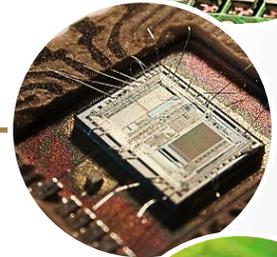
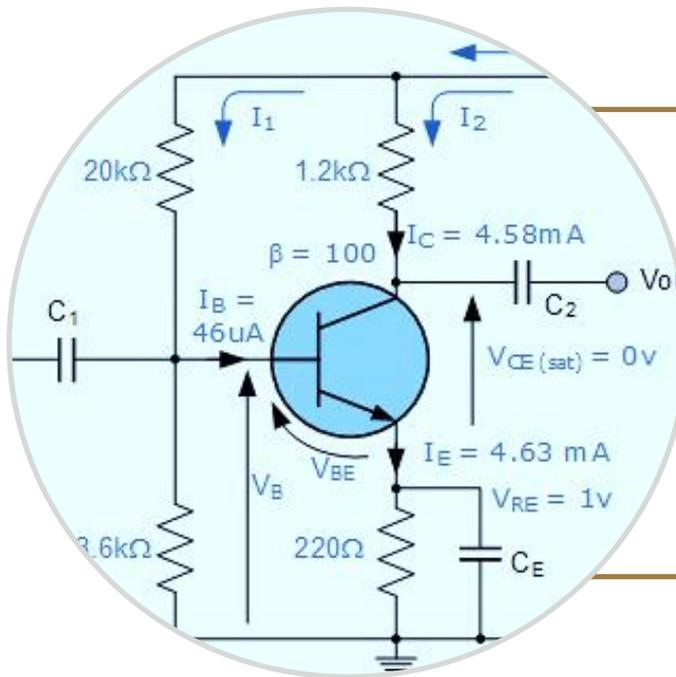


# ELETRÔNICA ANALÓGICA

## CEL099

Prof. Pedro S. Almeida  
pedro.almeida@ufjf.edu.br



# Materiais Semicondutores & Física de Estado Sólido Básica

# Conteúdo

- Materiais Semicondutores: histórico, propriedades, diagramas de nível de energia
- Dopagem: materiais intrínsecos e extrínsecos (tipo N, tipo P), propriedades
- Junção P-N: diodo básico de junção P-N, polarização, propriedades, equação de Shockley

# Definições:

1. **Semicondutores:** materiais com uma condutividade entre aquela de um *condutor* e a de um *isolante*
2. **Estrutura cristalina** (sólida): arranjo único altamente ordenado de átomos ocorrendo devido à natureza do elemento constituinte, em padrões simétricos
3. **Portador de carga:** qualquer partícula subatômica que pode ser considerada de ter uma carga elétrica (positiva ou negativa). Ex.: *elétrons, lacunas*
4. **Elétron de valência:** aquele que ocupa a última camada do átomo (camada de valência)
5. **Mobilidade do portador:** a habilidade de portadores de carga livres de se moverem através de um material cristalino
6. **Material intrínseco:** puro, sem nenhum outro elemento inserido na estrutura cristalina; a densidade de portadores intrínsecos é fixa
7. **Material extrínseco:** dopado, com algum outro elemento dopante (doador ou receptor) inserido na estrutura cristalina, de modo a afetar a densidade de portadores e, portanto, características de condução elétrica do material
8. **Banda de condução:** nível de energia superior (ao da banda de valência) onde se considera que os elétrons de um material estejam “livres” para se mover pelo cristal e, portanto, conduzir corrente elétrica
9. **Banda proibida** (ou **bandgap**): diferença energética que existe (devido a fenômenos quânticos) entre a banda de condução e a de valência; não pode ser ocupado por elétrons

# Materiais Semicondutores

## Semicondutores mais empregados:

**Ge** → 1939 (primeiro diodo), 1947 (primeiro transistor)  
muito sensível a mudanças de temperatura (pequeno bandgap)

**Si** → 1954 em diante

(quando foi possível produzir silício extra-puro (> 99.9999999% - monocristalino))

**GaAs** → alta mobilidade, usado de 1970 em diante (transistores até 5x mais rápidos que os de Si)

**GaN, SiC** → 2005 em diante. Bandgap largo (pode operar em altíssimas temperaturas), no caso de SiC pode bloquear altas tensões também (1200 V ou mais).

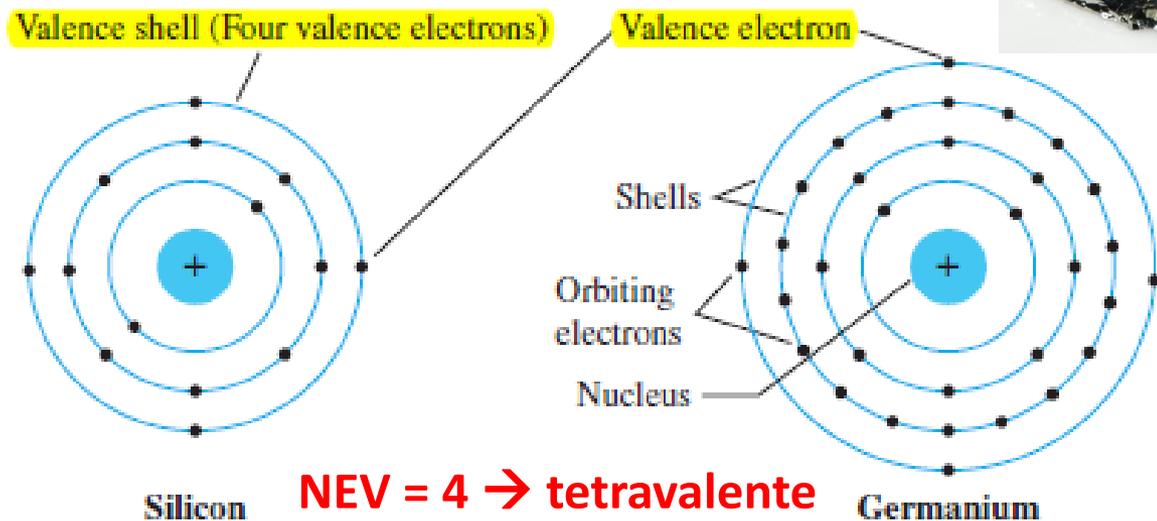
# Materiais Semicondutores

**Semicondutores:** materiais com uma condutividade entre aquela de um **condutor** e a de um **isolante**

- Materiais mais comuns: Ge, Si (cristais simples), GaAs (arsenieto de gálio - composto)
- Outros materiais com aplicações mais específicas: GaN, InGaN, CdS, GaAsP, SiC



**Elétrons de valência:** potencial de ionização maior  $\rightarrow$  menor ddp p/ removê-los da camada



# Materiais Semicondutores

**Semicondutores:** materiais com uma condutividade entre aquela de um **condutor** e a de um **isolante**

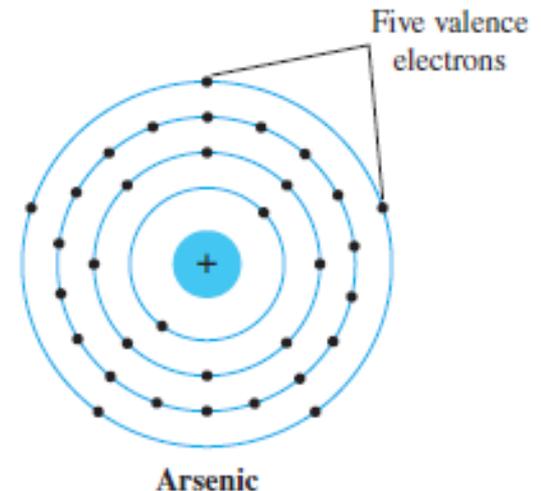
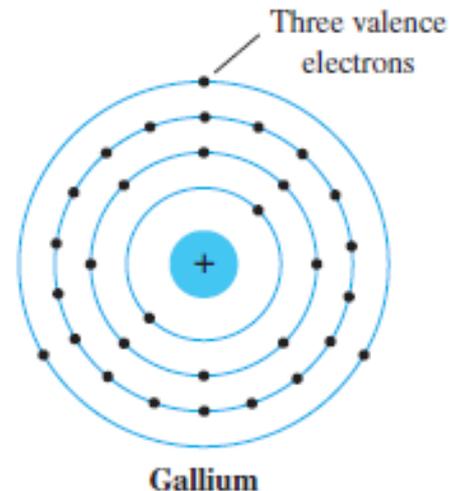
- Materiais mais comuns: Ge, Si (cristais simples), GaAs (arsenieto de gálio - composto)
- Outros materiais com aplicações mais específicas: GaN, InGaN, CdS, GaAsP, SiC

Cristal composto GaAs: 8 elétrons compartilhados (via ligação covalente)



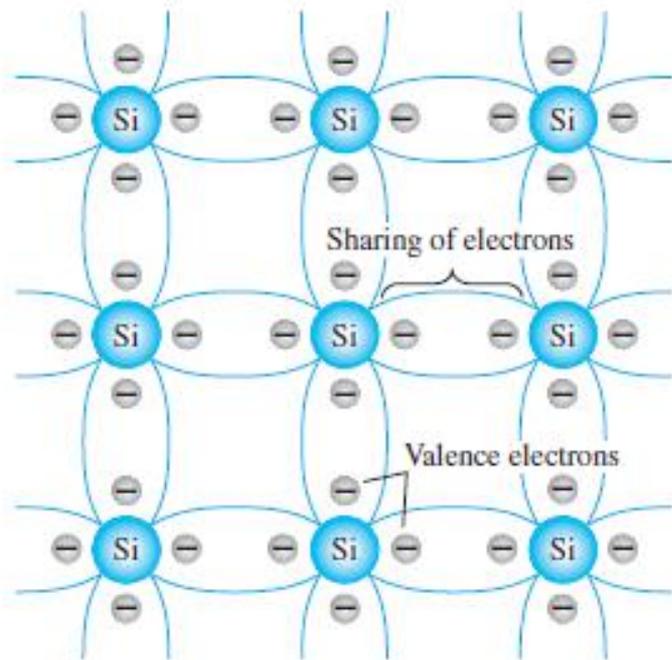
**NEV = 3 → trivalente**

**NEV = 5 → pentavalente**



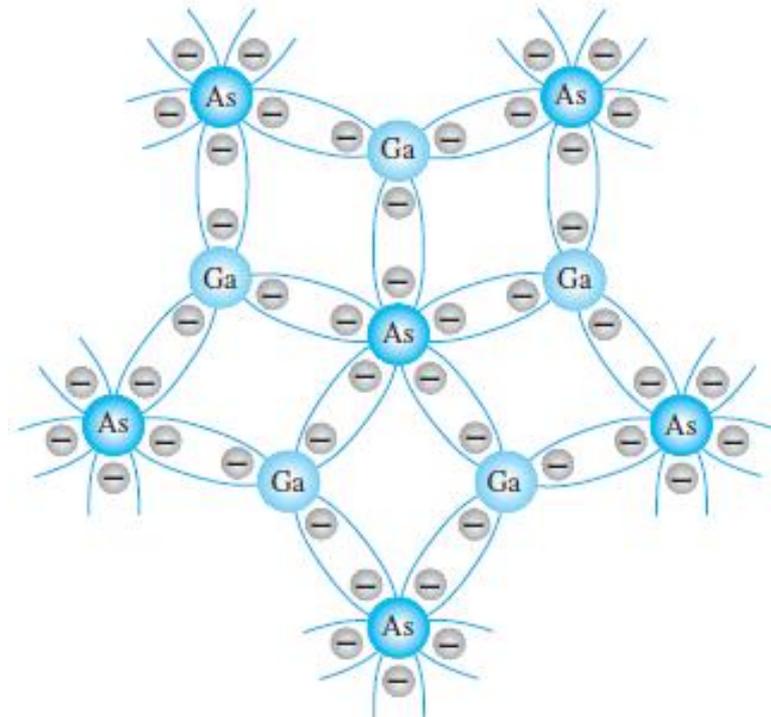
# Semicondutores - estruturas cristalinas intrínsecas

- **Ligações covalentes** formam os cristais dos semicondutores:



**FIG. 1.4**

*Covalent bonding of the silicon atom.*



**FIG. 1.5**

*Covalent bonding of the GaAs crystal.*

# Semicondutores - estruturas cristalinas intrínsecas

- **Ligações covalentes** formam os cristais dos semicondutores:

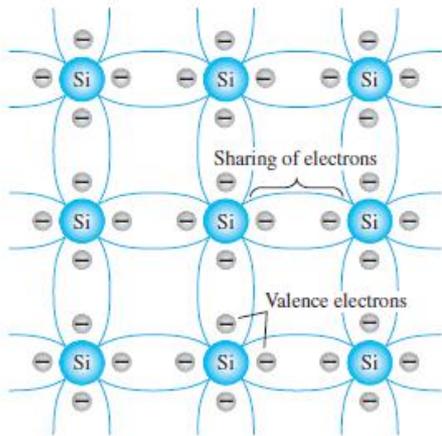


FIG. 1.4

Covalent bonding of the silicon atom.

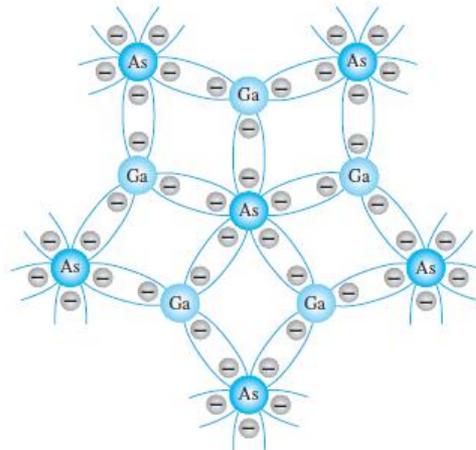


FIG. 1.5

Covalent bonding of the GaAs crystal.

- Nos cristais intrínsecos, a 0 K, não existem elétrons livres.
- Portanto são essencialmente **isolantes**
- **Elétrons livres no cristal:** ocorrem com a incidência de energia: luz, calor, radiações → energia suficiente para os elétrons pularem da banda de valência para a banda de condução

## Intrinsic Carriers $n_i$

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

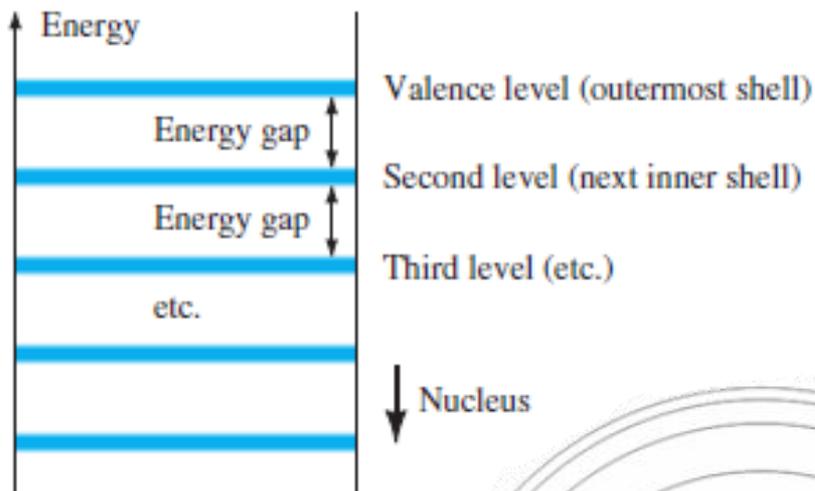
## Relative Mobility Factor $\mu_n$

Semiconductor	$\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /V·s)
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

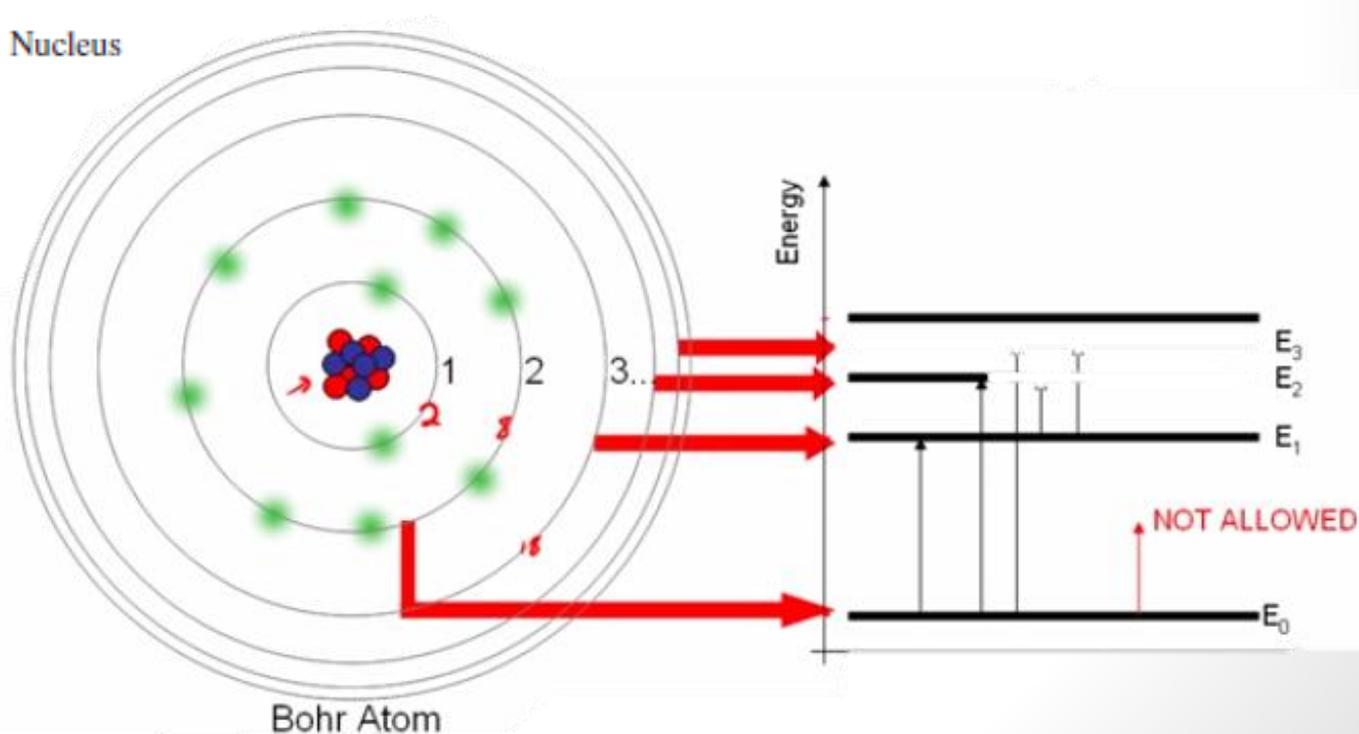
“free carriers in GaAs have more than five times the mobility of free carriers in Si, a factor that results in response times using GaAs electronic devices that can be up to five times those of the same devices made from Si”

(em temperatura ambiente)

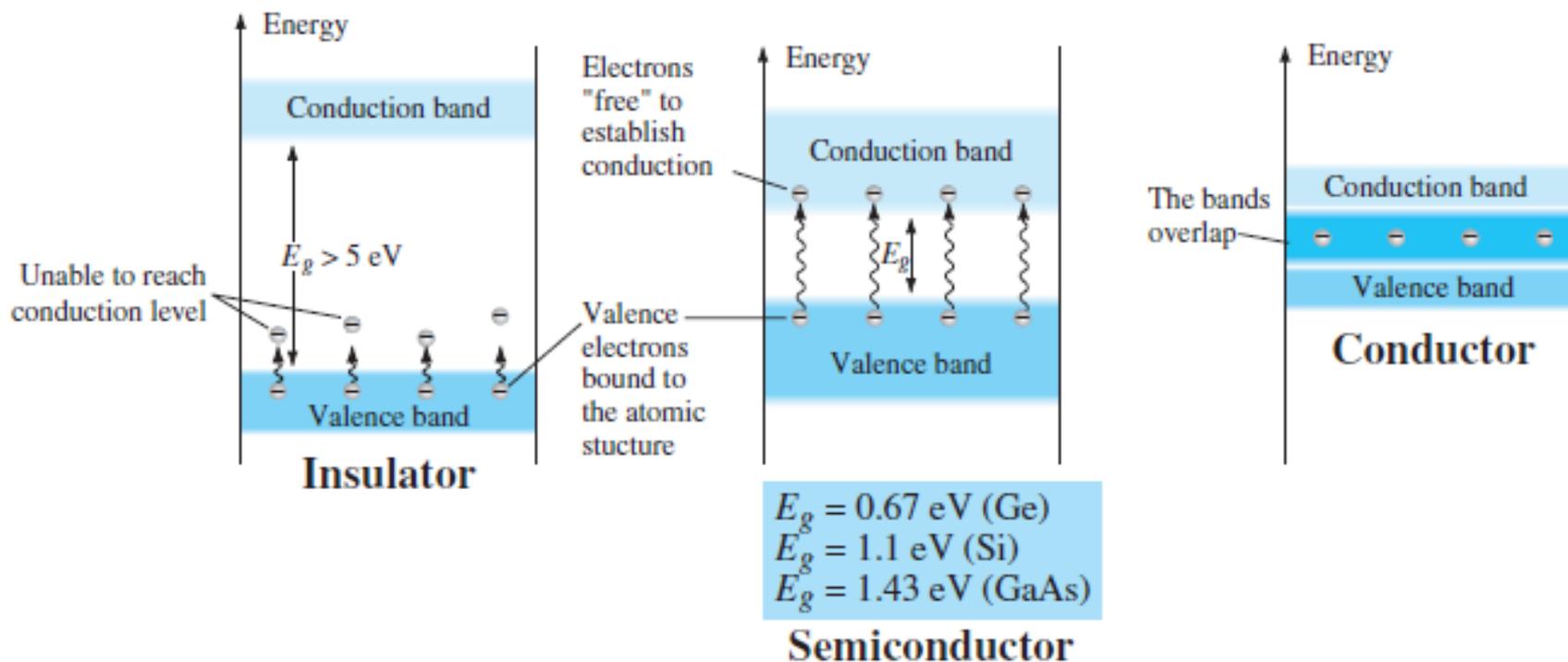
# Diagramas de níveis de energia



$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$



# Diagramas de níveis de energia



$E_g$  (bandgap) - energia necessária para o elétron que se encontra na banda de valência chegar à banda de condução

- **Si** →  $E_g = 1,1 \text{ eV}$
- **Ge** →  $E_g = 0,67 \text{ eV}$
- **GaAs** →  $E_g = 1,43 \text{ eV}$
- **GaN** →  $3,4 \text{ eV}$
- **SiC** →  $2,36 \text{ eV a } 3,23 \text{ eV}$

Maior  $E_g$  → menor sensibilidade à temperatura

# Materiais extrínsecos

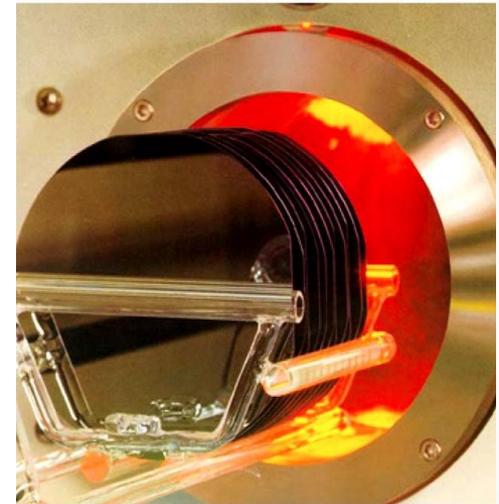
- **Dopagem:** inserção de impurezas no cristal pra alterar suas propriedades → cristal extrínseco

**Material tipo N:** dopagem c/ impurezas pentavalentes = átomos doadores de elétrons

(Grupo V da tabela periódica: Sb, As, P)

**Material tipo P:** dopagem c/ impurezas trivalentes = átomos receptores de elétrons

(Grupo III da tabela periódica: B, Ga, In)



# Materiais extrínsecos – tipo N

- Dopagem: inserção de impurezas no cristal pra alterar suas propriedades → cristal extrínseco

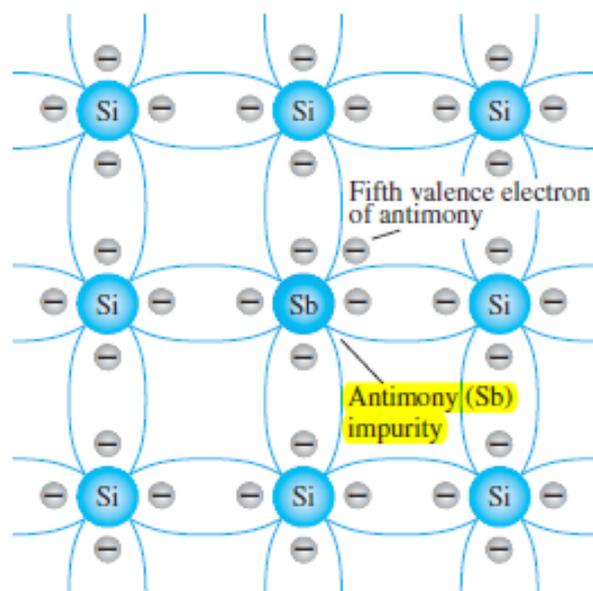


FIG. 1.7

Antimony impurity in n-type material.

