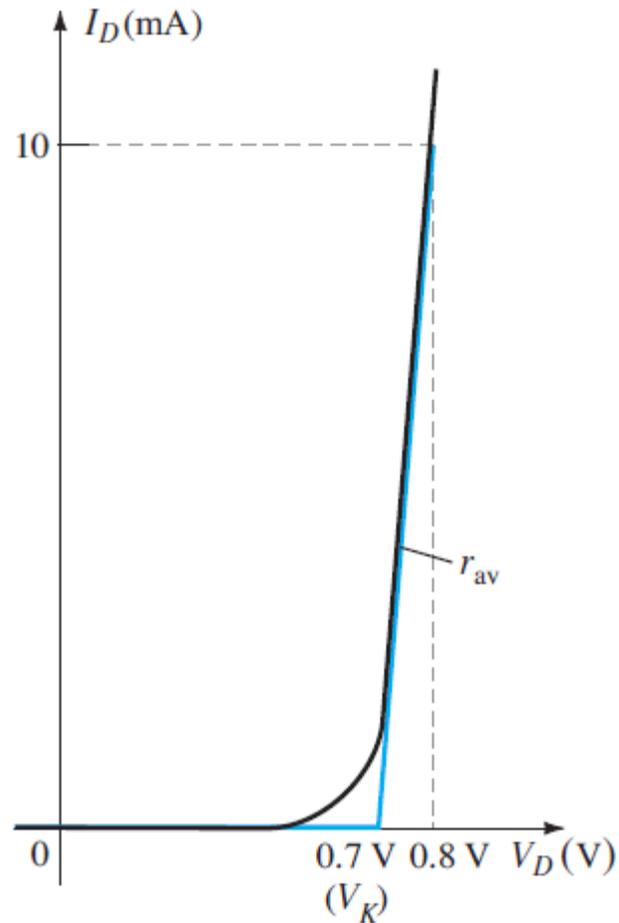
r_{av} = Resistência AC Média (Ω)

ΔV_d = Variação de Tensão Direta (V)

ΔI_d = Variação de Corrente Direta (A)

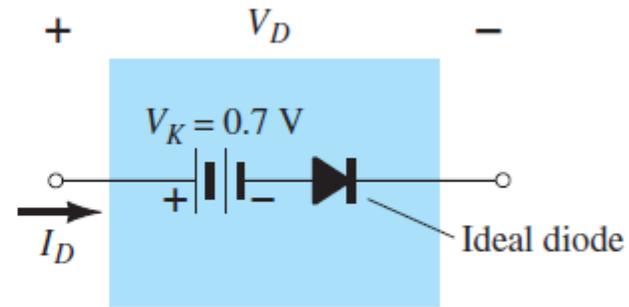
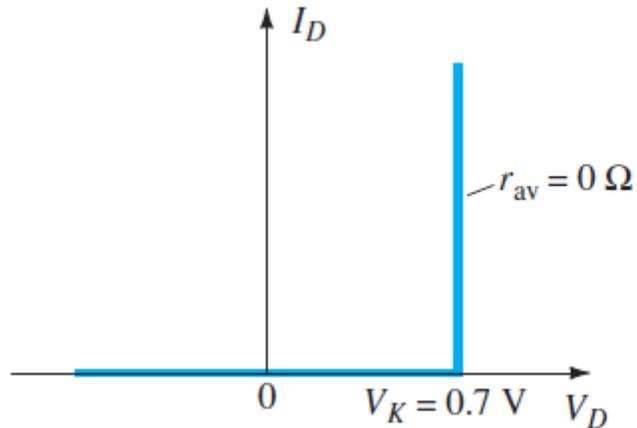
Diodo Semicondutor: Circuito Equivalente (Modelo)

Modelo Linear.