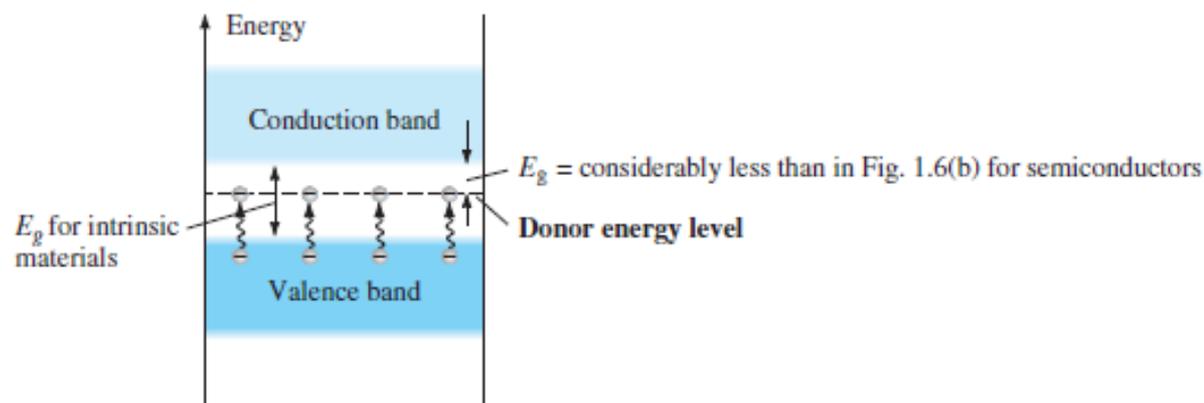


FIG. 1.8

Effect of donor impurities on the energy band structure.

Inserção de um elétron livre:

# Materiais extrínsecos – tipo P

- Dopagem: inserção de impurezas no cristal pra alterar suas propriedades → cristal extrínseco

Inserção de uma lacuna:

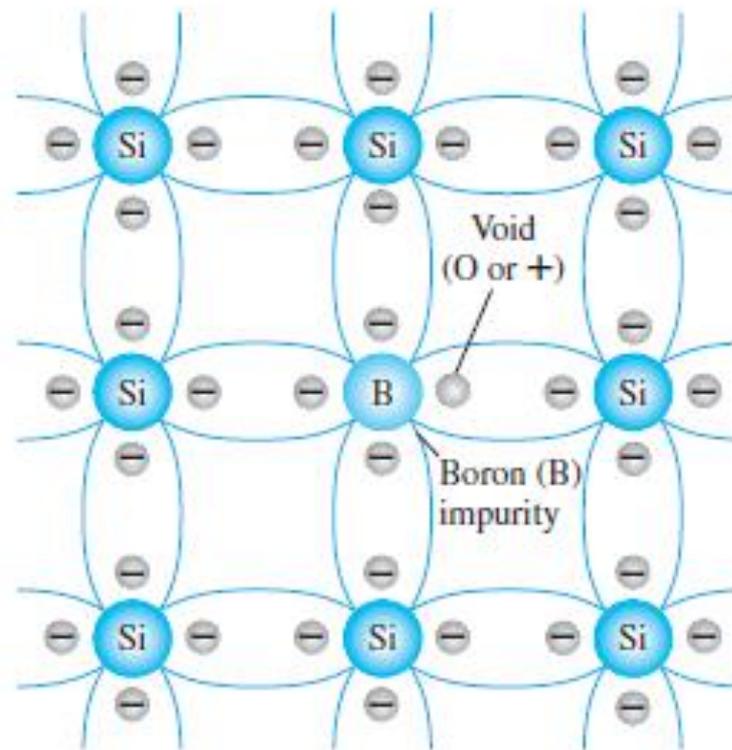
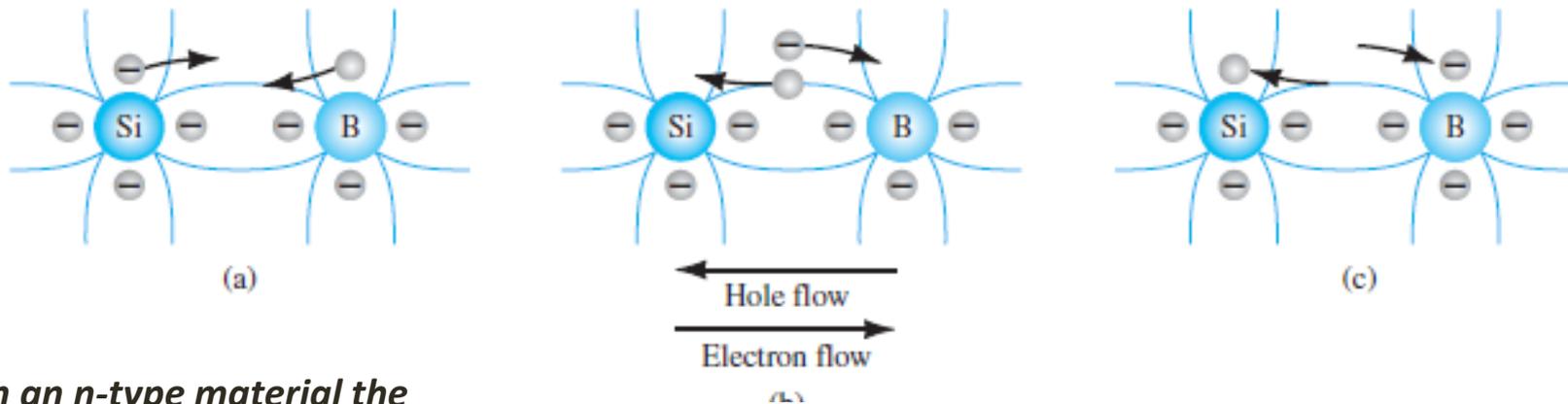


FIG. 1.9

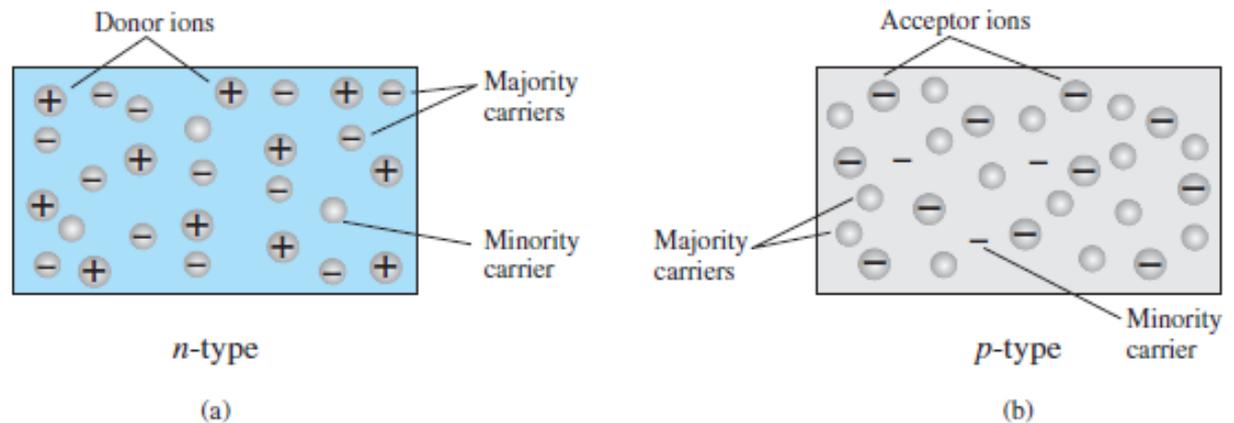
*Boron impurity in p-type material.*

# Portadores – fluxo; majoritários e minoritários



*“In an n-type material the electron is called the majority carrier and the hole the minority carrier.”*

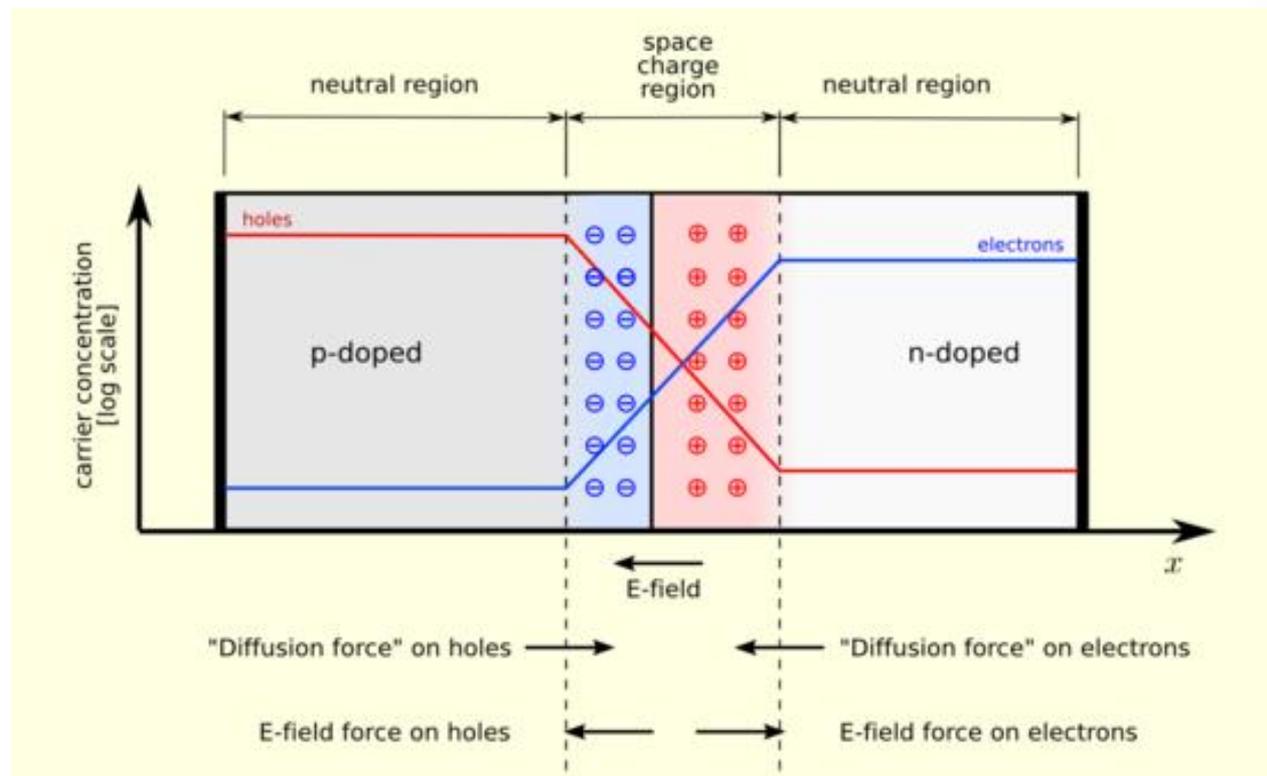
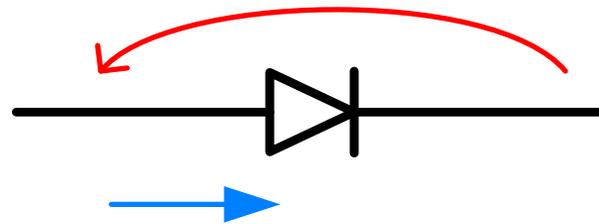
*“In a p-type material the hole is the majority carrier and the electron is the minority carrier.”*



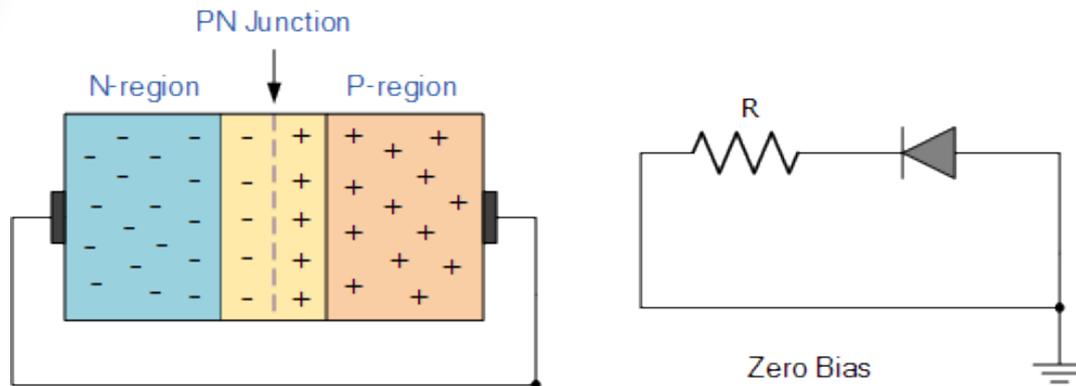
**FIG. 1.11**

**(a) n-type material; (b) p-type material.**

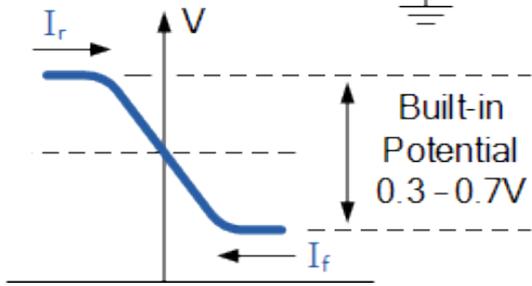
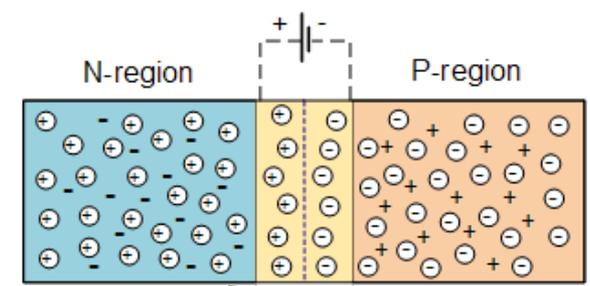
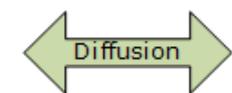
# Junção P-N – estrutura básica do diodo semiconductor



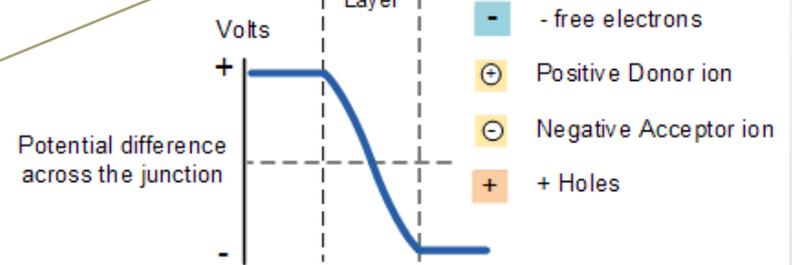
# Junção P-N – sem polarização



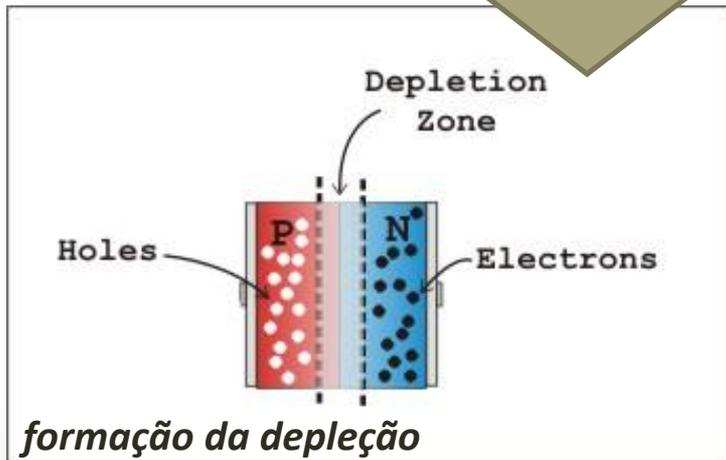
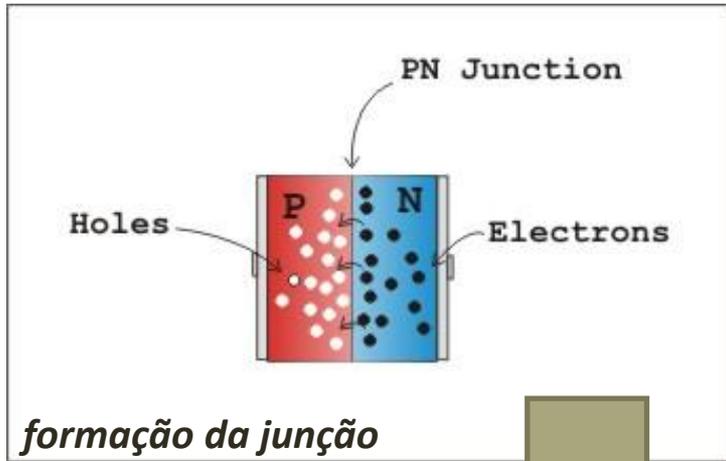
*Internamente, o que está ocorrendo:*



*íons “descobertos”*

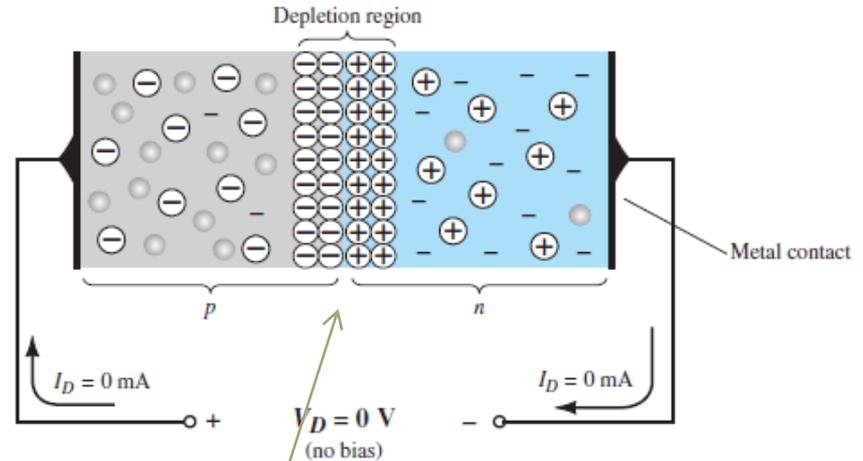


# Junção P-N – sem polarização

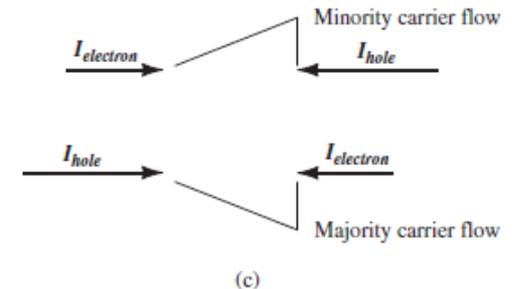
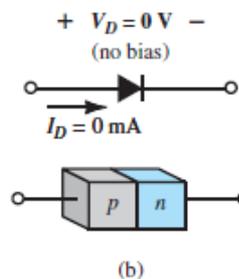


*“This region of uncovered positive and negative ions is called the depletion region due to the “depletion” of free carriers in the region.”*

*O fluxo líquido de portadores é nulo (portanto  $I_D = 0 A$  quando  $V_D = 0 V$ )*

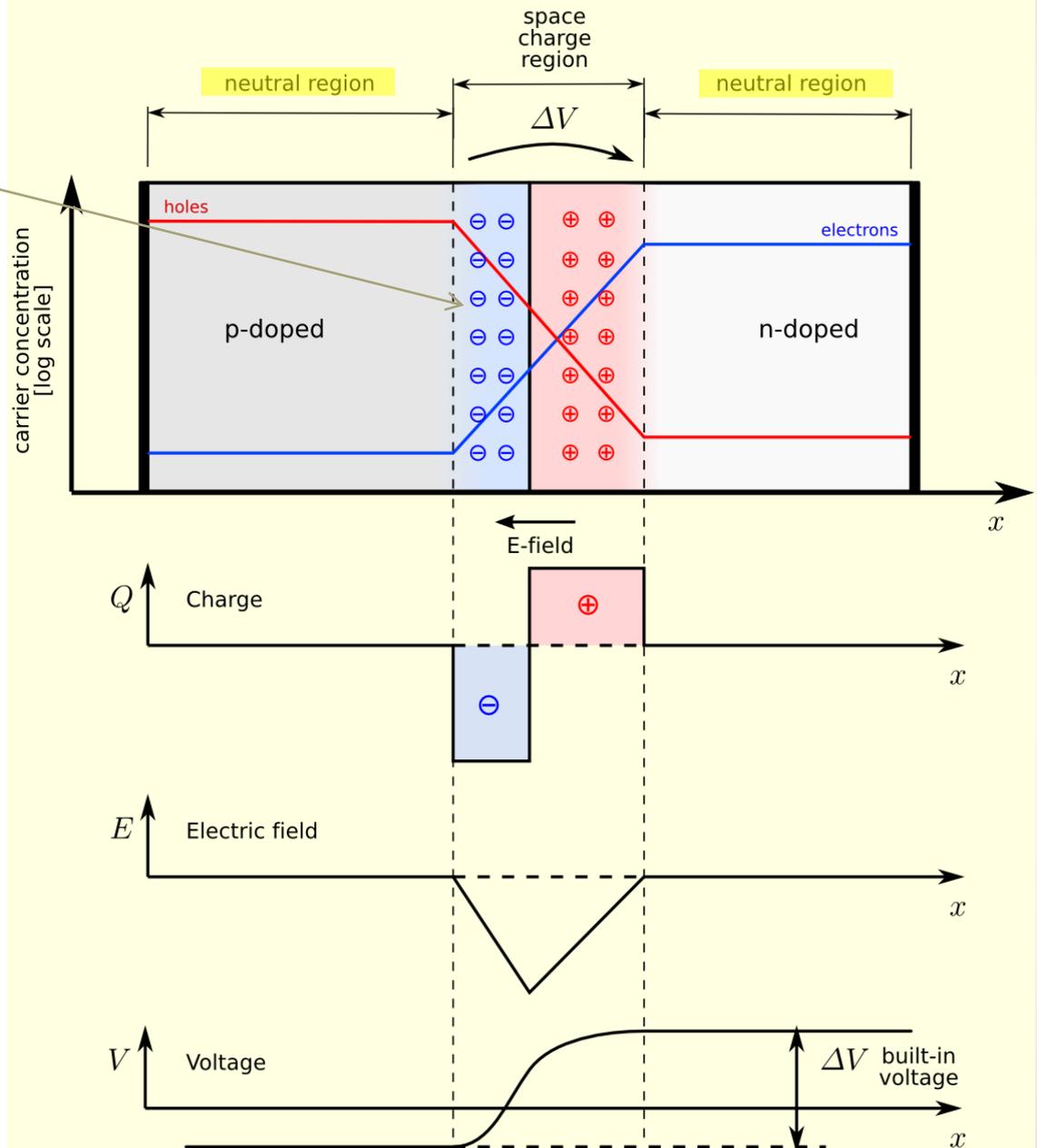


*íons “descobertos”*



# Junção P-N

íons “descobertos”



Concentração de portadores, carga, campo elétrico e ddp:

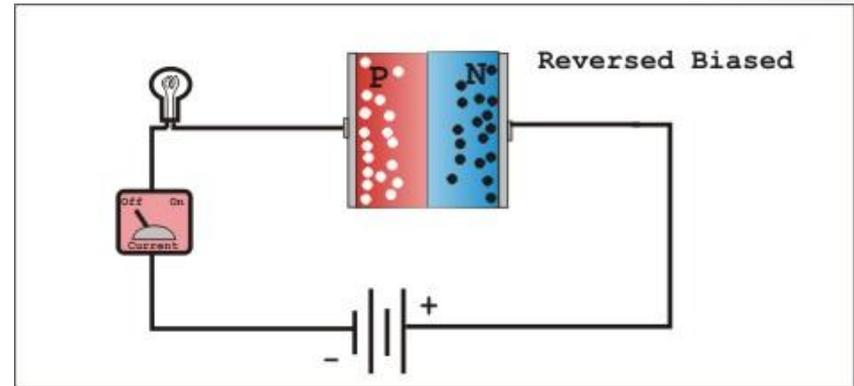
$$|\mathbf{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2}$$

$$V_{\mathbf{E}} = - \int_C \mathbf{E} \cdot d\ell$$

# Junção P-N – polarização inversa

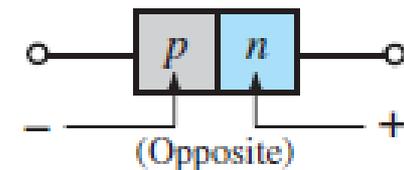
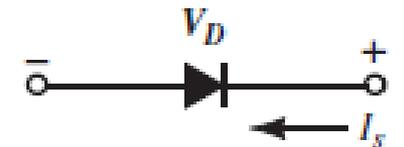
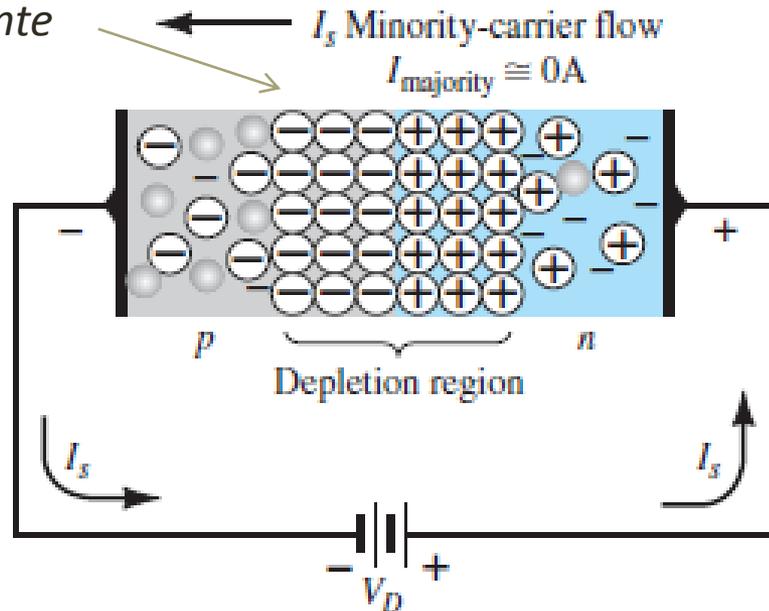
Efeito da polarização inversa (com  $V_D < 0$ ) nos portadores de carga da junção:

1. Não há fluxo de **portadores majoritários!**
2. Só há fluxo de **portadores minoritários** (tal qual quando  $V_D = 0$  V)



alargamento da região de depleção  $\approx$  isolante

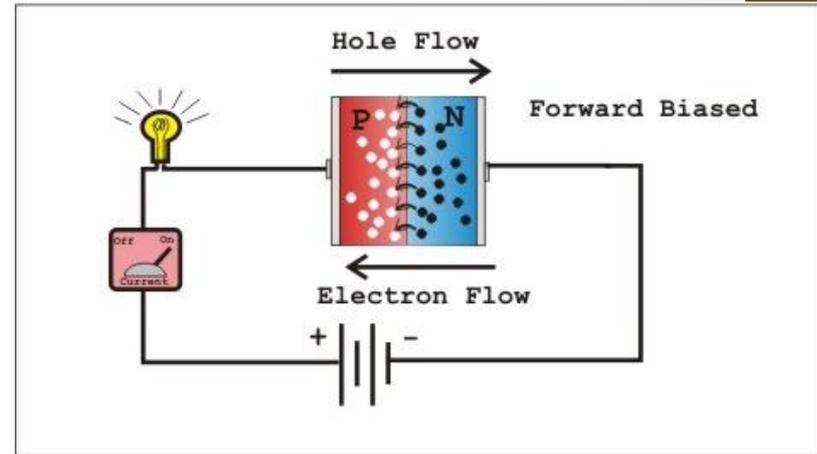
$I_s$  = corrente de saturação reversa ("saturada" – não muda significativamente com aplicação de maiores potenciais)



# Junção P-N – polarização direta

Efeito da polarização direta (com  $V_D > 0$ ) nos portadores:

1. Devido ao potencial elétrico:
  - a) Há injeção de elétrons no material tipo N
  - b) Há injeção de lacunas no material tipo P
  - c) Ocorre a recombinação dos portadores e os íons na região de depleção
2. Há, portanto, fluxo de portadores majoritários!



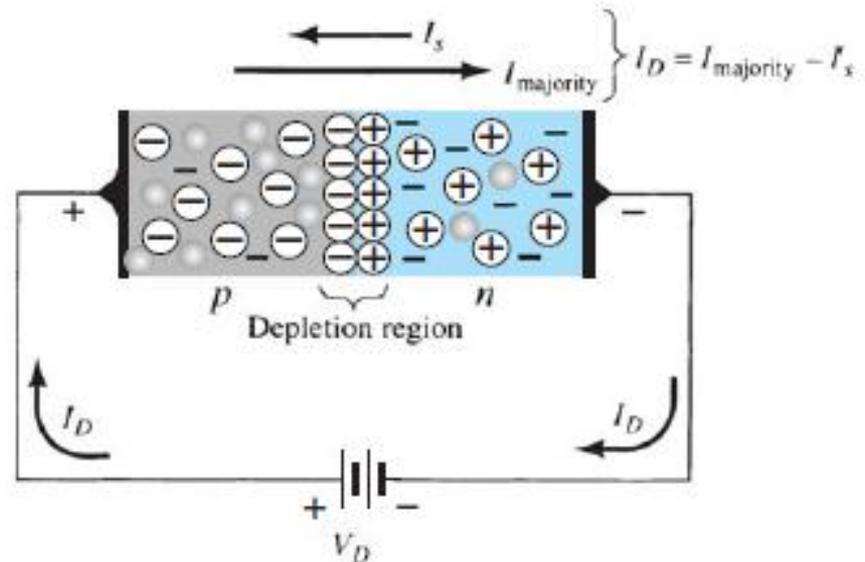
**redução da região de depleção → forte atração dos portadores → aumento exponencial na corrente**

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

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

$V_T \approx 26 \text{ mV @ } 300 \text{ K}$

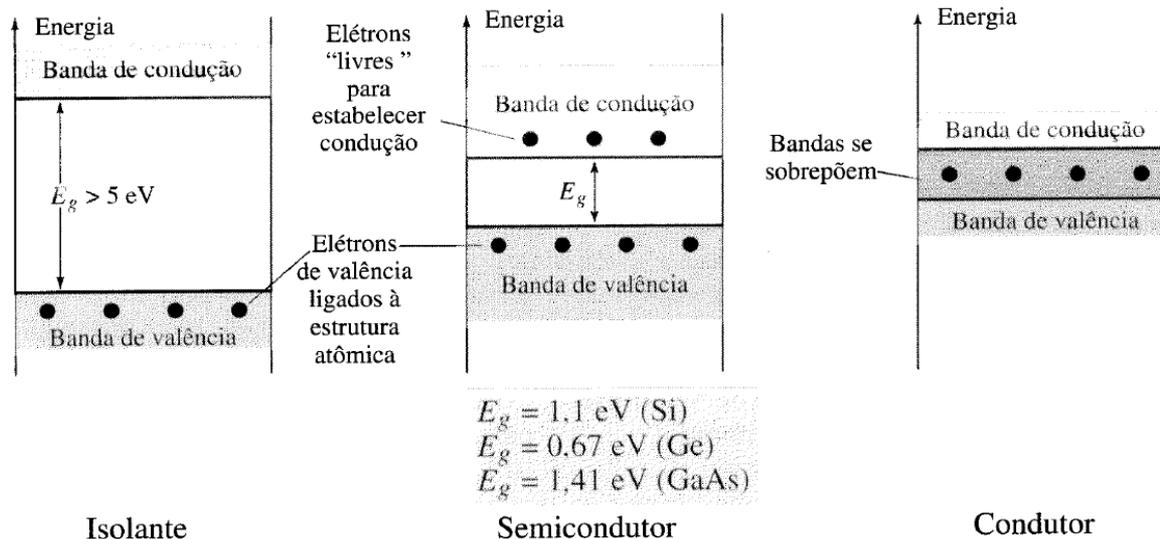
$k$  – constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{23} \text{ J/K}$ )  
 $T_K$  – temperatura absoluta (K)  
 $q$  – carga do elétron ( $1,6 \times 10^{19} \text{ C}$ )



# Conceitos avançados de Física de Semicondutores

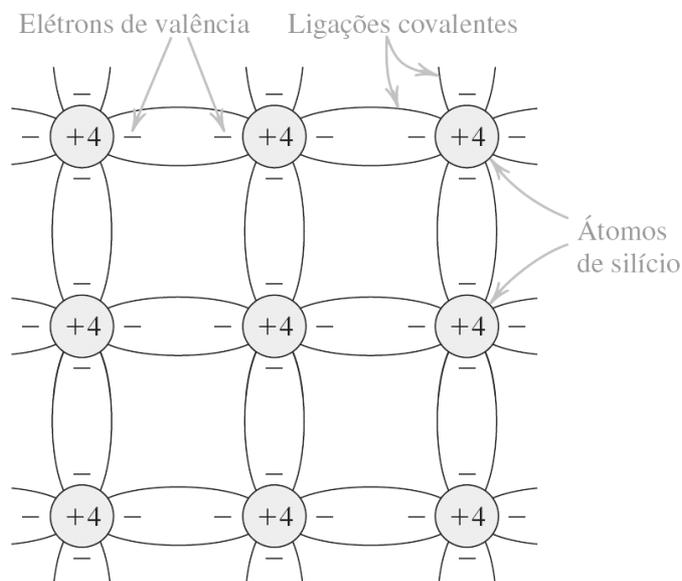
# Operação Física de Diodos

- Introdução à Física de Semicondutores
- Metais, Isolantes e Semicondutores. Níveis de Energia



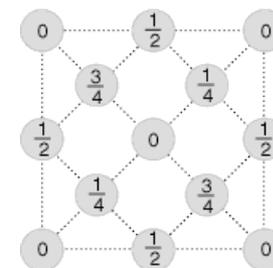
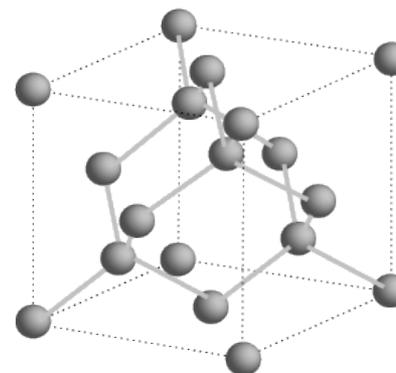
- Semicondutores são a base de fabricação de diodos e muitos outros componentes eletrônicos

# O Cristal de Silício



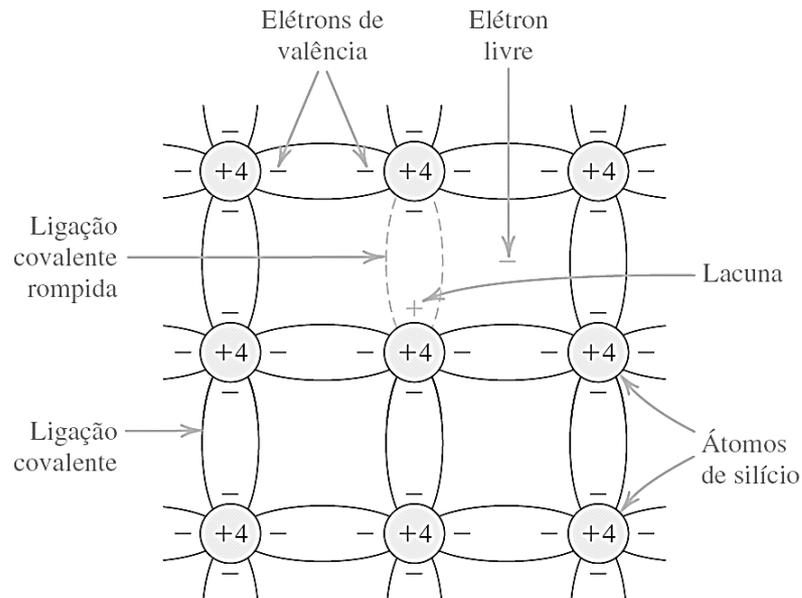
**Figura 3.40** Representação bidimensional de um cristal de silício. Os círculos representam o núcleo dos átomos de silício, com +4 indicando sua carga positiva de  $+4q$ , que é neutralizada pela carga dos quatro elétrons de valência. Observe como as ligações covalentes são formadas partilhando os elétrons de valência entre átomos vizinhos. A 0 K, todas as ligações estão completas e não existem elétrons livres disponíveis para a condução de corrente.

*Representação 3D.*



*Altura dos átomos em relação à base.*

# O Silício em Temperatura Ambiente



Elétrons e lacunas são os “portadores” independentes de corrente elétrica

**Figura 3.41** À temperatura ambiente, algumas das ligações covalentes se rompem pela ionização térmica. Cada ligação rompida dá origem a um elétron livre e a uma lacuna, e ambos se tornam disponíveis para a condução de corrente elétrica.

# Alguns conceitos

- A carga da lacuna é positiva e igual em valor à carga do elétron.
- *Ionização Térmica* é o processo que permite a quebra de ligações covalentes por efeito de temperatura, gerando elétrons e lacunas (em igual número) livres, que podem ser usados na condução de corrente elétrica.
- Eventualmente, alguns elétrons retornam à ligação covalente, fenômeno conhecido como RECOMBINAÇÃO.
- A taxa de recombinação é proporcional ao número de elétrons livres e de lacunas. Por sua vez, a quantidade destes portadores é proporcional à taxa de ionização, que é muito dependente da temperatura.

# Mais conceitos

- No equilíbrio térmico, a concentração de elétrons livres,  $n$ , é igual à concentração de lacunas,  $p$ :  $n = p = n_i$ , sendo  $n_i$  a concentração no silício intrínseco (semicondutor puro, i. e., não *dopado*).
- Sabe-se que  $n_i^2 = B T^3 e^{(-E_G/kT)}$ , sendo  $B$  a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura absoluta em kelvins,  $E_G$  a largura da banda proibida do material.
- Em temperatura ambiente ( $T \approx 300\text{K}$ ),  $n_i \approx 1,5 \times 10^{10}$  portadores/cm<sup>3</sup>.
- Obs.: um cristal de silício possui  $5 \times 10^{22}$  átomos/cm<sup>3</sup>.

# Difusão e Deriva

- Os mecanismos mais conhecidos de movimentação de portadores em materiais semicondutores são a DIFUSÃO e a DERIVA.
- A **difusão** está associada ao movimento aleatório de elétrons e lacunas livres em decorrência da agitação térmica.
- Para um cristal com concentração de portadores não uniforme (como na Figura 3.42), a corrente de difusão é dada por:

$$J_{p(dif)} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

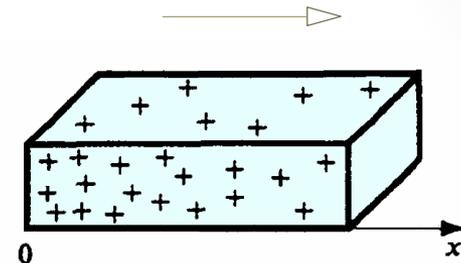
$$J_{n(dif)} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

Se  
fossem  
elétrons

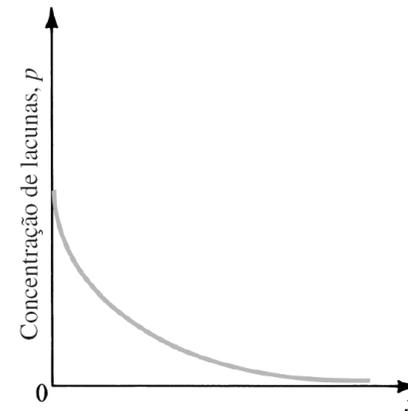
Sendo:

- $J_p$  e  $J_n$ : densidade de corrente [A/cm<sup>2</sup>].
- $q$ : carga do elétron.
- $D_p$  e  $D_n$ : constantes de difusividade. (tipicamente,  $D_p = 12$  cm<sup>2</sup>/s e  $D_n = 34$  cm<sup>2</sup>/s)

$i_D$ : corrente de difusão



(a)



(b)

**Figura 3.42** Uma barra de silício intrínseco (a) mostrando um perfil de concentração de lacunas (b) criado ao longo do eixo  $x$  por algum mecanismo não especificado.

# O Movimento de Deriva

- Ocorre em função da aplicação de um campo elétrico,  $E$ , a uma barra hipotética de material semiconductor.
- Os portadores (elétrons e lacunas) são acelerados e adquirem uma velocidade, denominada velocidade de deriva.
- O movimento de deriva se sobrepõe ao movimento térmico (difusão).
- Neste caso:

$$v_{\text{deriva}(p)} = \mu_p E.$$

$$v_{\text{deriva}(n)} = \mu_n E.$$

- Sendo  $\mu_p$  e  $\mu_n$  as constantes de mobilidade de lacunas e elétrons. Tipicamente, para o silício intrínseco,  $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  e  $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ . Ou seja,  $\mu_n \approx 2,5\mu_p$ .
- Assim, considerando um cristal de silício com densidade de lacunas  $p$  e elétrons  $n$ , tem-se:

$$J_{p(\text{deriva})} = q p \mu_p E \quad \text{e} \quad J_{n(\text{deriva})} = q n \mu_n E.$$

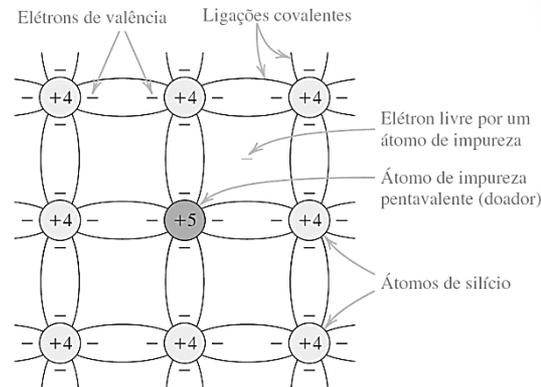
$$\therefore J_{(\text{deriva})} = q(p \mu_p + n \mu_n) E.$$

- Que é da forma:  $E = \rho J$ . Sendo,  $\rho = 1/[q(p \mu_p + n \mu_n)]$ .
- Por fim, tem-se a relação de Einstein:

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

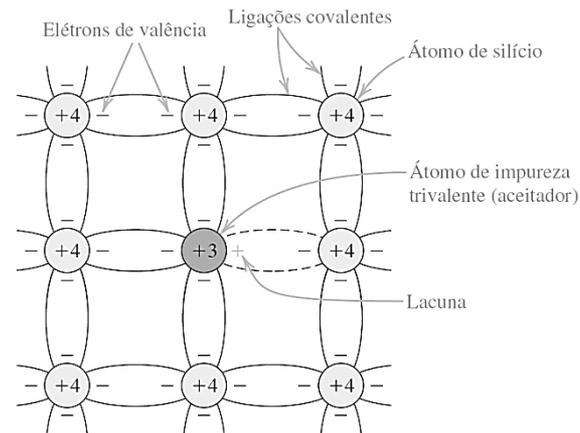
# Semicondutores Dopados

- Material *n*: material semicondutor que recebe impurezas de átomos *pentavalentes* (e. g., P) tal que haja uma predominância de elétrons livres, em detrimento de lacunas livres. Diz-se que os elétrons são os portadores *majoritários* no material *n*.



**Figura 3.43** Um cristal de silício dopado com uma impureza pentavalente. Cada átomo dopante doa um elétron livre e assim é chamado doador. O semicondutor dopado torna-se tipo *n*.

- Material *p*: material semicondutor que recebe impurezas de átomos *trivalentes* (e. g., B) tal que haja uma predominância de lacunas livres, em detrimento de elétrons livres. Diz-se que as lacunas são os portadores *majoritários* no material *p*.



**Figura 3.44** Um cristal de silício dopado com uma impureza trivalente. Cada átomo dopante gera uma lacuna e é denominado aceitador. O semicondutor dopado torna-se tipo *p*.

- Obs.: A dopagem é realizada por processo industrial sofisticado e caro, sendo realizada a uma razão muito pequena (em relação aos átomos do semicondutor).

# Relações importantes

- Considerando uma concentração de átomos pentavalentes (doadores),  $N_D$ , e uma concentração átomos trivalentes (aceitadores),  $N_A$ , em dois materiais semicondutores distintos, é possível escrever:
- $n_{n0} \approx N_D$  e  $p_{p0} \approx N_A$ . Sendo o índice “0” para indicar o equilíbrio térmico.
- Da Física de Semicondutores, sabe-se que:
- No material  $n$ :  $n_{n0} p_{n0} \approx n_i^2$ . Sendo,  $p_{n0}$  a concentração de lacunas (que são os portadores *minoritários*) devido à ionização térmica.
- Logo: 
$$p_{n0} \approx n_i^2 / N_D \quad (\text{no material } n).$$
- E no material  $p$ :  $p_{p0} n_{p0} \approx n_i^2$ . Sendo,  $n_{p0}$  a concentração de elétrons (que são os portadores *minoritários*) devido à ionização térmica.
- Logo: 
$$n_{p0} \approx n_i^2 / N_A \quad (\text{no material } p).$$
- Sabe-se que um cristal de silício tipo  $n$  ou tipo  $p$  é eletricamente neutro, pois os portadores majoritários são neutralizados pelas cargas fixas associadas aos átomos de impureza.

# A Junção p-n

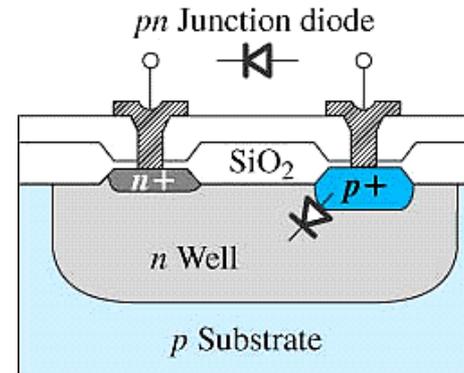
É formada pela dopagem de um material semiconductor com impurezas doadoras (pentavalentes) e aceitadoras (trivalentes) em áreas distintas e vizinhas, formando a *junção metalúrgica*.

Esquemática simplificada:



**Figura 3.39** Estrutura física simplificada do diodo de junção. (A geometria real é dada no Apêndice A.)

Construção mais realista:



Traduzindo:

*Junction*: junção.

*Well*: poço.

*Substrate*: substrato ou base.

# Técnica de Fabricação

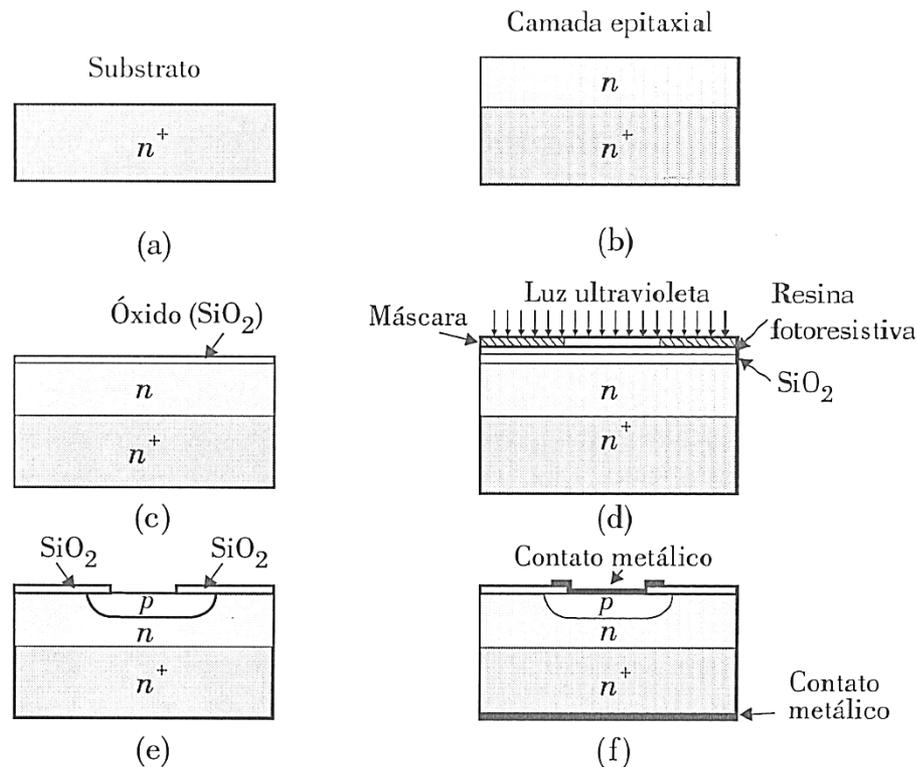
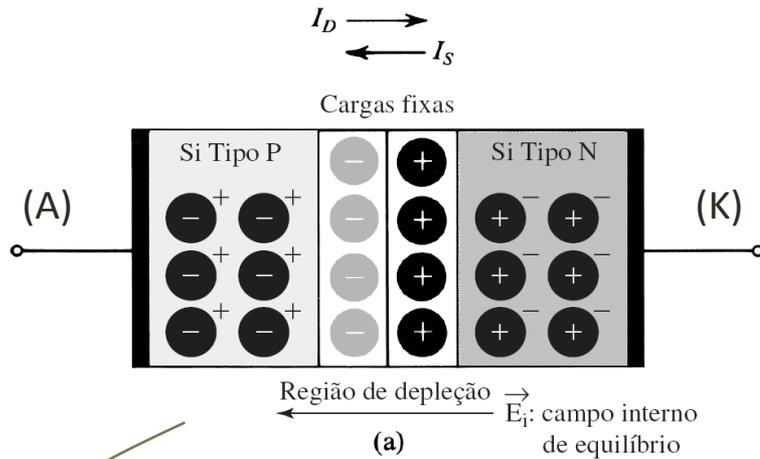


Figura 6.1: Etapas da fabricação de um diodo de junção  $p$ - $n$  com a tecnologia planar: (a) pastilha de Si usada como substrato; (b) substrato com camada de Si epitaxial dopado com impurezas tipo  $n$ ; (c) camada óxida sobre o Si; (d) ilustração do processo de fotolitografia para polimerizar certas regiões da resina foto-resistiva; (e) difusão de impurezas tipo  $p$  através da janela aberta no óxido; (f) estrutura completa do diodo de junção com contatos metálicos.