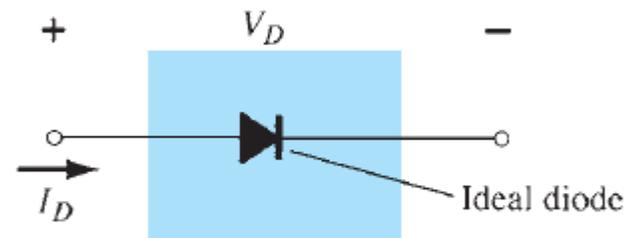
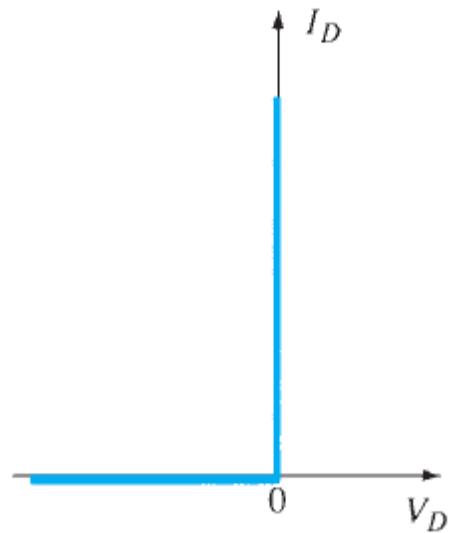


Diodo Semicondutor: Circuito Equivalente (Modelo)

Modelo Simplificado.

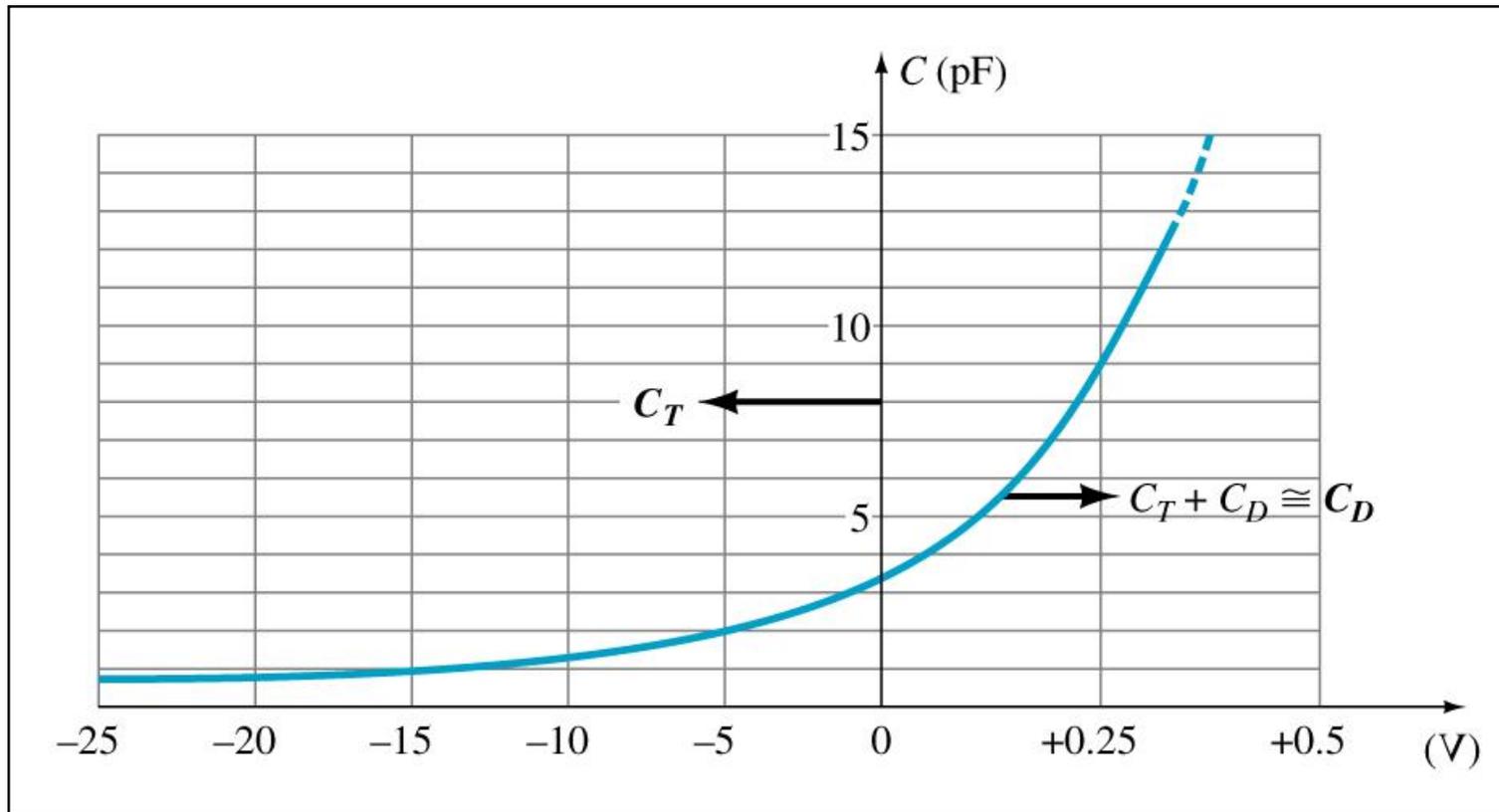
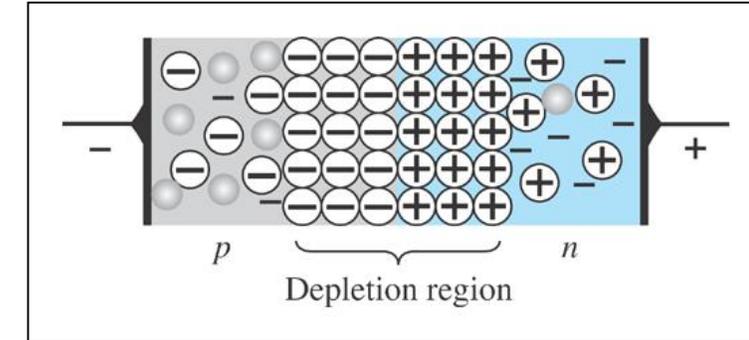