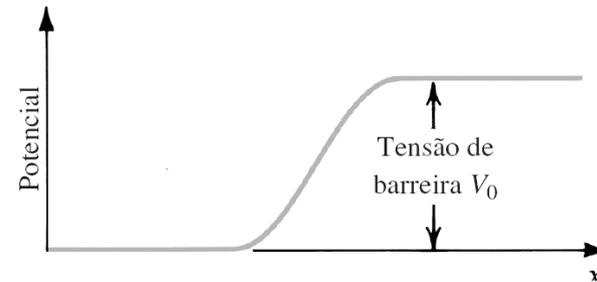
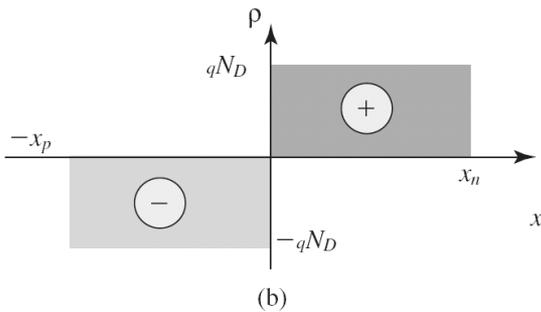
Fonte: Rezende, S. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*.  
Editora Livraria da Física, São Paulo, 2ª. Edição, 2004.

# A Junção *pn* em Circuito Aberto

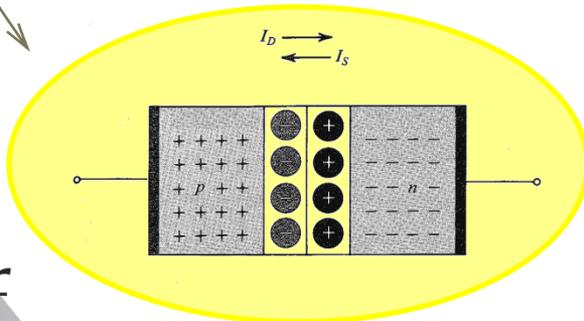


$I_D$ : Corrente de difusão  
 $I_S$ : Corrente de deriva

Obs.: O livro-texto não chama atenção, nem esclarece, o fato de usar a mesma nomenclatura ( $I_S$ ) para designar a corrente de deriva e corrente de saturação dos diodos reais.



**Figura 3.45<sup>10</sup>** (a) A junção *pn* sem tensão aplicada (circuito com terminais abertos)  $-E_i$  é o campo elétrico interno. (b) distribuição da densidade de cargas ( $\rho$ ) ao longo da região de depleção. (c) A distribuição de potencial ao longo do eixo perpendicular à junção.



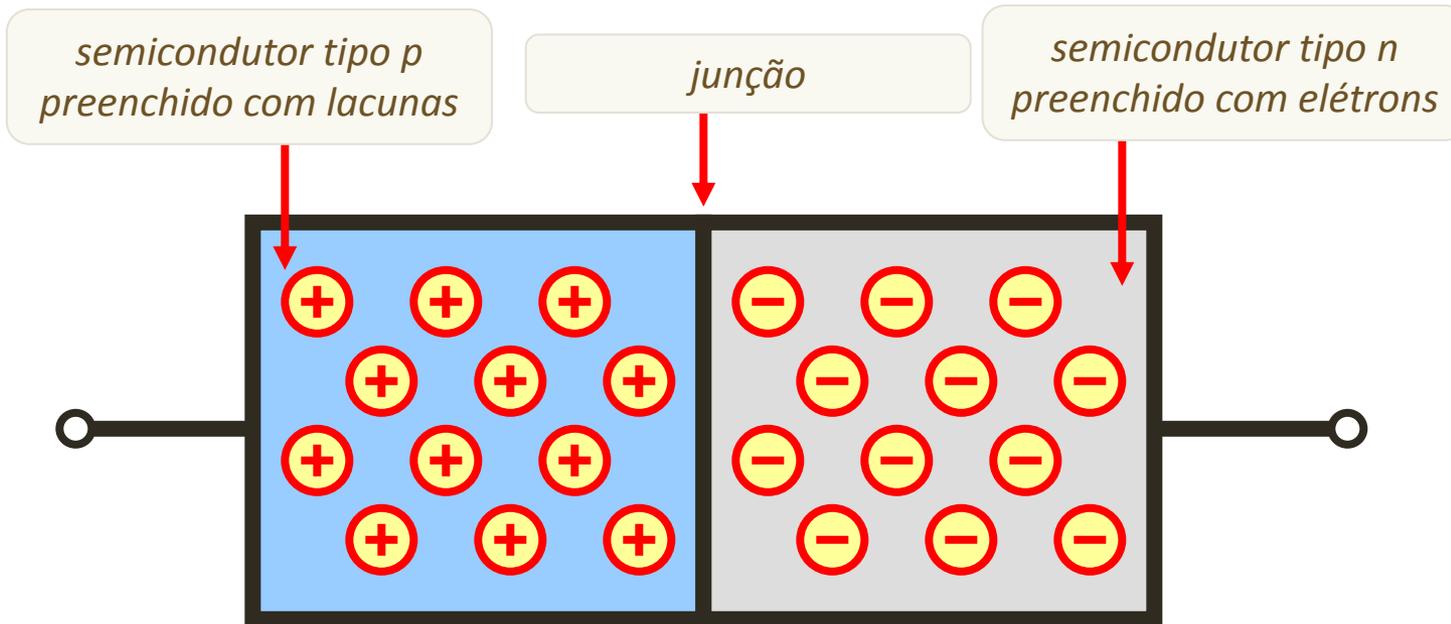
*Representação original (em inglês) do Sedra, ed. 5. (Apenas os portadores majoritários são representados).*

# Alguns conceitos

- Na Figura 3.45(a) anterior não foram representados os portadores majoritários, para não sobrecarregar a ilustração.
- Lacunas do lado  $p$  e elétrons do lado  $n$  se difundem em sentidos opostos e acabam RECOMBINANDO com seus correspondentes em ligações covalentes nas proximidades da junção.
- Este processo contribui para o desaparecimento de cargas livres na região da junção, gerando CARGAS DESCOBERTAS.
- Tal região próxima à junção fica, portanto, carente ou *depletada* de portadores livres. É, então, conhecida como REGIÃO DE DEPLEÇÃO, às vezes referenciada como REGIÃO DE CARGA ESPACIAL.
- Note que o lado  $n$  fica com carga positiva e o lado  $p$  com carga negativa, conforme representado na Figura 3.45(b).
- Esta configuração de cargas opostas na região de depleção resulta em um campo elétrico interno,  $E_i$ , conforme representado na Figura 3.45(c).
- O campo  $E_i$  se opõe à continuidade de difusão de cargas, criando o que é conhecido como BARREIRA DE POTENCIAL. Maior a barreira (tensão interna:  $V_0$ ), menor  $I_D$ .

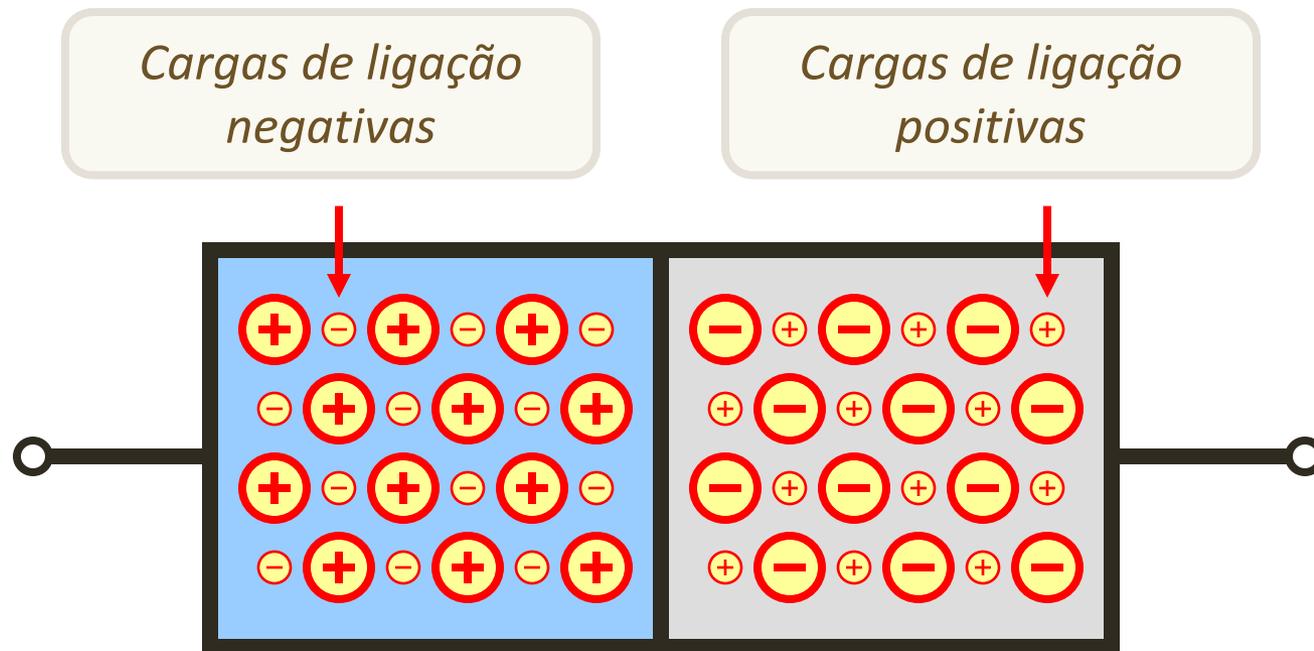
# A Difusão - Animação

Passo #1: Semicondutores tipo  $p$  e tipo  $n$  formam a junção



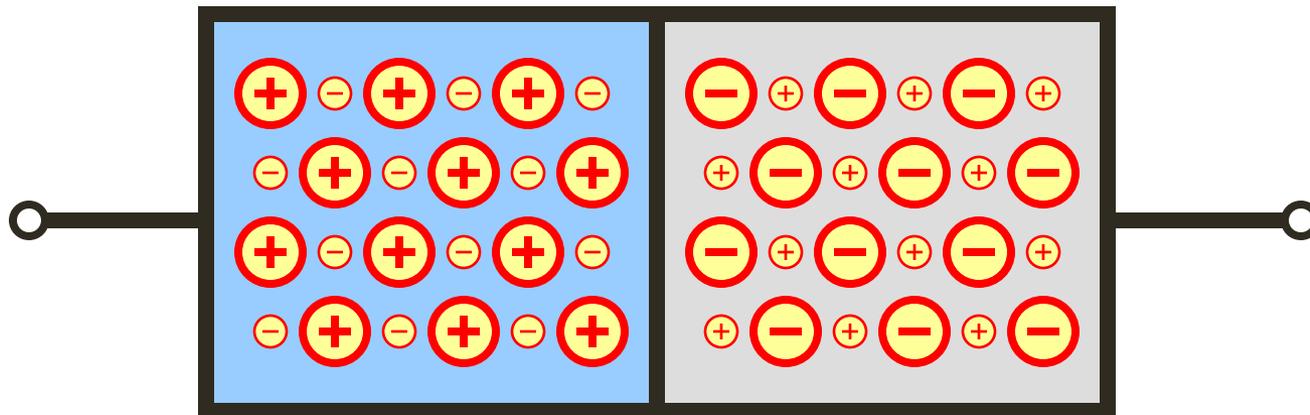
**Figura:** A junção  $pn$  sem tensão externa aplicada (terminais em circuito aberto).

Passo #1A: Cargas de ligação são atraídas (do entorno) pelos elétrons e lacunas dos materiais  $n$  e  $p$ , respectivamente. Elas permanecem fracamente ligadas aos portadores majoritários, mas não recombinaem.



**Figura:** A junção  $pn$  sem tensão externa aplicada (terminais em circuito aberto).

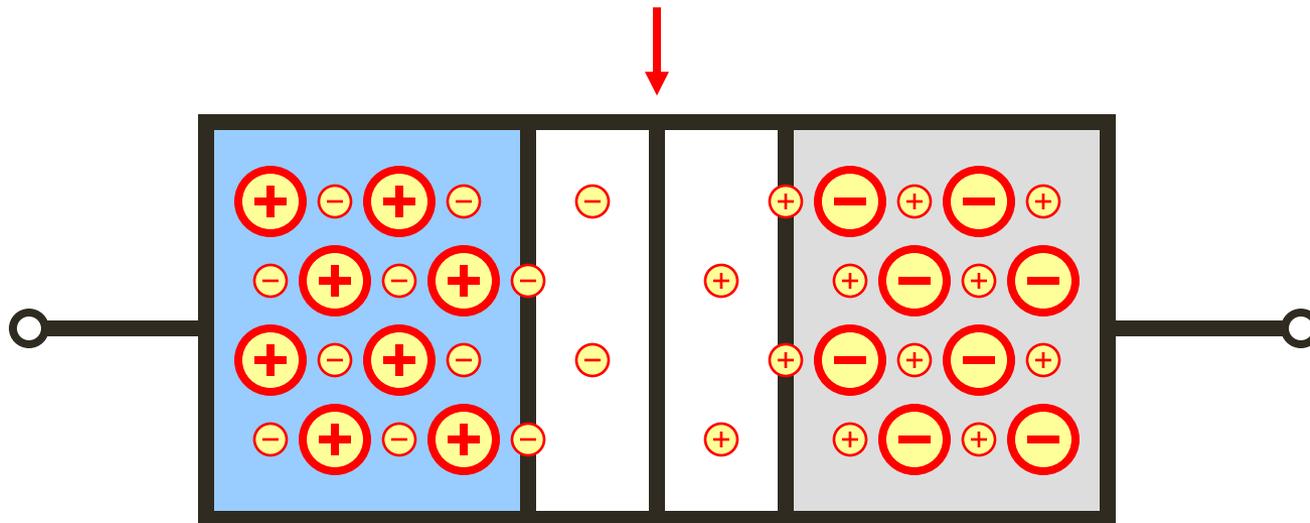
Passo #2: A difusão começa. Os elétrons e lacunas livres, que estão próximos à junção, irão se recombinar e, essencialmente, eliminar uns aos outros.



**Figura:** A junção *pn* sem tensão externa aplicada (terminais em circuito aberto).

Passo #3: A **região de depleção** começa a se formar, tão logo a difusão ocorre e elétrons livres se recombinaem com lacunas.

A região de depleção é preenchida com “cargas descobertas” – que perderam os portadores majoritários aos quais *estavam* associadas.



**Figura:** A junção *pn* sem tensão externa aplicada (terminais em circuito aberto).

# Mais conceitos

- Devido ao campo elétrico interno, portadores livres MINORITÁRIOS (gerados termicamente) também se movimentam através da junção pelo fenômeno de DERIVA.
- A CORRENTE DE DERIVA,  $I_S$ , é formada pelo fluxo de lacunas minoritárias do lado  $n$  para o lado  $p$  e elétrons minoritários do lado  $p$  para o lado  $n$  pela borda da junção, com sentido contrário à corrente de difusão,  $I_D$ .
- A corrente de deriva é muito dependente da temperatura e independente do valor de  $V_0$ .
- Na condição de circuito aberto, não há corrente externa, de modo que:  $I_D = I_S$ .
- A tensão interna obedece à lei matemática:  $V_0 = V_T \ln(N_A N_D / n_i^2)$ .
- Para o silício,  $V_0$  está entre 0,6 e 0,8V. Porém, esta tensão é anulada pelas tensões de contato, de modo que em circuito aberto,  $V_{AK} = 0$ .
- Para junções  $pn$  projetadas como células fotovoltaicas (com exposição da junção à luz natural ou artificial), é possível obter uma tensão gerada nos terminais do dispositivo, que é função da radiação incidente. Neste caso, a energia solar (ou luminosa) é suficiente para se vencer a tensão de contato.

# Largura da Camada de Depleção

- A região de depleção existe tanto no lado  $p$  e quanto no lado  $n$ , havendo quantidade de cargas iguais em ambos os lados.
- Contudo, por conta da assimetria natural da dopagem nos dois lados da junção, as larguras das camadas de depleção não são iguais.
- Para compensar a assimetria da dopagem, a camada de depleção se estenderá mais profundamente no material mais levemente dopado.
- Considerando a largura de depleção no lado  $p$  igual a  $x_p$  e no lado  $n$  igual a  $x_n$ , é possível escrever:  $q x_p A N_A = q x_n A N_D$ , que pode ser reescrita como:

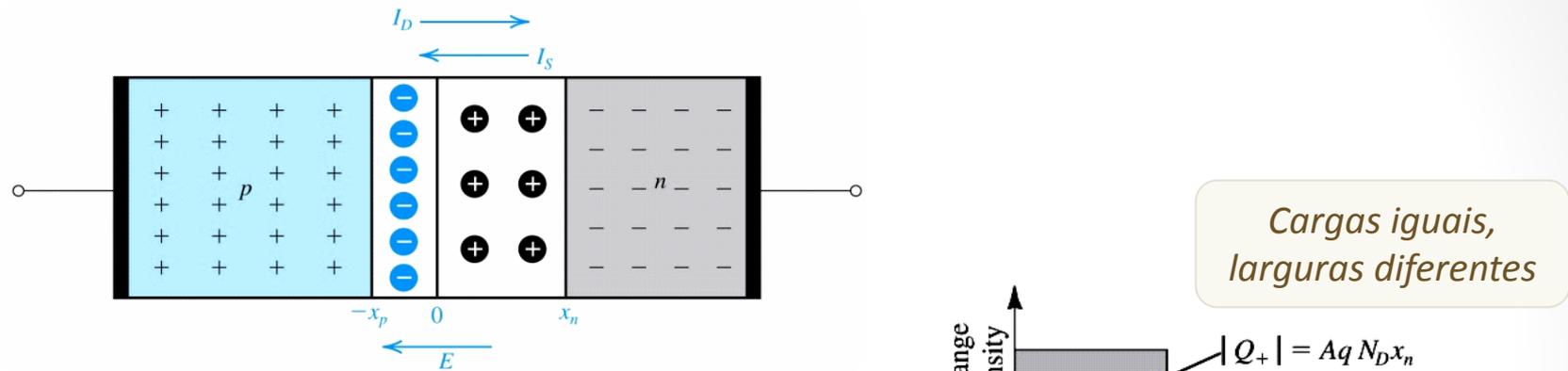
$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}. \quad A: \text{área da junção.}$$

- Sabe-se, ainda, da Física de Semicondutores, que:

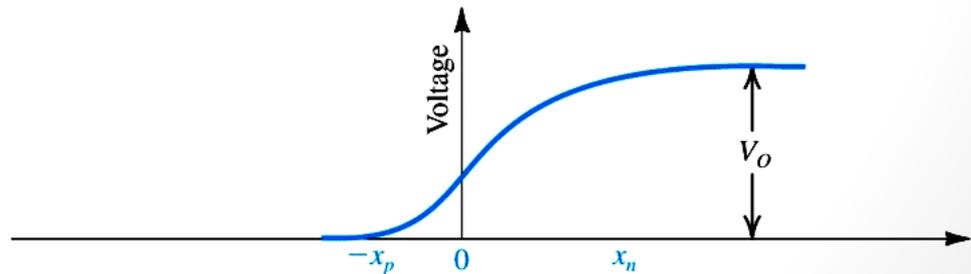
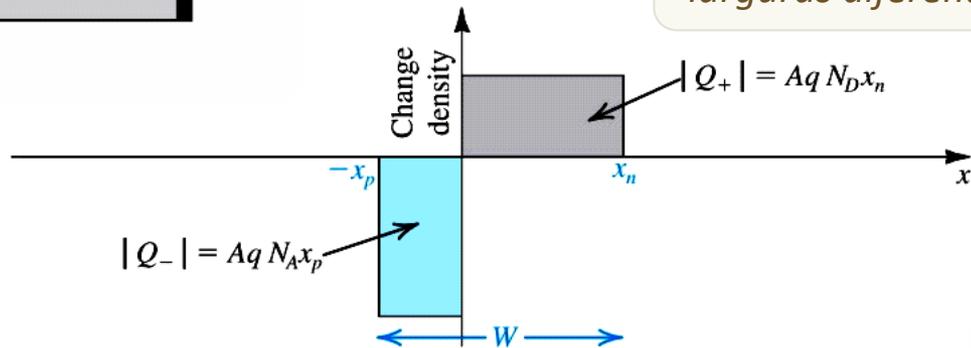
$$W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0}.$$

- Sendo  $\varepsilon_s$  a permissividade elétrica do silício =  $11,7 \varepsilon_0 = 1,04 \times 10^{-12}$  F/cm. Tipicamente  $W_{dep}$  é da ordem de 0,1 a  $1\mu\text{m}$ .

# Assimetria na Região de Depleção



O que muda neste caso? =>



# Exercício 3.32

- Para uma junção  $pn$  com  $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$  e  $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$  a  $T = 300\text{K}$ , determine a tensão interna, a largura da região de depleção e as distâncias pelas quais ela se estende no lado  $p$  e no lado  $n$ . Utilize  $n_i = 1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ .
- Solução: Considerando  $V_T = 25\text{mV}$  e aplicando a equação de definição de  $V_0$ , tem-se:  $V_0 = 0,025 \ln [(10^{17} \cdot 10^{16}) / (1,5 \times 10^{10})^2] = 728\text{mV}$ .  
Com o valor  $V_0$  de é possível encontrar a largura  $W_{dep}$ :

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2 \times 1,04 \times 10^{-12}}{1,6 \times 10^{-19}} \left( \frac{1}{1 \times 10^{17}} + \frac{1}{1 \times 10^{16}} \right) 0,728} = 0,32 \mu\text{m}.$$

$$\text{Logo: } x_p = 0,32 \mu - x_n. \quad \text{Assim: } \frac{x_n}{0,32 \mu - x_n} = \frac{1 \times 10^{17}}{1 \times 10^{16}}.$$

Que resulta em:

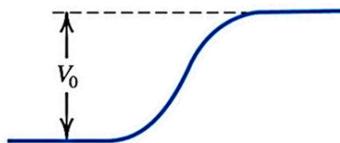
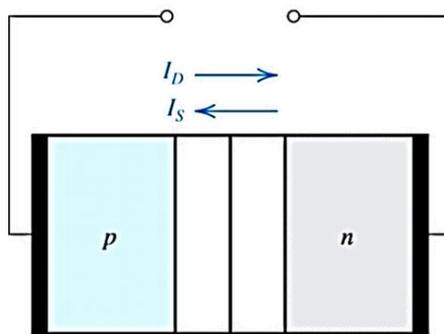
$$x_n = 0,29 \mu\text{m} \quad e \quad x_p = 0,03 \mu\text{m}.$$

# O que Ocorre na Junção $pn$ em Outras Condições?

1) Sem tensão aplicada

2) Tensão diferencial na região de depleção vale  $V_0$

3)  $I_D = I_S$

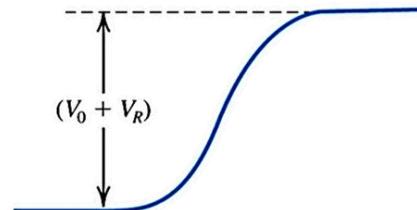
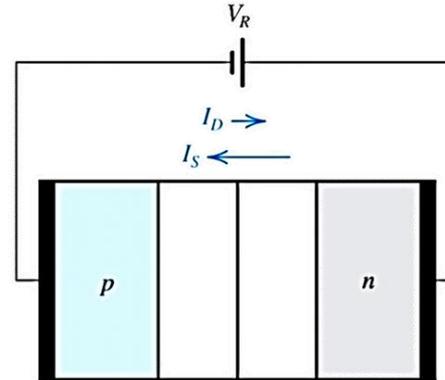


(a) Circuito aberto (equilíbrio)

1) Tensão negativa aplicada

2) Tensão diferencial na região de depleção vale  $V_0 + V_R$

3)  $I_D < I_S$

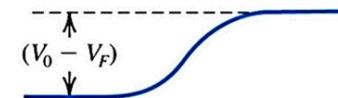
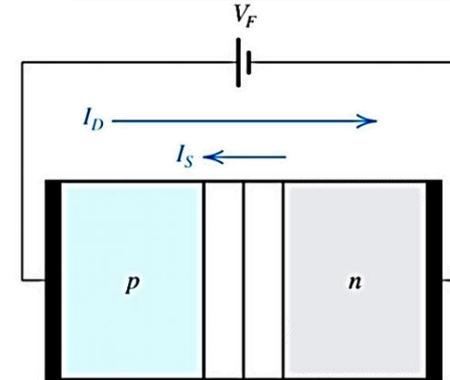


b) Polarização Inversa

1) Tensão positiva aplicada

2) Tensão diferencial na região de depleção vale  $V_0 - V_F$

3)  $I_D > I_S$

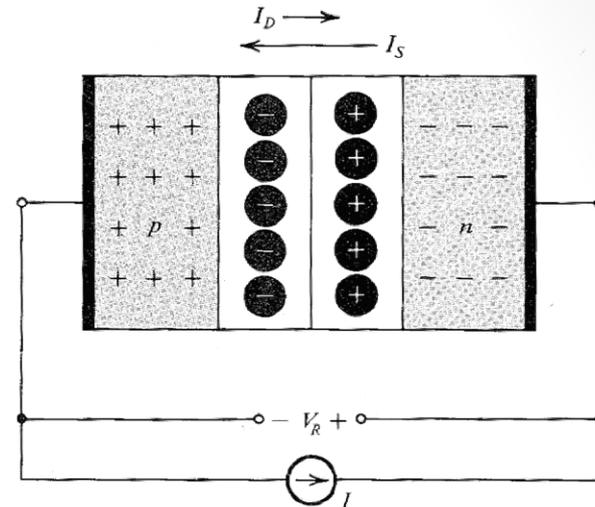


(c) Polarização Direta

# Em Polarização Inversa (ou Reversa)

Atenção: Este ponto está confuso no Sedra ed. 5 (parece haver referência equivocada a figuras, além de terem sido feitas modificações pelos tradutores da USP).

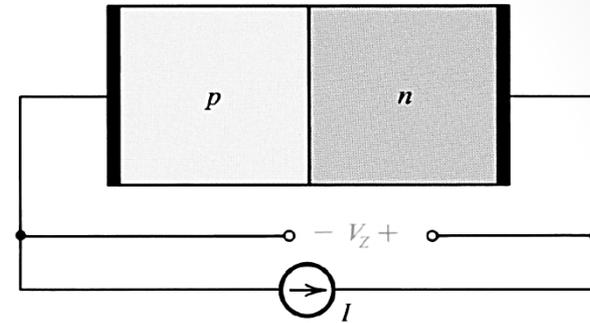
- Admite-se que  $I$  é inferior a  $I_S$  (valor muito pequeno, e. g. [nA]). Do contrário, se estabeleceria a RUPTURA reversa.
- A fonte externa promove uma movimentação de elétrons do material  $n$  para o material  $p$  (e lacunas no sentido inverso).
- Este movimento contribui para o aumento de cargas fixas descobertas aumentem, ampliando a extensão da região de depleção.
- Desta forma a barreira de potencial aumenta, contribuindo para a redução da corrente de difusão,  $I_D$ .



- No equilíbrio,  $I = I_S - I_D$ .
- A tensão terminal, neste caso, pode ser medida, sendo representada por  $V_R$ .
- O efeito da polarização inversa também pode ser alcançado de forma idêntica pela aplicação de uma tensão reversa  $V_R$ , com módulo inferior a  $V_{ZK}$  (tensão de RUPTURA).
- No equilíbrio,  $I_D \approx 0$  e  $I_S \approx I_D$ .

# A Junção $pn$ na Ruptura

- Se a corrente inversa externa for maior que  $I_S$  haverá ainda maior movimentação de elétrons do material  $n$  para o material  $p$  (pelo circuito externo) e lacunas no sentido oposto.
- Este processo contribui para um aumento da quantidade de cargas fixas (ou de ligação) descobertas na região de depleção.
- Isto aumenta significativamente a extensão da região de depleção e da barreira de potencial, o que contribui para uma redução da corrente de difusão,  $I_D$  (se reduzindo a aproximadamente zero).
- Neste ponto ( $I_D = 0$ ), um novo mecanismo se estabelece para sustentação da corrente externa, podendo ser do tipo *Avalanche* ou *Efeito Zener*.

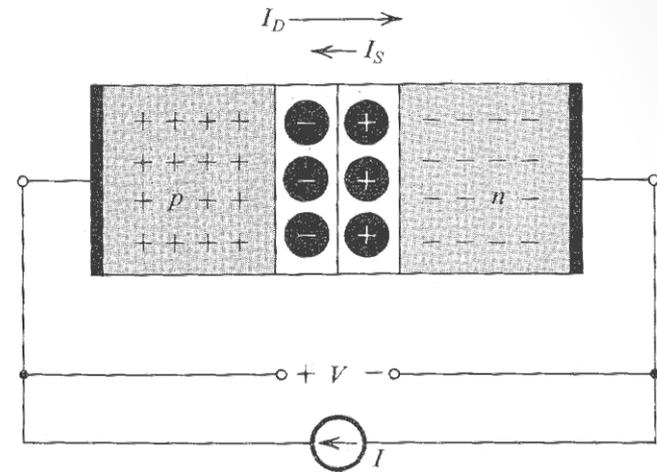


**Figura 3.48** A junção  $pn$  excitada por uma fonte de corrente inversa  $I$ , em que  $I > I_S$ . A junção rompe e a tensão  $V_Z$ , com a polaridade indicada, se desenvolve por meio da junção.

- Para  $V_Z < 5V$ : Efeito Zener.
- Se  $V_Z > 7V$ : Efeito Avalanche.
- Para  $5V < V_Z < 7V$ : Avalanche ou Zener.
- Efeito Zener: geração de pares elétron-lacuna livres em função da elevação do campo elétrico.
- Avalanche: Portadores minoritários acelerados pelo campo elétrico rompem ligações covalentes (colisões), gerando mais portadores livres.
- Em qq caso, a tensão terminal muda muito pouco com a elevação da corrente.

# A Junção $pn$ em Polarização Direta

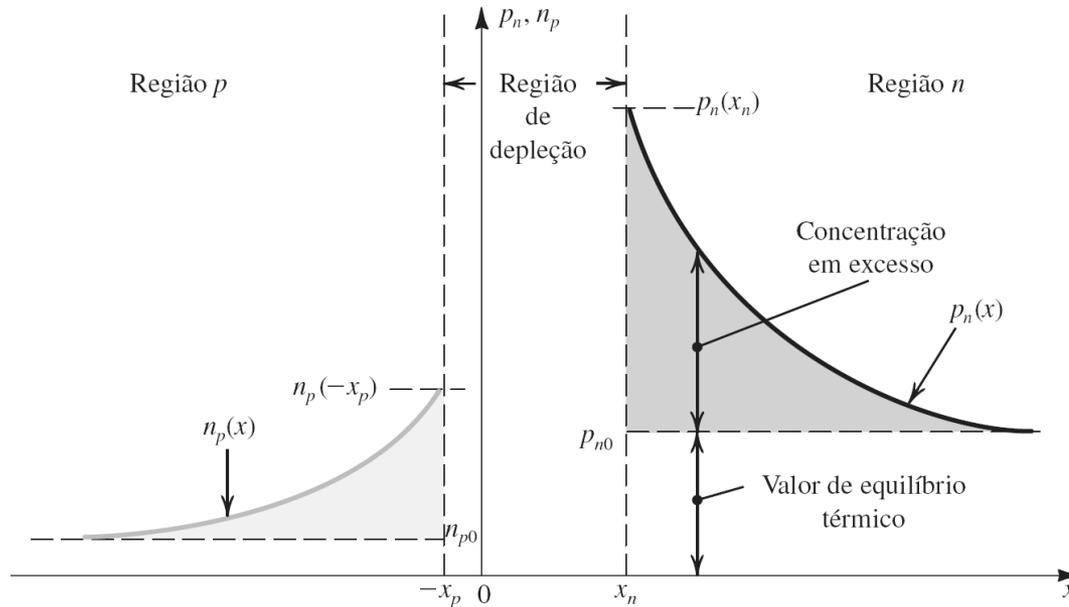
- Suponha  $I$  no sentido direto, como indicado na figura.
- Isso contribui para o fornecimento de portadores majoritários do circuito externo, ao lado  $p$  e lado  $n$ .
- Tais portadores neutralizam algumas cargas de ligação (fixas) na região de depleção, reduzindo sua extensão.
- Assim, a barreira de potencial diminui, contribuindo para a elevação da corrente de difusão,  $I_D$ . No equilíbrio,  $I = I_D - I_S$ .



- Devido à diminuição da barreira, elétrons são injetados do lado  $n$  para o lado  $p$ , e lacunas fazem o caminho inverso.
- Tais portadores injetados se tornam MINORITÁRIOS no outro lado da junção.

# Excesso de Portadores Minoritários

- A concentração de portadores minoritários (elétrons) em excesso na região  $p$  é definida por  $n_p$ .
- A concentração de portadores minoritários (lacunas) em excesso na região  $n$  é definida por  $p_n$ .
- Em operação estável, a distribuição exponencial da Figura 3.50 permanece constante e dá origem ao aumento na corrente de difusão,  $I_D$ , acima da corrente de deriva,  $I_S$ .



**Figura 3.50** Distribuição de excesso de portadores minoritários em uma junção  $pn$  diretamente polarizada. Supõe-se que o material  $p$  é mais fortemente dopado que o material  $n$ , ou seja,  $N_A \gg N_D$ .

# A Relação $v-i$ na Junção $pn$ Diretamente Polarizada

- Como mencionado, pela injeção de portadores majoritários de um lado a outro da junção (em função da tensão direta,  $V$ ), estes portadores se tornam minoritários no lado oposto.
- Assim, sua concentração em excesso (e não uniforme) promove um aumento na corrente de difusão,  $I_D$ , bem acima do valor de  $I_S$ .
- Logo, a relação  $v-i$  deve ser associada ao fenômeno da difusão relacionado à concentração não uniforme de portadores minoritários em excesso em cada lado da junção.
- Para as lacunas minoritárias no lado  $n$ , é possível escrever (da Física de Semicondutores) as equações ao lado.
- Relações similares podem ser escritas para a concentração de elétrons no lado  $p$ .

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (\text{eq3.45})$$

$p_n(x_n)$  = concentração de buracos na região  $n$  em função de  $x_n$   
 $p_{n0}$  = concentração no equilíbrio térmico  
 $v$  = tensão de polarização direta  
 $V_T$  = tensão térmica

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{v/V_T} \quad (\text{eq3.58})$$

Que é conhecida como Lei da Junção.

Assim:

$$\begin{aligned}
 \text{concentração em excesso} &= p_n(x_n) - p_{n0} = p_{n0} e^{v/V_T} - p_{n0} \\
 &= p_{n0} (e^{v/V_T} - 1)
 \end{aligned}$$

# A Relação $v-i$ (cont.)

- A concentração em excesso de lacunas minoritárias em uma dada distância  $x$  qualquer, em relação ao limite da região de depleção ( $x_n$ ), e o **comprimento de difusão** ( $L_p$ ), é dada por:

$$p_n(x) = p_{n0} + \underbrace{(\text{concentração em excesso})}_{p_{n0}(e^{V/V_T} - 1)} e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (\text{eq3.59})$$

Ou seja 
$$= p_{n0} + p_{n0}(e^{V/V_T} - 1)e^{-(x-x_n)/L_p}$$

- Quanto menor o valor de  $L_p$ , mais rapidamente as lacunas serão recombinadas (com elétrons majoritários), resultando em maior taxa de decaimento.
- Na prática,  $L_p$  está relacionada ao tempo de vida dos portadores minoritários,  $\tau_p$ , que é o tempo médio que a lacuna injetada na região  $n$  leva para se recombinar.

# A Relação $v$ - $i$ (cont.)

- As lacunas em difusão na região  $n$  darão origem a uma corrente de lacunas cuja densidade pode ser determinada usando as equações 3.37 (densidade de corrente de difusão) e 3.59 do livro-texto:

tomando a expressão da densidade de  $J_{p(dif)}$

$$J_{p(dif)} = -qD_p \frac{dp_n(x)}{dx} = -qD_p \underbrace{\left( \frac{d}{dx} [p_{n0}] \right)}_0 + \dots$$

$$\dots + \frac{d}{dx} \left[ p_{n0} (e^{v/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p} \right]$$

$$\frac{-p_{n0} (e^{v/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}}{L_p}$$

- Obs: no estado estável os portadores majoritários terão que ser repostos pelo circuito externo (formando, assim, a base da corrente efetiva fornecida pela bateria) para a região  $n$  a uma taxa que mantenha a corrente constante em seu valor no ponto  $x=x_n$ , que é o ponto de máxima densidade:

Que resulta em:

$$(eq. 3.36) \quad J_{p(dif)} = -qD_p \underbrace{\left( -\frac{p_{n0} (e^{v/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}}{L_p} \right)}_{\frac{dp_n(x)}{dx}}$$

Cujo valor máximo é:

$$\max(J_{p(dif)}) = J_{p(dif)}(x_n) = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{v/V_T} - 1)$$

# A Relação $v$ - $i$ e a Corrente de Saturação, $I_S$

- A corrente externa é, então, função da soma envolvendo a máxima concentração de lacunas (no lado  $n$ ) e concentração de elétrons (no lado  $p$ ):

A corrente total ( $i$ ) através da junção é igual à área ( $A$ ) vezes as máximas densidades de corrente de lacunas ( $J_{p-dif}$ ) e elétrons ( $J_{n-dif}$ )

$$i = A \left[ J_{p-dif} (+x_n) + J_{n-dif} (-x_p) \right]$$

$$i = A \left[ q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right] (e^{v/V_T} - 1)$$

após a substituição dos valores máximos

$$i = Aqn_i^2 \left[ \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right] (e^{v/V_T} - 1)$$

substituindo

$$p_{n0} = n_i^2 / N_D \text{ and } n_{p0} = n_i^2 / N_A$$

$$\therefore i = I_S (e^{v/V_T} - 1)$$

- A corrente de saturação fica, assim, definida por:

$$I_S = Aqn_i^2 \left[ \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right]$$

# Observações Conclusivas

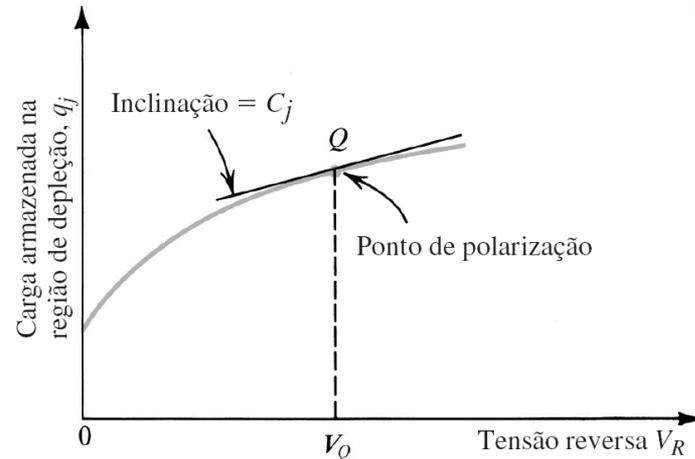
- A corrente de saturação é proporcional à área da junção  $pn$ .
- A corrente de saturação é proporcional a  $n_i^2$  que, por sua vez, é muito dependente da temperatura (agitação térmica).
- Observe que a equação deduzida não inclui a constante de correção “ $n$ ” (*oops*, esse é outro parâmetro que usa nomenclatura idêntica a outros conceitos usados no livro-texto; neste caso  $n$  também é usada para definir o material dopado, rico em elétrons).

# A Capacitância de Depleção (Polarização Inversa)

$$q_J = q_N = qN_Dx_nA$$

$$q_J = q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A W_{\text{dep}}$$

$$W_{\text{dep}} = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{q}\right)\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + V_R)}$$



**Figura 3.47** A carga armazenada em ambos os lados da camada de depleção como uma função da tensão inversa  $V_R$ .

Alternativamente

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}}$$

$$C_{j0} = A \sqrt{\left(\frac{\epsilon_s q}{2}\right)\left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}\right)\left(\frac{1}{V_0}\right)}$$

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_0}\right)^m}$$

$m$  é o coeficiente de graduação da junção, variando entre  $\frac{1}{3}$  e  $\frac{1}{2}$ .

# A Capacitância de Difusão

- O excesso de carga relativo aos portadores minoritários (lacunas) no material  $n$  é representado na Figura 3.50 (área hachurada) e pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} Q_p &= Aq \times \text{área embaixo da exponencial } p_n(x) \\ &= Aq \times [p_n(x_n) - p_{n0}]L_p \end{aligned}$$

- Substituindo o valor de  $p_n(x_n)$  definido anteriormente e empregando a expressão da densidade de corrente, permite encontrar:

$$Q_p = \frac{L_p^2}{D_p} I_p$$

(sendo  $I_p = A J_p$ , a componente de corrente de lacunas)

- Mas, pela equação que define o tempo de vida das lacunas,  $\tau_p$ , obtém-se:
- Uma relação similar para os elétrons minoritários no material  $p$  resulta em:

$$Q_p = \tau_p I_p$$

$$Q_n = \tau_n I_n$$

# A Capacitância de Difusão (cont.)

- Assim, a carga total devida aos portadores minoritários em ambos os lados da junção é dada por:

$$Q_d = \tau_p I_p + \tau_n I_n$$

- Que pode ser expressa em função da corrente do diodo,  $i$ :

$$Q_d = \tau_T i$$

*(sendo  $\tau_T$  a soma dos tempos de trânsito de lacunas e elétrons)*

- Obs.: Tipicamente, um lado da junção é mais fortemente dopado que o outro, como representado na Figura 3.50. Se, por exemplo,  $N_A \gg N_D$ , pode-se mostrar que  $I_p \gg I_n$ . Logo  $i \approx I_p$ . Além disso,  $Q_p \gg Q_n$  e  $Q \approx Q_p$ . Por fim,  $\tau_T \approx \tau_p$ .

- Por fim, a capacitância de difusão,  $C_d$ , pode ser definida para um determinado ponto de trabalho:

$$C_d = \left. \frac{dQ_d}{dv} \right|_{\text{ponto } Q} = \left( \frac{\tau_T}{V_T} \right) I_{DQ}$$

- Obs.: A capacitância de depleção sob polarização direta costuma ser dada pela equação:

$$C_j \approx 2 C_{j0}$$

*Sendo  $I_{DQ}$  a corrente no ponto de operação de interesse (ou seja,  $I_{DQ} = I_S e^{V_{DQ}/V_T}$ ).*

**Tabela 3.2** Resumo das equações importantes para operação da junção  $pn$

Grandeza	Relação	Valores de Constantes e Parâmetros (para Si intrínseco a $T = 300$ K)
Concentração de portadores no silício intrínseco ( $/\text{cm}^3$ )	$n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$	$B = 5,4 \times 10^{31}/(\text{K}^3\text{cm}^6)$ $E_G = 1,12$ eV $k = 8,62 \times 10^{-5}\text{eV/K}$ $n_i = 1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$
Densidade da corrente de difusão ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$ $J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$	$q = 1,60 \times 10^{-19}$ coulomb $D_p = 12$ $\text{cm}^2/\text{s}$ $D_n = 34$ $\text{cm}^2/\text{s}$
Densidade da corrente de deriva ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	$J_{\text{deriva}} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$	$\mu_p = 480$ $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ $\mu_n = 1.350$ $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Resistividade ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$	$\mu_p$ e $\mu_n$ diminuem com o aumento na concentração de dopantes
Relação entre mobilidade e difusividade	$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$	$V_T = kT/q$ $\approx 25,8$ mV
Concentração de portadores no silício tipo $n$ ( $/\text{cm}^3$ )	$n_{n0} \approx N_D$ $p_{n0} = n_i^2/N_D$	
Concentração de portadores no silício tipo $p$ ( $/\text{cm}^3$ )	$p_{p0} \approx N_A$ $n_{p0} = n_i^2/N_A$	
Tensão interna da junção (V)	$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$	
Largura da região de depleção (cm)	$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$ $W_{\text{dep}} = x_n + x_p$ $= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) (V_0 + V_R)}$	$\epsilon_s = 11,7\epsilon_0$ $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-14}$ F/cm
Carga armazenada na região de depleção (coulomb)	$q_J = q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A W_{\text{dep}}$	

# Resumo (cont.)

Capacitância de depleção (F)

$$C_j = \frac{\epsilon_s A}{W_{dep}}, C_{j0} = \frac{\epsilon_s A}{W_{dep}|_{V_R=0}}$$

$$m = \frac{1}{3} \text{ a } \frac{1}{2}$$

$$C_j = C_{j0} \left( 1 + \frac{V_R}{V_0} \right)^m$$

$$C_j \approx 2C_{j0} \text{ (para polarização direta)}$$

Corrente direta (A)

$$I = I_p + I_n$$

$$I_p = Aq n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} (e^{V/V_T} - 1)$$

$$I_n = Aq n_i^2 \frac{D_n}{L_n N_A} (e^{V/V_T} - 1)$$

Corrente de saturação (A)

$$I_s = Aq n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

Tempo de vida dos portadores comunitários (s)

$$\tau_p = L_p^2/D_p \quad \tau_n = L_n^2/D_n$$

$$L_p, L_n = 1 \text{ a } 100 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\tau_p, \tau_n = 1 \text{ a } 10^4 \text{ ns}$$

Carga armazenada devido aos portadores minoritários (C)

$$Q_p = \tau_p I_p \quad Q_n = \tau_n I_n$$

$$Q = Q_p + Q_n = \tau_T I$$

Capacitância de difusão (F)

$$C_d = \left( \frac{\tau_T}{V_T} \right) I$$

# Exemplo (Sedra Ed. 6)

Consider a  $pn$  junction in equilibrium at room temperature ( $T = 300$  K) for which the doping concentrations are  $N_A = 10^{18}/\text{cm}^3$  and  $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$  and the cross-sectional area  $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$ . Calculate  $p_p$ ,  $n_{p0}$ ,  $n_n$ ,  $p_{n0}$ ,  $V_0$ ,  $W$ ,  $x_n$ ,  $x_p$ , and  $Q_J$ . Use  $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ .

## Solution

$$\begin{aligned}p_p &\simeq N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \\n_{p0} &= \frac{n_i^2}{p_p} \simeq \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{18}} = 2.25 \times 10^2 \text{ cm}^{-3} \\n_n &\simeq N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \\p_{n0} &= \frac{n_i^2}{n_n} \simeq \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{16}} = 2.25 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}\end{aligned}$$

To find  $V_0$  we use Eq. (3.22),

$$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

where

$$\begin{aligned}V_T &= \frac{kT}{q} = \frac{8.62 \times 10^{-5} \times 300 \text{ (eV)}}{q \text{ (e)}} \\&= 25.9 \times 10^{-3} \text{ V}\end{aligned}$$

Thus,

$$\begin{aligned}V_0 &= 25.9 \times 10^{-3} \ln\left(\frac{10^{18} \times 10^{16}}{2.25 \times 10^{20}}\right) \\&= 0.814 \text{ V}\end{aligned}$$

# Exemplo 2 (Sedra Ed. 6)

For the  $pn$  junction considered in Example 3.5 for which  $N_A = 10^{18}/\text{cm}^3$ ,  $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$ ,  $A = 10^{-4}\text{cm}^2$ ,  $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ , let  $L_p = 5 \mu\text{m}$ ,  $L_n = 10 \mu\text{m}$ ,  $D_p$  (in the  $n$  region)  $= 10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , and  $D_n$  (in the  $p$  region)  $= 18 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . The  $pn$  junction is forward biased and conducting a current  $I = 0.1 \text{ mA}$ . Calculate: (a)  $I_S$ ; (b) the forward-bias voltage  $V$ ; and (c) the component of the current  $I$  due to hole injection and that due to electron injection across the junction.