Modelo Ideal.



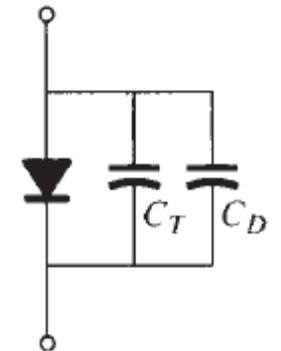
Diodo Semicondutor: Capacitância

- Capacitância de Transição (C_T): Polarização reversa.
- Capacitância de Difusão (C_D): Polarização direta.



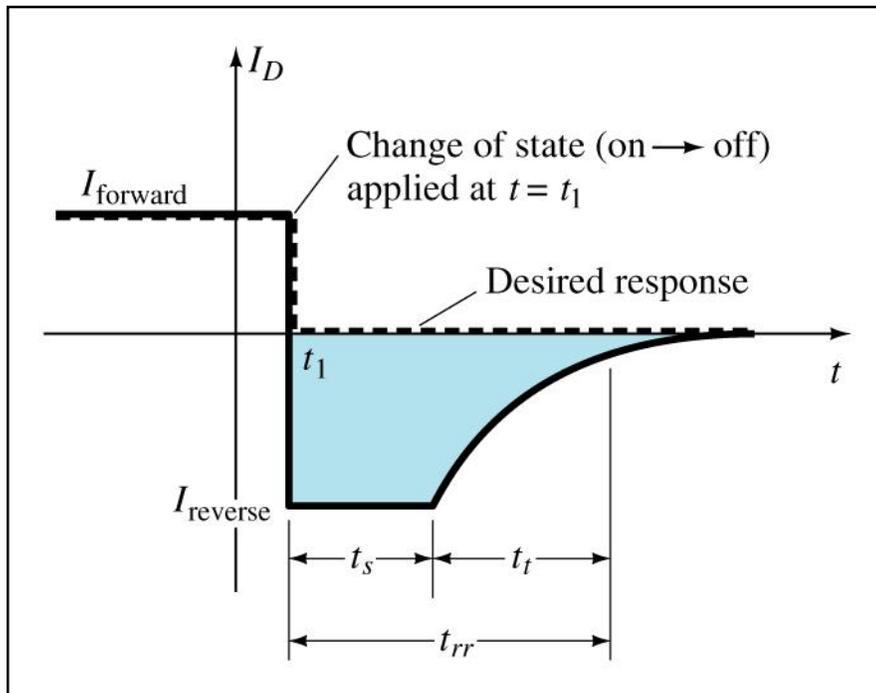
$$C_T = \frac{C(0)}{(1 + |V_R/V_K|)^n}$$

$$C_D = \left(\frac{\tau_r}{V_K} \right) I_D$$

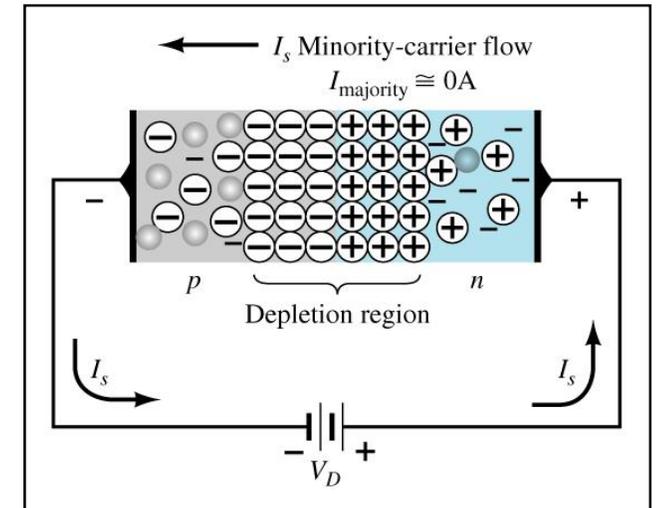
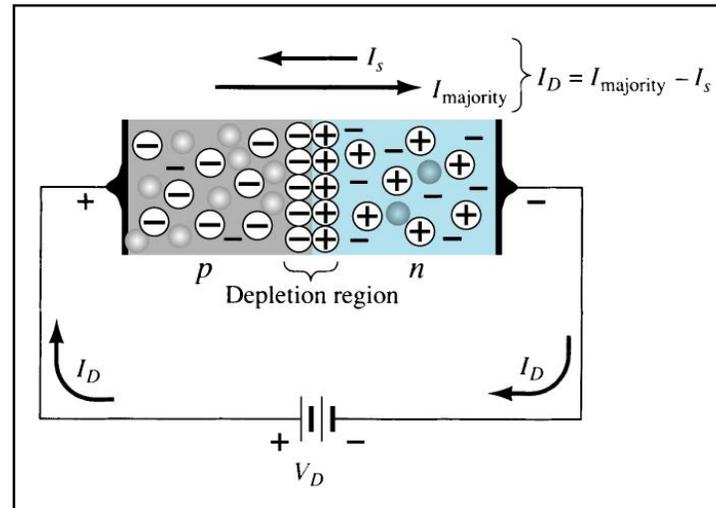


Diodo Semicondutor: Tempo de Recuperação Reversa

É o tempo necessário para o diodo parar de conduzir quando a polarização é alterada de direta para reversa.

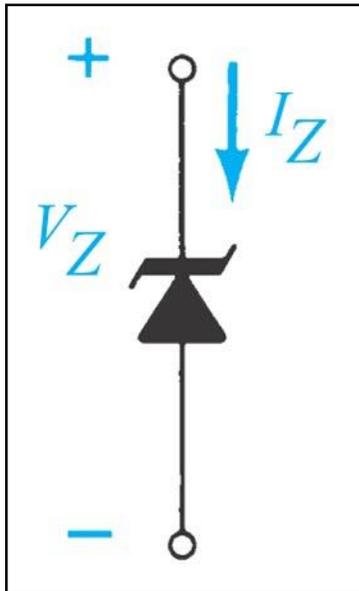


t_{rr} = Tempo de recuperação reversa (s)
 t_s = Tempo de armazenamento (s)
 t_t = Intervalo de transição (s)

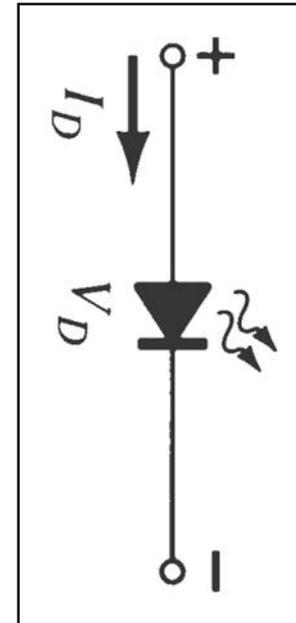


Diodo Semicondutor: Outros Tipos de Diodos

- Existem muitos tipos de diodos. Outros tipos mais comuns são o Diodo Zener e O LED.