## Solution

(a) Using Eq. (3.41), we find  $I_S$  as

$$\begin{aligned} I_S &= 10^{-4} \times 1.6 \times 10^{-19} \times (1.5 \times 10^{10})^2 \times \\ &\quad \left( \frac{10}{5 \times 10^{-4} \times 10^{16}} + \frac{18}{10 \times 10^{-4} \times 10^{18}} \right) \\ &= 7.3 \times 10^{-15} \text{ A} \end{aligned}$$

(b) In the forward direction,

$$\begin{aligned} I &= I_S(e^{V/V_T} - 1) \\ &\approx I_S e^{V/V_T} \end{aligned}$$

Thus,

$$V = V_T \ln\left(\frac{I}{I_S}\right)$$

# Exemplo 2 (cont.)

For  $I = 0.1$  mA,

$$\begin{aligned} V &= 25.9 \times 10^{-3} \ln\left(\frac{0.1 \times 10^{-3}}{7.3 \times 10^{-15}}\right) \\ &= 0.605 \text{ V} \end{aligned}$$

(c) The hole-injection component of  $I$  can be found using Eq. (3.37)

$$\begin{aligned} I_p &= Aq \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) \\ &= Aq \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} (e^{V/V_T} - 1) \end{aligned}$$

Similarly  $I_n$  can be found using Eq. (3.39),

$$I_n = Aq \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} (e^{V/V_T} - 1)$$

Thus,

$$\frac{I_p}{I_n} = \left(\frac{D_p}{D_n}\right) \left(\frac{L_n}{L_p}\right) \left(\frac{N_A}{N_D}\right)$$

For our case,

$$\frac{I_p}{I_n} = \frac{10}{18} \times \frac{10}{5} \times \frac{10^{18}}{10^{16}} = 1.11 \times 10^2 = 111$$

# Exemplo (cont.)

To determine  $W$  we use Eq. (3.26):

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{\frac{2 \times 1.04 \times 10^{-12}}{1.6 \times 10^{-19}} \left( \frac{1}{10^{18}} + \frac{1}{10^{16}} \right) \times 0.814} \\ &= 3.27 \times 10^{-5} \text{ cm} = 0.327 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

To determine  $x_n$  and  $x_p$  we use Eq. (3.27) and (3.28), respectively:

$$\begin{aligned} x_n &= W \frac{N_A}{N_A + N_D} \\ &= 0.327 \frac{10^{18}}{10^{18} + 10^{16}} = 0.324 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_p &= W \frac{N_D}{N_A + N_D} \\ &= 0.327 \frac{10^{16}}{10^{18} + 10^{16}} = 0.003 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

Finally, to determine the charge stored on either side of the depletion region, we use Eq. (3.29)

$$\begin{aligned} Q_J &= 10^{-4} \times 1.6 \times 10^{-19} \left( \frac{10^{18} \times 10^{16}}{10^{18} + 10^{16}} \right) \times 0.327 \times 10^{-4} \\ &= 5.18 \times 10^{-12} \text{ C} = 5.18 \text{ pC} \end{aligned}$$

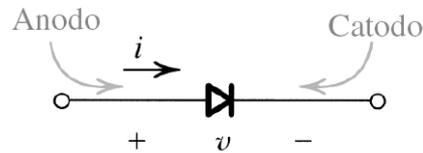
# O Diodo de Junção P-N e outros Dispositivos de Dois Terminais

# Conteúdo

- O diodo ideal (simbologia e característica v-i)
- O retificador de meia-onda ideal
- Operação como Porta Lógica
- O Diodo de Junção Real
- A Região de Polarização Direta
- Modelos Matemáticos
- O Modelo Exponencial
- O Modelo Linear por Partes
- Modelo e Operação em Pequenos Sinais
- O Diodo Zener (e Operação na Ruptura Reversa)
- O Diodo Emissor de Luz (LED)
- O Diodo Varactor (Varicap)
- Fotodiodos

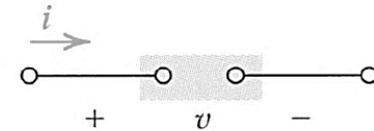
# O Diodo Ideal

- Símbolo:



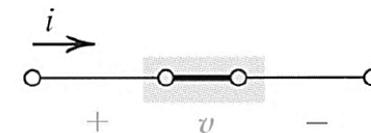
(a)

- Modelo simplificado:



$$v < 0 \Rightarrow i = 0$$

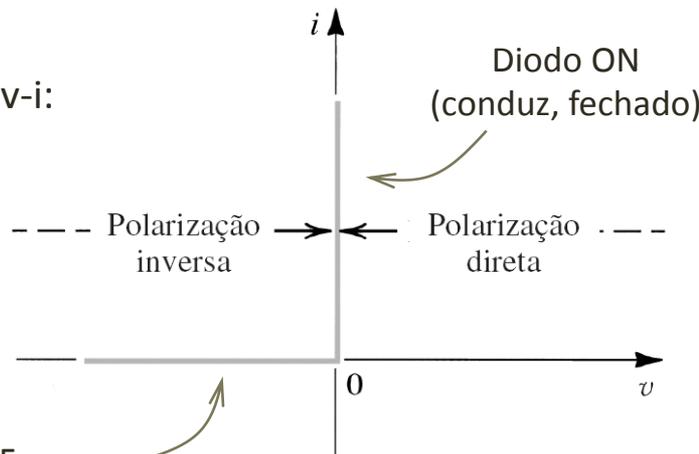
(c)



$$i > 0 \Rightarrow v = 0$$

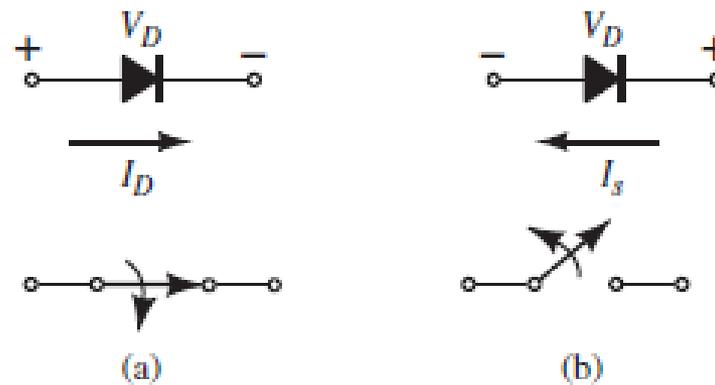
(d)

- Característica v-i:



(b)

# O Diodo Ideal

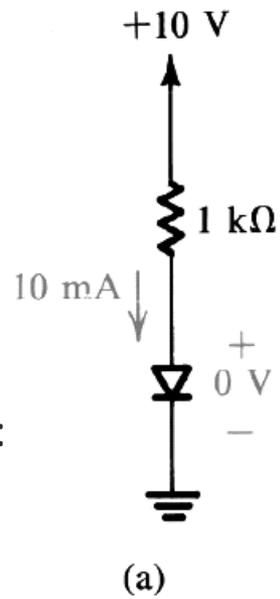


**FIG. 1.21**

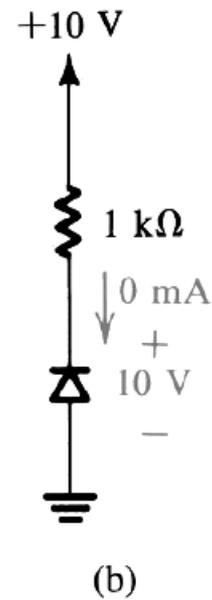
*Ideal semiconductor diode: (a) forward-biased; (b) reverse-biased.*

# Exemplo Numérico

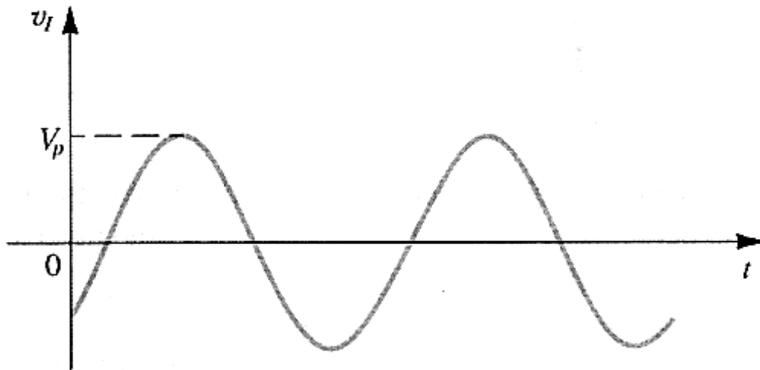
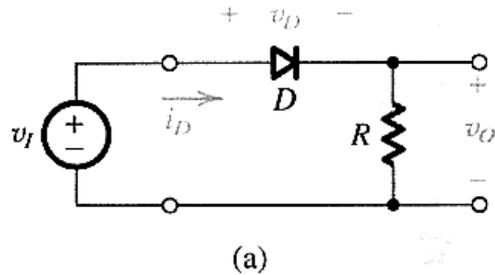
Polarização Direta:



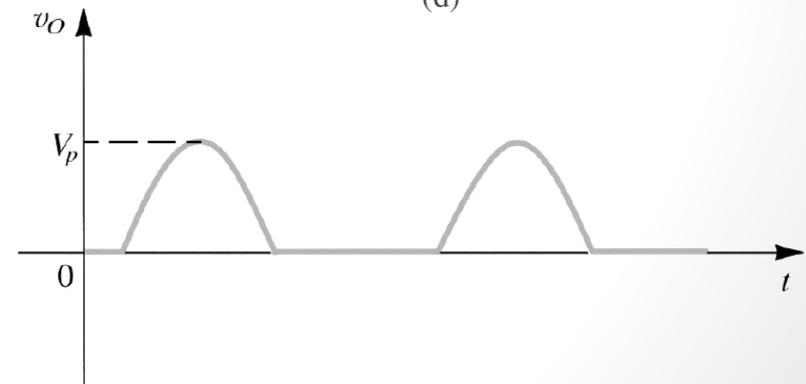
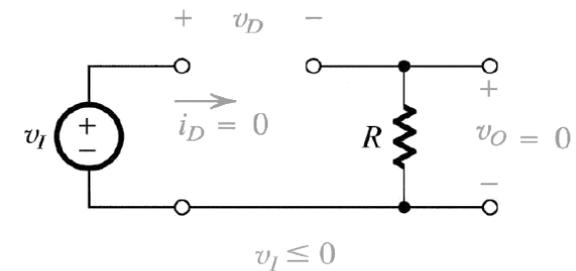
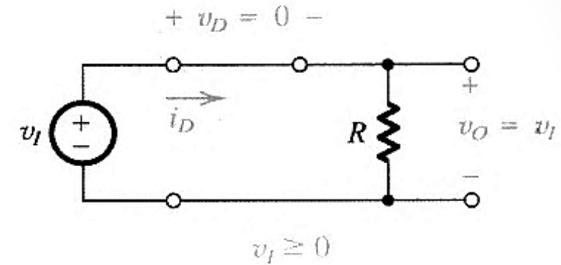
:Polarização Reversa



# O Retificador de Meia-Onda (ideal)

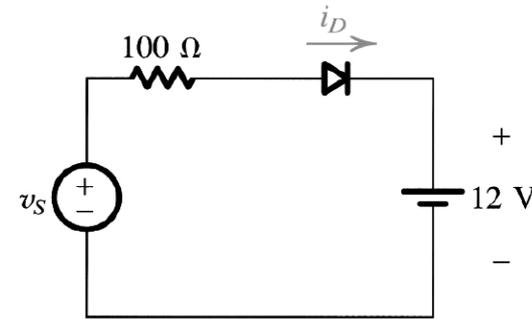


**Figura 3.3** (a) Circuito retificador. (b) Forma de onda de entrada. (c) Circuito equivalente para  $v_I \geq 0$ . (d) Circuito equivalente para  $v_I \leq 0$ . (e) Forma de onda de saída.



# Exemplo 3.1

Q. No circuito retificador de carga de bateria ao lado, a tensão de pico de  $v_s$  vale 24 V e a bateria é de 12 V. Determine a fração de tempo de cada ciclo durante a qual o diodo conduz. Determine também o valor de pico da corrente e a tensão inversa de pico (PIV)\* sobre o diodo.



(a)

S. O diodo pode conduzir quando a tensão  $v_s$  supera 12 V. Ou seja:  $24 \sin \omega t \geq 12$  V. Isto resulta em  $\omega t = \alpha \geq 30^\circ$ . Assim, por simetria, o tempo de condução do diodo em cada ciclo será dado por:

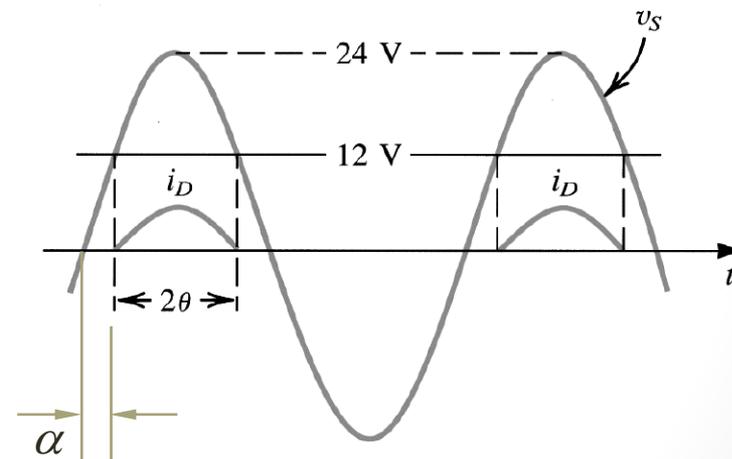
$$180^\circ - 2\alpha = 2\theta = 120^\circ.$$

Desta forma, o diodo conduz durante 2/3 de cada ciclo.

O valor de pico da corrente será dada por:

$$i_{D(pk)} = (24 - 12)/0,1k = 120 \text{ mA}.$$

A tensão inversa máxima (PIV) será a soma da máxima tensão da fonte com a tensão da bateria, ou seja  $24 + 12 = 36$  V.



(b)

(\* PIV: Peak Inverse Voltage (tensão inversa de pico)

# Exemplo 3.2

Q. Determinar quais diodos conduzem e encontrar as variáveis elétricas indicadas.

Técnica de Solução:

1. Redesenhar o circuito empregando o método convencional de representação.
2. Supor diodos em condução e calcular suas correntes.
3. Em caso de condução indevida (polarização reversa), o diodo respectivo deverá ser considerado bloqueado e os cálculos devem ser refeitos.
4. Encontrar as variáveis pedidas, empregando análise convencional de circuitos lineares.

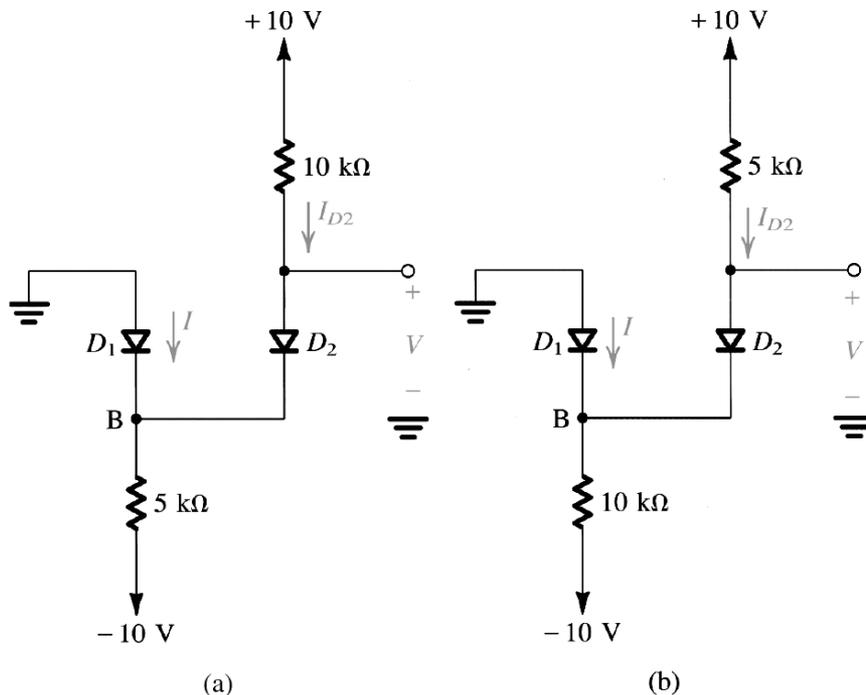
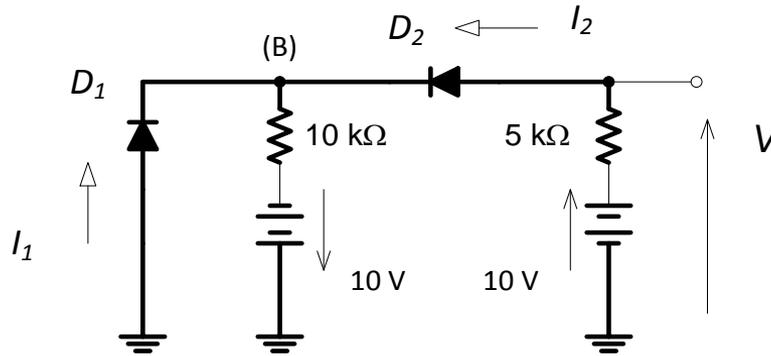


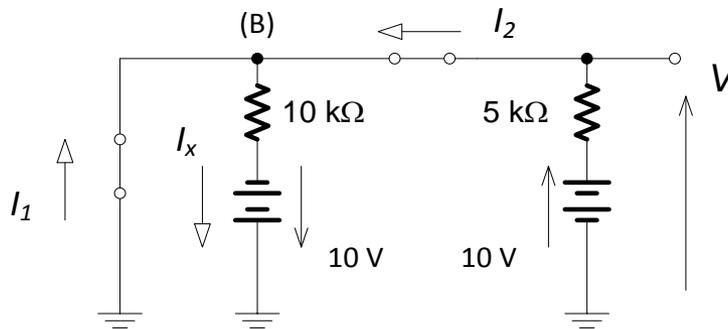
Figura 3.6 Circuitos para o Exemplo 3.2.

# Exemplo 3.2(b) (cont.)

1. Redesenhando o circuito:

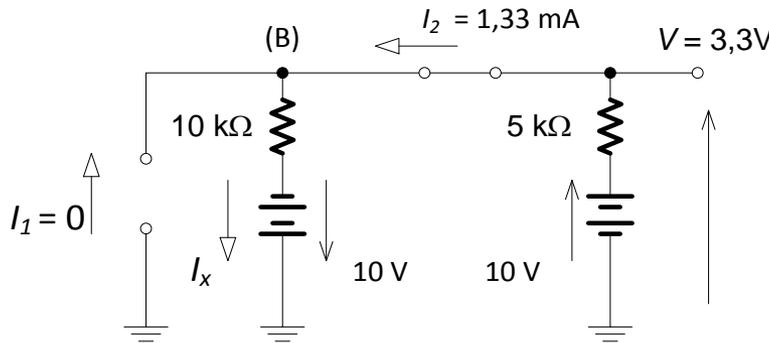


2. Admitindo ambos diodos em condução:



Neste caso,  $V_B = 0$  e  $I_2 = (10 - V_B)/5k = (10 - 0)/5k = 2\text{mA}$  e  $I_x = (10 - V_B)/10k = 1\text{mA}$ . Assim,  $I_1 = I_x - I_2 = -1\text{mA}$ , o que é impossível. Logo,  $D_1$  está bloqueado e apenas  $D_2$  conduz.