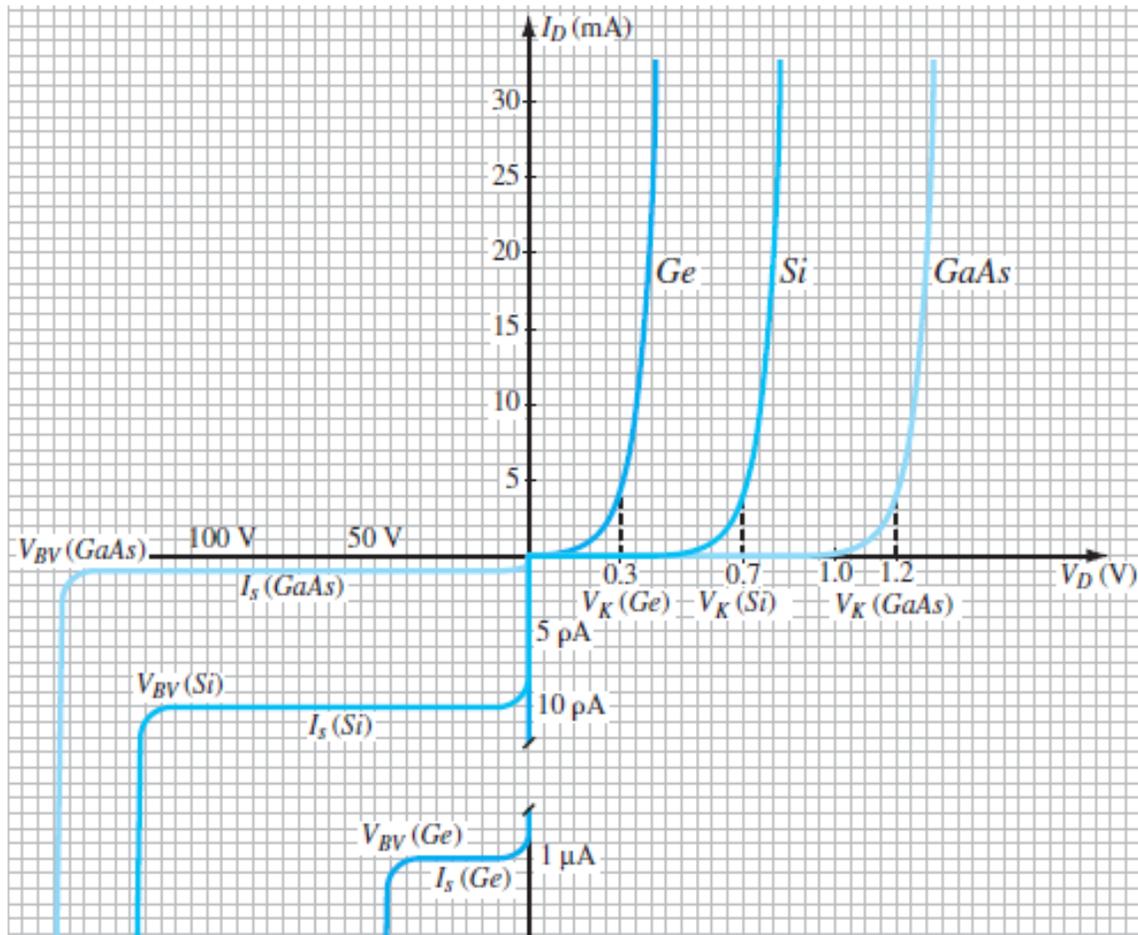
$V_Z =$ Entre 0,8 e 200 V



$V_D =$ Entre 2 e 3 V

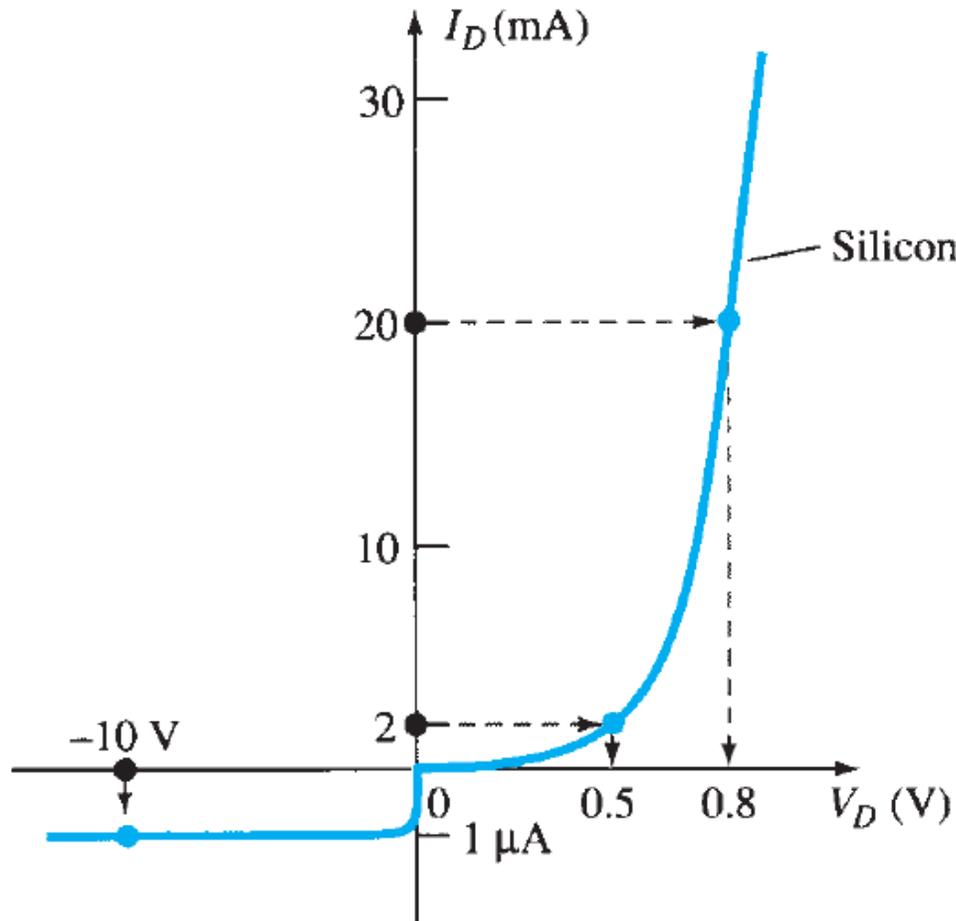
Exercícios Propostos

- 1 – Com base no gráfico, determine a tensão em um diodo de Si, Ge e GaAs para as correntes de 1, 4 e 30 mA.



Exercícios Propostos

- 2 – Com base no gráfico, determinar a resistência DC nos 3 pontos de operação.



$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

$$R_D = \frac{0,8}{20 \times 10^{-3}} = 40 \Omega$$

- 3 – a) Determine a Tensão Térmica de um diodo para uma temperatura de 20 °C. b) Qual a corrente I_D se $I_S = 40 \text{ nA}$, $n = 2$ e $V_D = 0,5 \text{ V}$.

a) $V_K = 25,27 \text{ mV}$

b) $I_D = 0,789 \text{ mA}$

- 4 – Para uma corrente de 8 mA e $n = 1$, encontre I_S se a tensão aplicada é de 0,5 V e a temperatura ambiente de 25 °C.

$$I_S = 28,57 \text{ pA}$$

Referências Bibliográficas

- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC (1998).
- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Electronic Devices and Circuit Theory”, 11 ed., Boston, Pearson (2013).