3. Circuito equivalente definitivo:

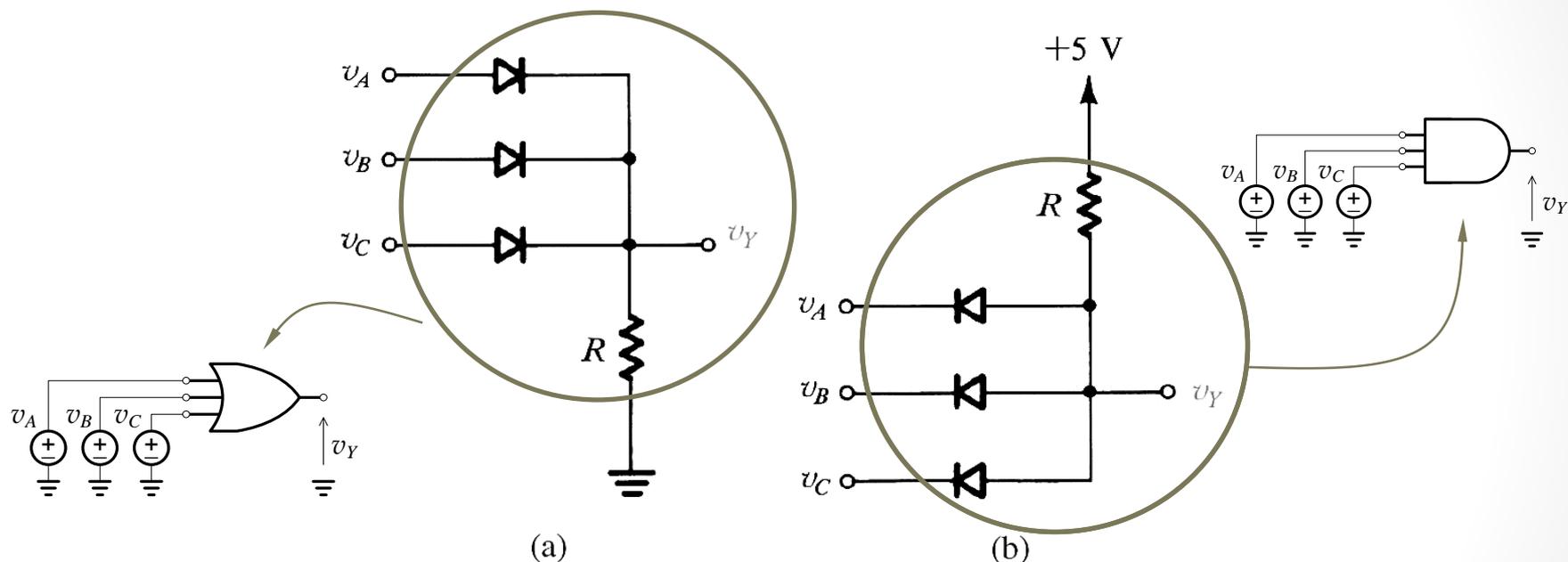


4. Nesta condição:

$$I_2 = I_x = 20/15k = 1,33\text{mA}.$$

$$\text{Logo, } V = 10 - 5k(1,33\text{m}) = 3,3\text{V}.$$

# Operação como Porta Lógica



**Figura 3.5** Portas lógicas com diodos: (a) porta OU; (b) porta E (sistema de lógica positiva).

# O Diodo de Junção Real

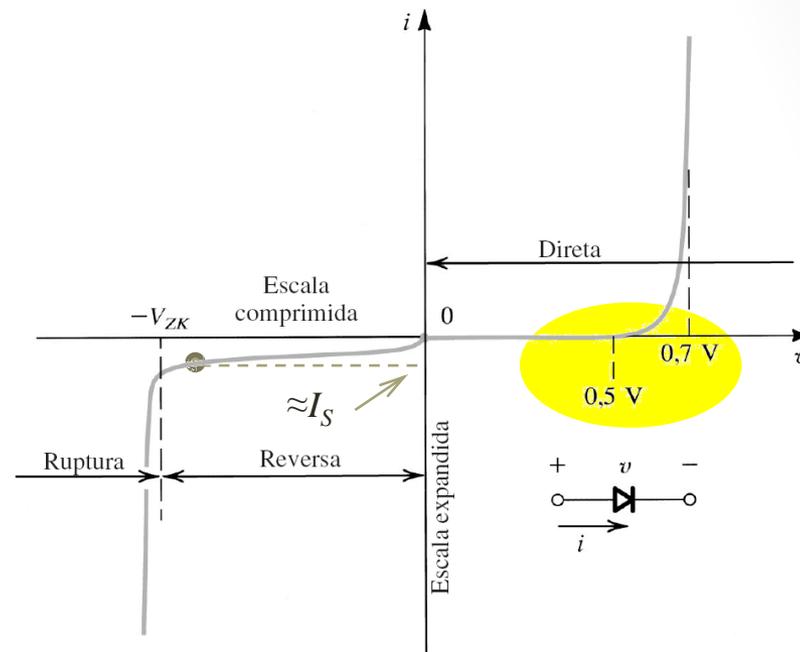
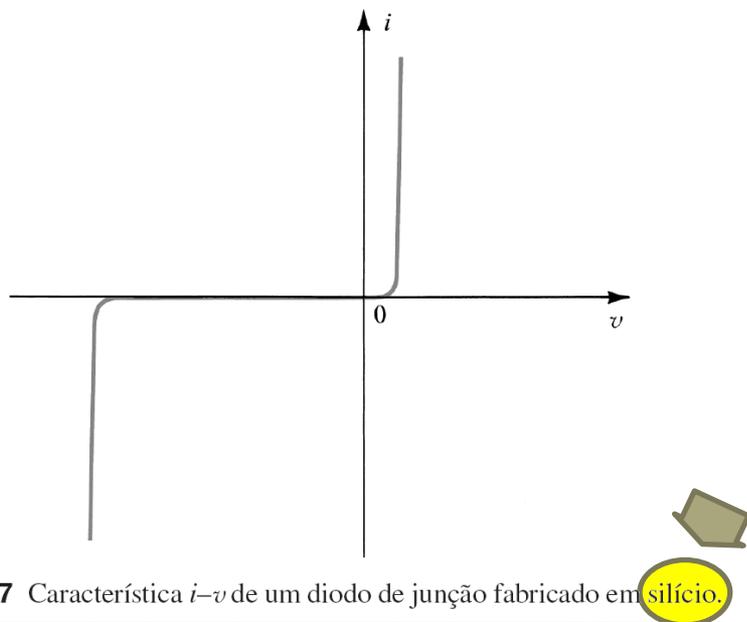
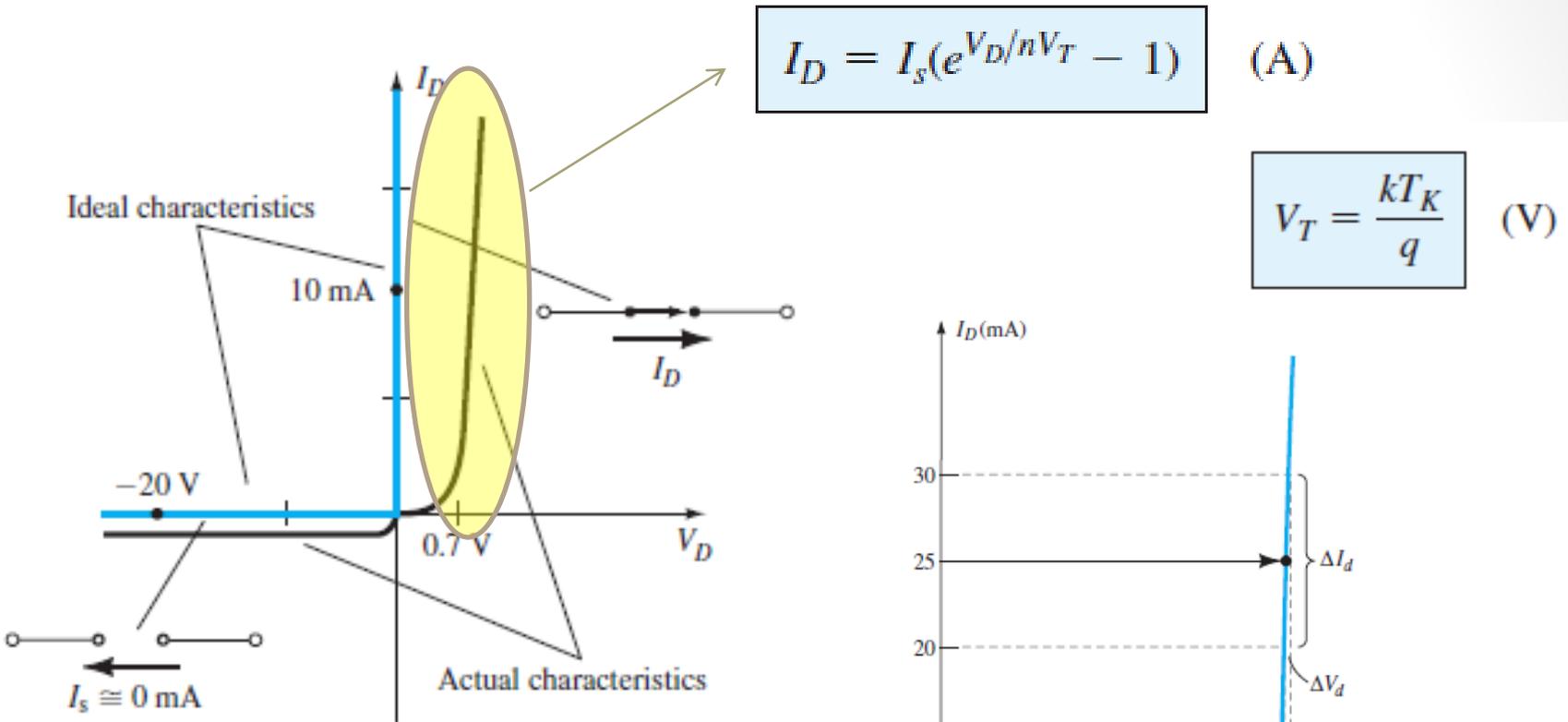


Figura 3.8 A relação  $i-v$  do diodo com algumas escalas expandidas e outras comprimidas a fim de revelar certos detalhes.

Na região direta e reversa:  $i = I_S (e^{v/nV_T} - 1)$ .  
(Equação de Shockley, William B. Shockley, 1910 – 1989).

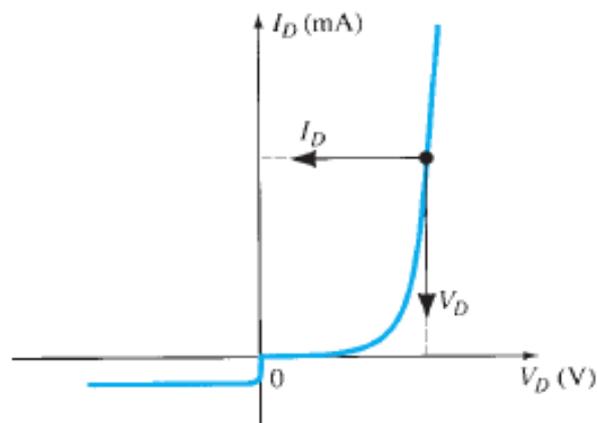
# O Diodo de Junção Real



**FIG. 1.22**

*Ideal versus actual semiconductor characteristics.*

# Característica estática



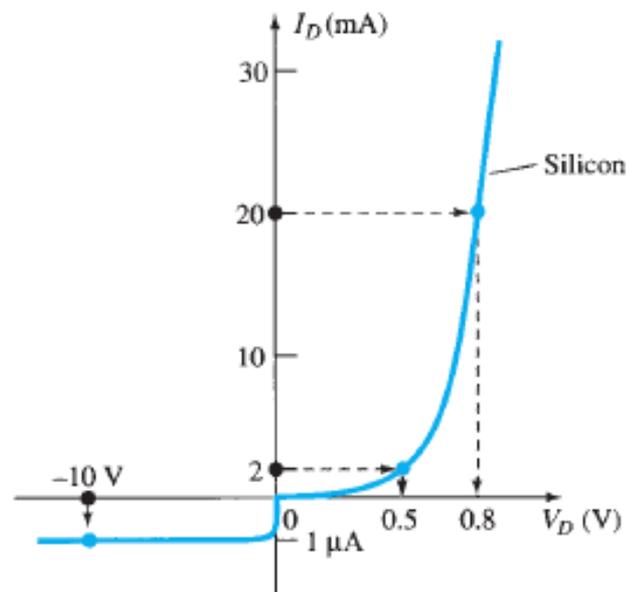
**FIG. 1.23**

*Determining the dc resistance of a diode at a particular operating point.*

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

**EXAMPLE 1.3** Determine the dc resistance levels for the diode of Fig. 1.24 at

- $I_D = 2$  mA (low level)
- $I_D = 20$  mA (high level)
- $V_D = -10$  V (reverse-biased)



**FIG. 1.24**

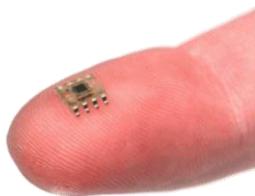
*Example 1.3.*

# Para um diodo real ...

- $I_S$  é constante para operação em determinada temperatura.
- $I_S$  é conhecida como *corrente de saturação* ou *corrente de escala*.
- O nome “escala” se deve à relação direta entre  $I_S$  e a área de fabricação (área da junção) do diodo (*chip* de Si, Silício, ou elemento equivalente) .
- Diodos reais possuem uma junção de dois materiais similares, fabricados à base de elementos semicondutores.
- Assim, se a área da junção dobra,  $I_S$  também dobra, e igualmente a corrente do diodo,  $i$ , dobra.
- $I_S$  é da ordem de  $10^{-15}$  A para diodos de “sinal” (de pequena potência).
- Na prática  $I_S$  também depende muito da temperatura e dobra de valor para cada  $5^\circ$  C de elevação na temperatura.

# Para um diodo real ...

- $V_T$  é conhecida como *tensão térmica*.
- $V_T = k T/q$ , sendo  $k$  a constante de Boltzmann e  $q$  a carga do elétron.
- Sabe-se que  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  joules/kelvin.
- $T$  = temperatura absoluta em kelvin = 273 + temp. em °C.
- Sabe-se que  $q = 1,60 \times 10^{-19}$  coulomb.
- Na temperatura ambiente (300 K),  $V_T$  vale 25,85 mV.
- $V_T \approx 25$  mV ou 26 mV são boas aproximações.
- $n$  é conhecida como *fator de idealidade* ou de *qualidade*, ou ainda, *coeficiente de emissão*.
- O fator  $n$  geralmente varia de 1 a 2, sendo normalmente adotado o valor unitário.
- Para diodos *discretos*,  $n$  vale aproximadamente 2 e para diodos *integrados*<sup>(1)</sup> em um *chip* é próximo da unidade.



<sup>(1)</sup> Um circuito integrado é um componente eletrônico que inclui (integra), por sua vez, vários componentes eletrônicos em uma única pastilha (*chip*) de material semicondutor, ocupando uma área e volume muito reduzidos (usualmente, menor que 0,25 cm<sup>2</sup>).



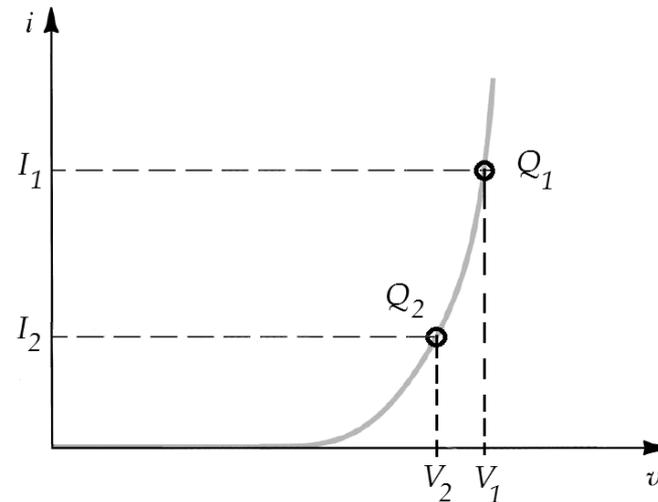
# A Região de Polarização Direta

- Supondo o diodo fortemente polarizado  $i \gg I_S$ , pode-se admitir que  $i \approx I_S e^{v/nV_T}$  (equação simplificada de Shockley).
- Alternativamente  $v \approx nV_T \ln (i/I_S)$ .
- Assim, é possível demonstrar algumas relações úteis considerando dois pontos quaisquer de operação na região direta  $(I_1, V_1)$  e  $(I_2, V_2)$ :

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{(V_2 - V_1)/nV_T}$$

$$V_2 - V_1 = nV_T \ln \frac{I_2}{I_1}$$

$$V_2 - V_1 = 2,3nV_T \log \frac{I_2}{I_1}$$



Obs.:  $Q_n$  é um ponto de operação, ou ponto quiescente.

# Exemplo 3.3

- Q. Um diodo de silício, feito para operar com 1 mA, apresenta uma queda de tensão direta de 0,7 V para uma corrente de 1 mA. Avalie o valor da constante de  $I_S$  nos casos em que  $n$  seja 1 ou 2. Que constantes de escalamento se aplicam para um diodo de 1 A do mesmo fabricante que conduz uma corrente de 1 A para uma queda de 0,7 V?

- S. Usando a expressão simplificada de Shockley,  $I_S = i e^{-v/nV_T}$ .

Para o diodo de 1 mA e considerando  $n=1$ :

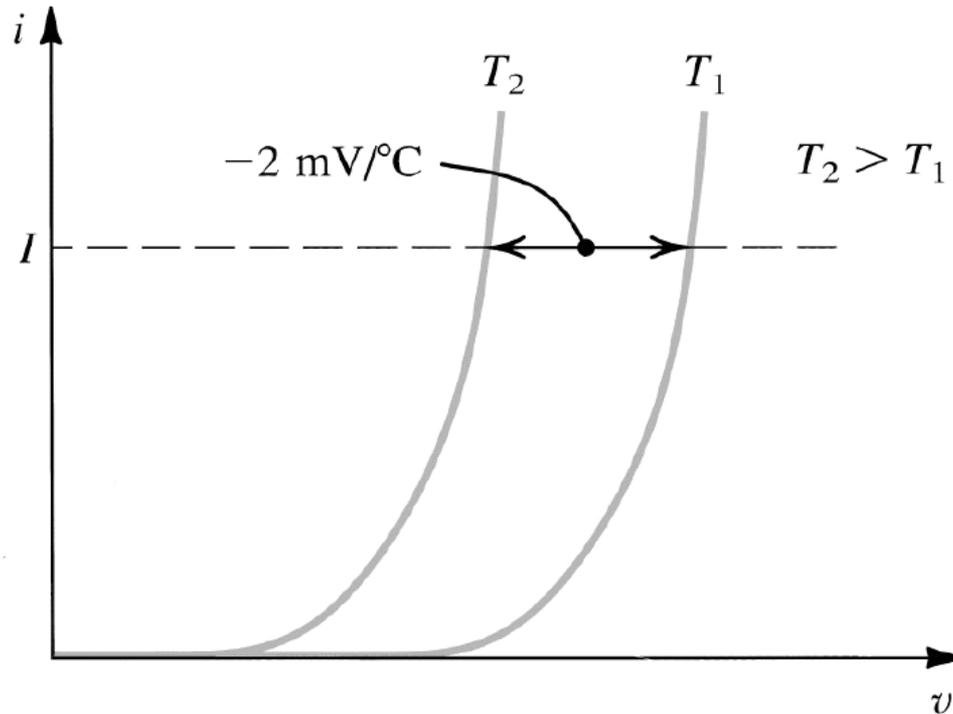
$$I_S = 10^{-3} e^{-700/25} = 6,9 \times 10^{-16} \text{ A ou cerca de } 10^{-15} \text{ A.}$$

Considerando  $n=2$ :

$$I_S = 10^{-3} e^{-700/50} = 8,3 \times 10^{-10} \text{ A ou cerca de } 10^{-9} \text{ A.}$$

Já um diodo de 1 A conduz uma corrente 1.000 vezes maior que o diodo de 1mA e exige uma seção transversal 1.000 vezes maior, o que resulta em  $I_S$  da ordem de 1 pA e 1  $\mu$ A, respectivamente, com  $n = 1$  e  $n = 2$ .

# Dependência com a temperatura



A queda de tensão direta reduz 2mV para uma elevação de 1°C na temperatura.

# Dependência com a temperatura

*“In the forward-bias region the characteristics of a silicon diode shift to the left at a rate of  $\sim 2.5$  mV per centigrade degree increase in temperature.”*

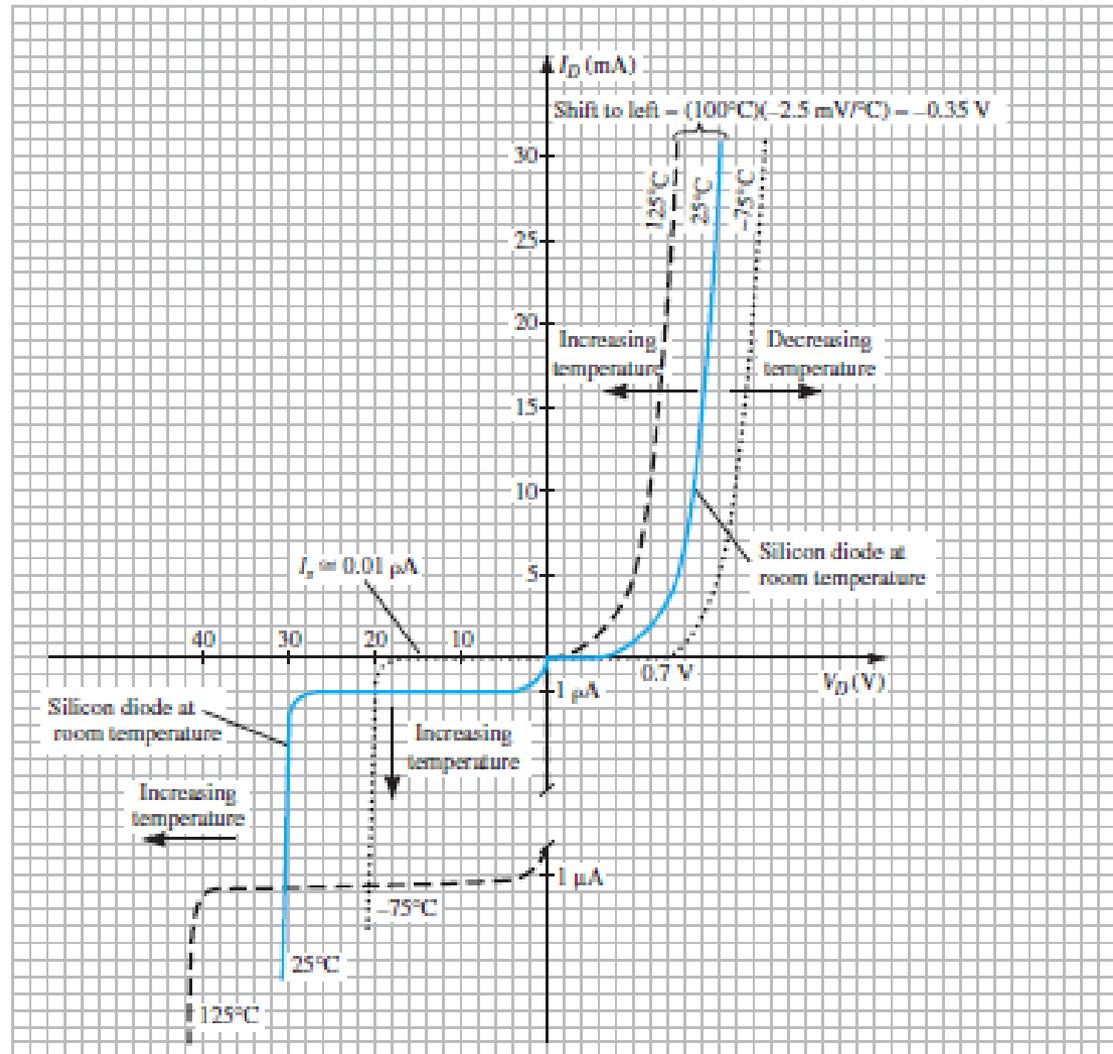


FIG. 1.19

Variation in Si diode characteristics with temperature change.

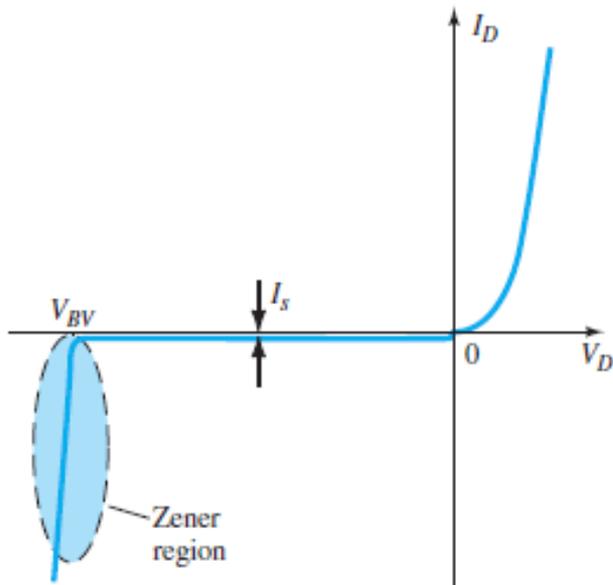
# A Região de Polarização Reversa

- Também é conhecida como *região inversa*.
- Nessa região a corrente do diodo é negativa, “saturada”, de valor aproximadamente igual a  $I_S$ .
- Na realidade, a corrente reversa é, apesar de pequena, muito maior que  $I_S$ , devido a determinados fenômenos físicos.
- Para diodos de sinal, que idealmente teriam  $I_S$  da ordem de  $10^{-14}$  ou  $10^{-15}$  A podem apresentar corrente reversa de cerca de 1 nA.
- Um dos fenômenos que contribuem para uma maior corrente reversa é a “fuga”, que é **proporcional à área da seção transversal**.
- Sabe-se ainda que a corrente reversa é muito dependente da temperatura. Como regra prática, ela dobra para um aumento de  $10^\circ\text{C}$ , enquanto  $I_S$  dobra a cada  $5^\circ\text{C}$ .

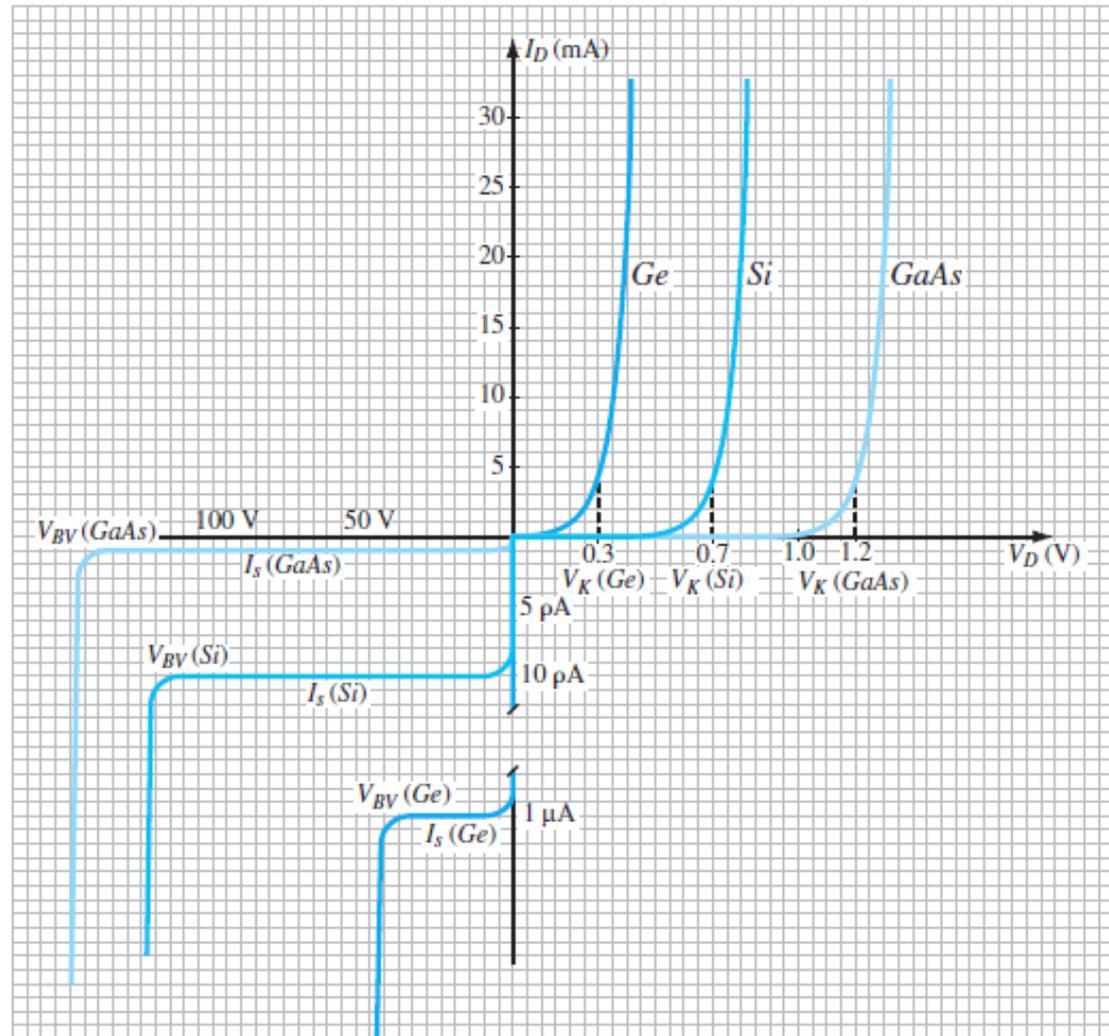
# A Região de Ruptura Reversa

- Ocorre quando, inserido em circuito, o diodo precisa suportar um tensão reversa superior a  $V_{BV}$ , que é definido pelo fabricante.
- $V_{BV}$  é conhecida com **tensão de ruptura** (*breakdown voltage - BV*), na região de polarização reversa.
- Em alguns casos – **tensão “zener”** – utiliza-se a letra Z (físico norte-americano que estudou o fenômeno da ruptura em isolantes elétricos, Clarence Melvin Zener (1905 -1993)).
- Na região de ruptura, a corrente inversa cresce muito para pequenas elevações na tensão reversa.
- A região de ruptura reversa não resulta em destruição do diodo, desde que seja respeitada a **máxima potência de operação** definida pelo fabricante ( $P \approx V_{zk} \times i$ ).
- Pelo fato de a tensão variar muito pouco nesta região, o diodo pode ser usado como **regulador de tensão**, o que será estudado mais à frente neste capítulo → *diodos zener*.

# A Região de Ruptura Reversa



**FIG. 1.17**  
*Breakdown region.*

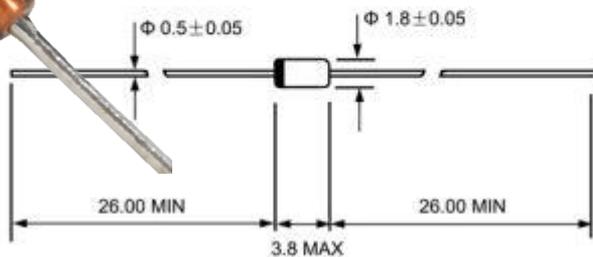


**FIG. 1.18**  
*Comparison of Ge, Si, and GaAs commercial diodes.*

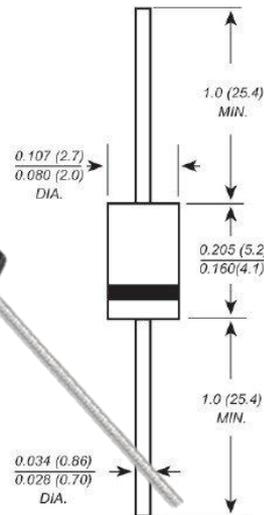
# Encapsulamentos - PTH\*

\*pin through hole

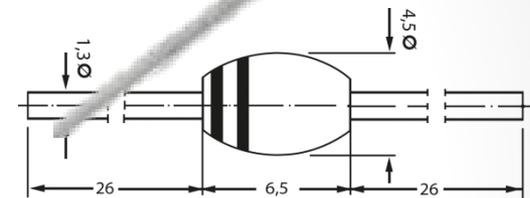
DO - 35(GLASS)



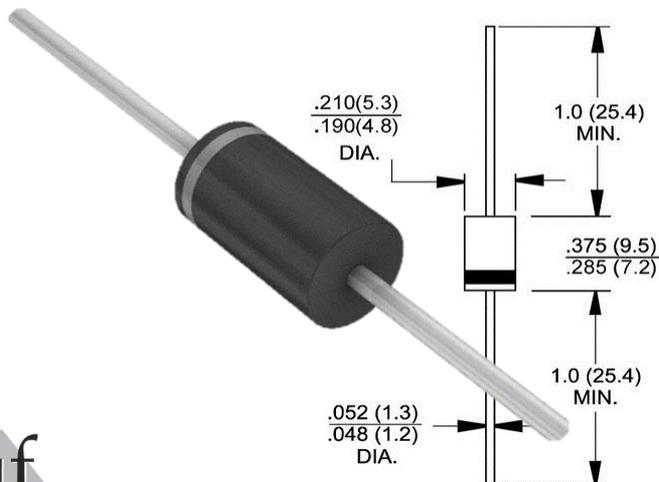
DO-41



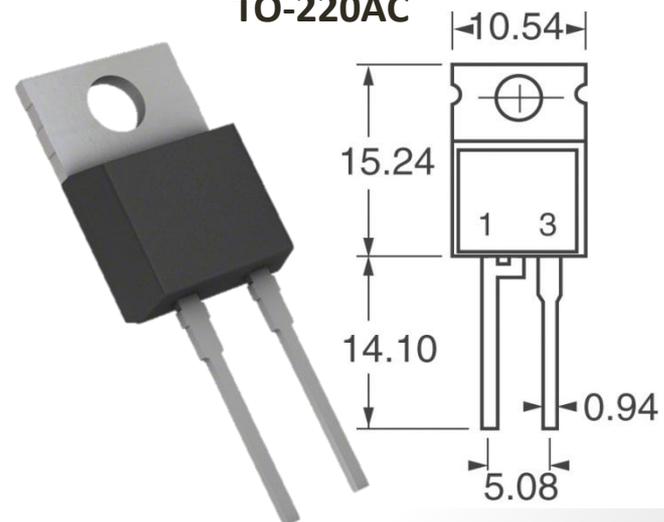
SOD-64



DO-201AD



TO-220AC



# Folhas de dados - *datasheet*

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

## DATA SHEET



### LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{RRM}$	repetitive peak reverse voltage		-	100	V
$V_R$	continuous reverse voltage		-	100	V
$I_F$	continuous forward current	see Fig.2; note 1	-	200	mA
$I_{FRM}$	repetitive peak forward current		-	450	mA
$I_{FSM}$	non-repetitive peak forward current	square wave; $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ prior to surge; see Fig.4 $t = 1\text{ }\mu\text{s}$ $t = 1\text{ ms}$ $t = 1\text{ s}$	-	4 1 0.5	A A A
$P_{tot}$	total power dissipation	$T_{amb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; note 1	-	500	mW
$T_{stg}$	storage temperature		-65	+200	$^\circ\text{C}$
$T_j$	junction temperature		-	200	$^\circ\text{C}$

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$  unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_F$	forward voltage 1N4148 1N4448	see Fig.3 $I_F = 10\text{ mA}$ $I_F = 5\text{ mA}$ $I_F = 100\text{ mA}$	- 0.62 -	1 0.72 1	V V V
$I_R$	reverse current	$V_R = 20\text{ V}$ ; see Fig.5 $V_R = 20\text{ V}$ ; $T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$ ; see Fig.5	-	25 50	nA $\mu\text{A}$
$I_R$	reverse current; 1N4448	$V_R = 20\text{ V}$ ; $T_j = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ; see Fig.5	-	3	$\mu\text{A}$
$C_d$	diode capacitance	$f = 1\text{ MHz}$ ; $V_R = 0\text{ V}$ ; see Fig.6	-	4	pF
$t_{rr}$	reverse recovery time	when switched from $I_F = 10\text{ mA}$ to $I_R = 60\text{ mA}$ ; $R_L = 100\text{ }\Omega$ ; measured at $I_R = 1\text{ mA}$ ; see Fig.7	-	4	ns
$V_{fr}$	forward recovery voltage	when switched from $I_F = 50\text{ mA}$ ; $t_r = 20\text{ ns}$ ; see Fig.8	-	2.5	V

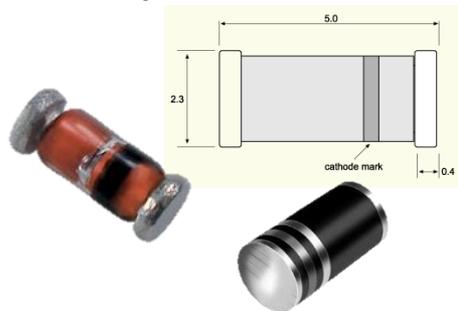
**1N4148; 1N4448**  
High-speed diodes

Dados tabelados:

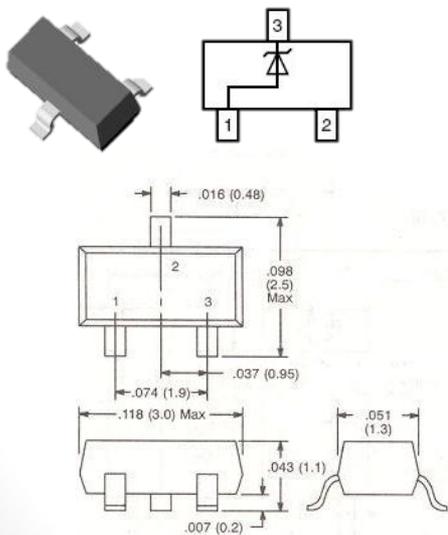
# Encapsulamentos – SMT\*

\*surface mount technology

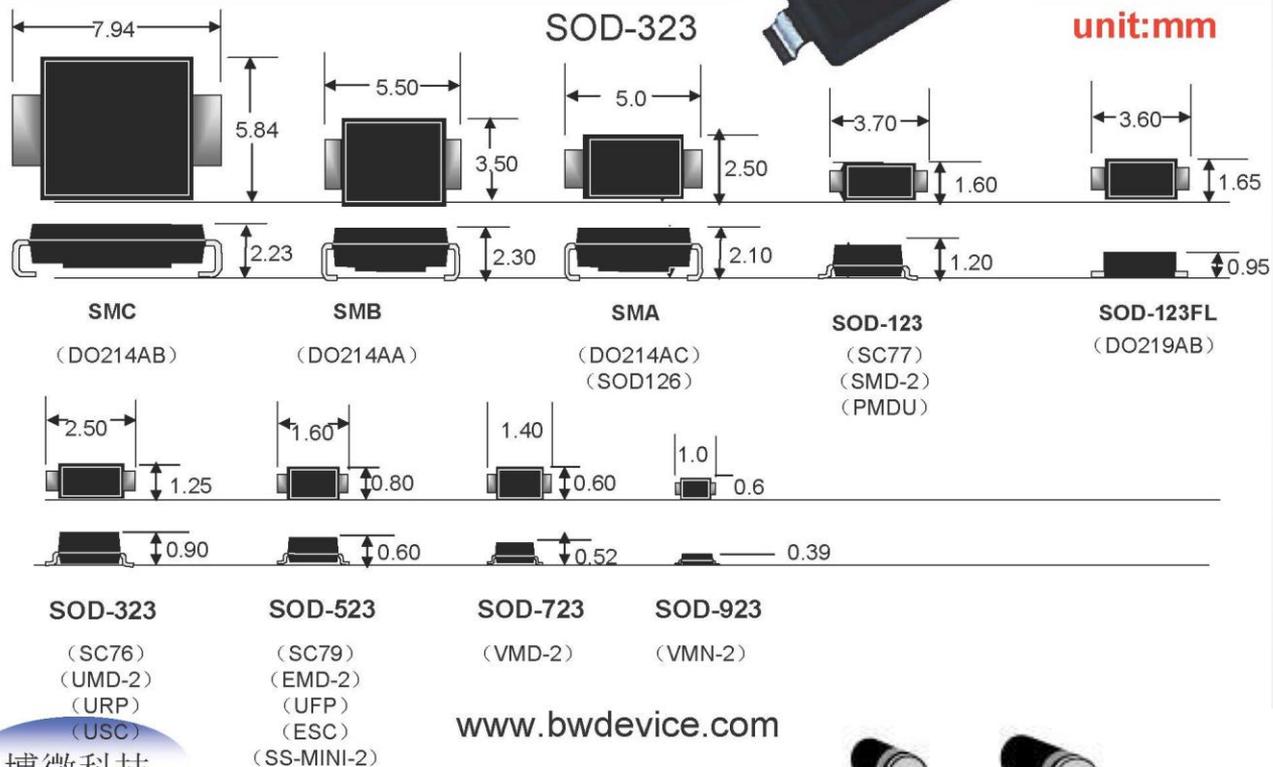
## MELF / Mini-MELF



## SOT-23



## LRC SMD主要封装 LRC SMD Main Packages



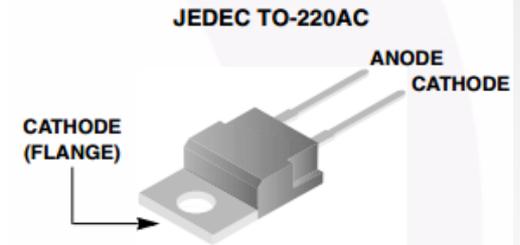
[www.bwdevice.com](http://www.bwdevice.com)



# Folhas de dados - *datasheet*

## Curvas características estáticas

(de um diodo rápido de potência MUR860)



### Typical Performance Curves

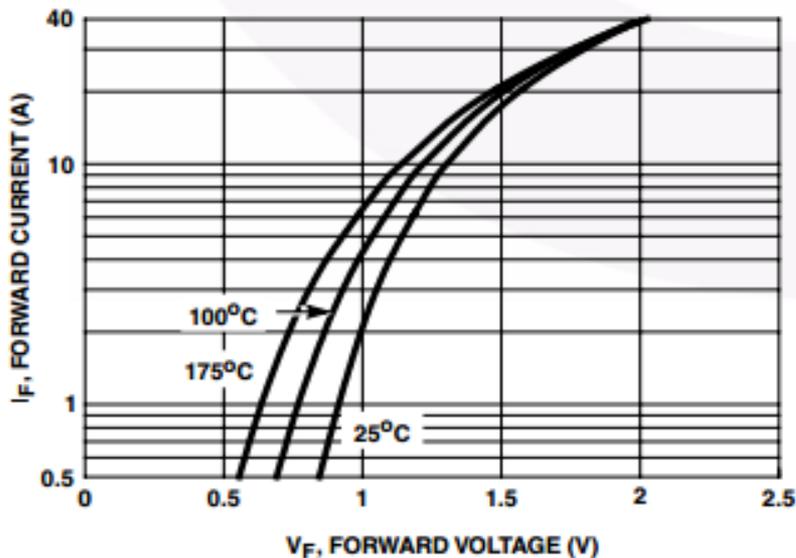


FIGURE 1. FORWARD CURRENT vs FORWARD VOLTAGE

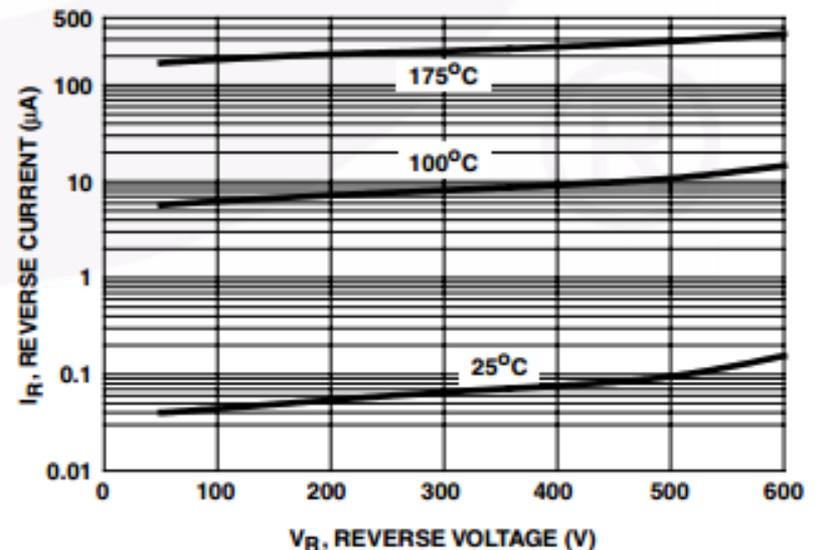
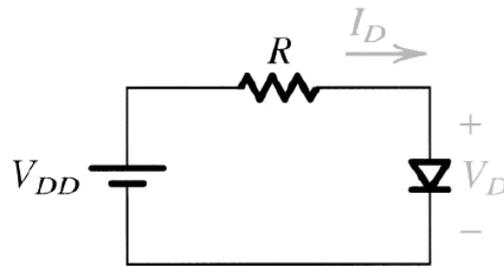


FIGURE 2. REVERSE CURRENT vs REVERSE VOLTAGE

# Modelos Matemáticos

- São normalmente usados para se determinar a corrente e tensão sobre o diodo real (na região direta).



Duas equações, duas incógnitas:

$$I_D = I_S e^{V_D/nV_T}$$

$$I_D = (V_{DD} - V_D)/R \quad (\text{LKT})^*$$

- Modelos mais comuns:

Modelo exponencial (Equação de Shockley).

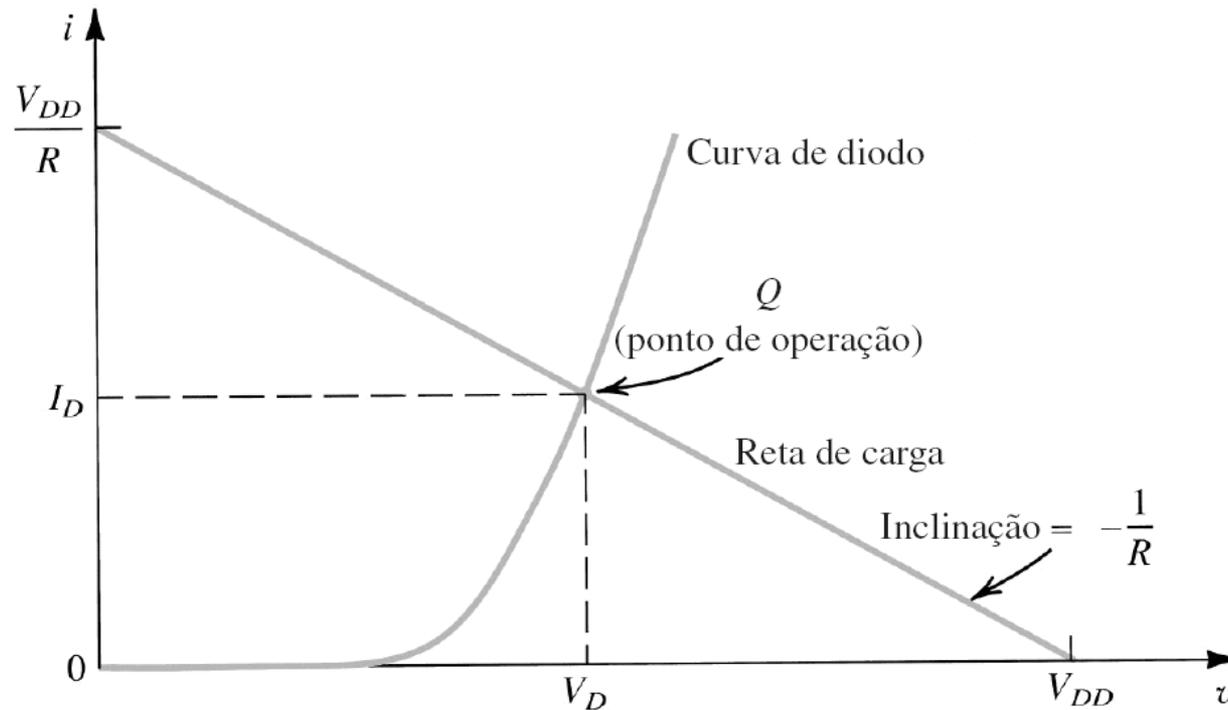
Modelo linear por partes.

Modelo tensão constante.

Modelo de diodo ideal.

(\*) Lei de Kirchhoff das tensões

# Modelo Exponencial – Análise Gráfica



**Figura 3.11** Análise gráfica do circuito na Figura 3.10 empregando-se o modelo exponencial para o diodo.

# Mod. Exponencial – Análise Iterativa

## EXEMPLO 3.4

Determine os valores da corrente  $I_D$  e da tensão  $V_D$  para o circuito da Figura 3.10 com  $V_{DD} = 5 \text{ V}$  e  $R = 1 \text{ k}\Omega$ . Suponha que a corrente do diodo seja de  $1 \text{ mA}$  para uma tensão de  $0,7 \text{ V}$  e que a queda de tensão varia de  $0,1 \text{ V}$  para cada década de variação na corrente.

### Solução

Para iniciar a iteração, supomos que  $V_D = 0,7 \text{ V}$  e usamos a Equação 3.7 para determinar a corrente

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0,7}{1} = 4,3 \text{ mA}$$

Usamos então a equação do diodo para obter um valor mais preciso de  $V_D$ . Isso pode ser feito empregando a Equação 3.5, ou seja,

$$V_2 - V_1 = 2,3nV_T \log \frac{I_2}{I_1}$$

Em nosso caso,  $2,3nV_T = 0,1 \text{ V}$ ; logo

$$V_2 = V_1 + 0,1 \log \frac{I_2}{I_1}$$

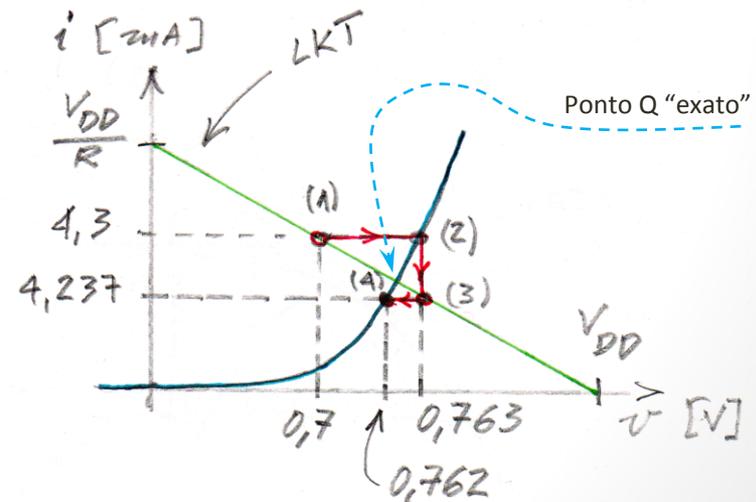
Substituir  $V_1 = 0,7 \text{ V}$ ,  $I_1 = 1 \text{ mA}$  e  $I_2 = 4,3 \text{ mA}$  resulta em  $V_2 = 0,763 \text{ V}$ . Então, no resultado da primeira iteração,  $I_D = 4,3 \text{ mA}$  e  $V_D = 0,763 \text{ V}$ . Na segunda iteração, procedemos de modo similar:

$$I_D = \frac{5 - 0,763}{1} = 4,237 \text{ mA}$$

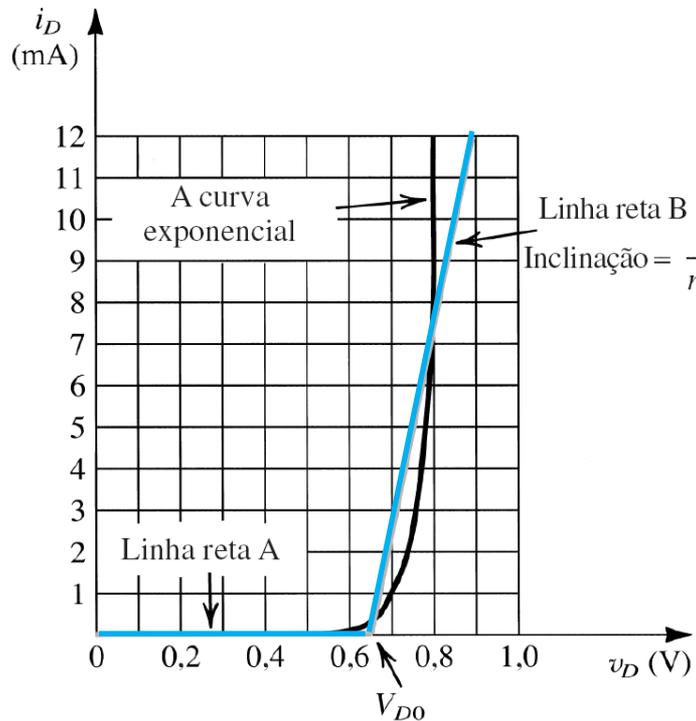
$$V_2 = 0,763 + 0,1 \log \left[ \frac{4,237}{4,3} \right] = 0,762 \text{ V}$$

Portanto, a segunda iteração produz  $I_D = 4,237 \text{ mA}$  e  $V_D = 0,762 \text{ V}$ . Uma vez que esses valores não são muito diferentes dos valores obtidos na primeira iteração, não serão necessárias outras iterações e a solução é  $I_D = 4,237 \text{ mA}$  e  $V_D = 0,762 \text{ V}$ .

### Interpretação Gráfica:



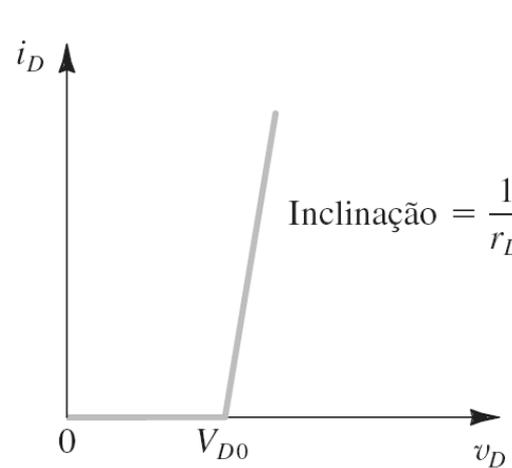
# Modelo Linear por Partes



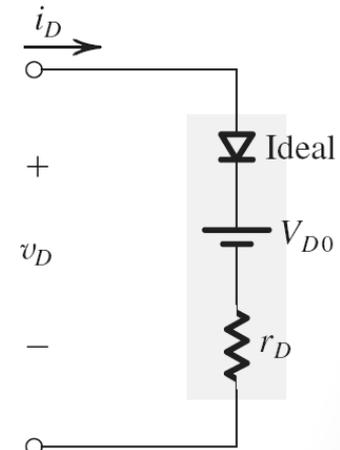
$$r_D = \frac{V_{DQ} - V_{D0}}{I_{DQ}}$$

$$i_D = 0, \quad v_D \leq V_{D0}$$

$$i_D = (v_D - V_{D0}) / r_D, \quad v_D > V_{D0}$$



(a)



(b)

**Figura 3.13** Modelo de segmentos lineares da característica direta do diodo e a representação do circuito equivalente.

# Exemplo 3.5

## EXEMPLO 3.5

Repita o problema do Exemplo 3.4 utilizando o modelo de segmentos lineares cujos parâmetros são dados na Figura 3.12 ( $V_{D0} = 0,65 \text{ V}$  e  $r_D = 20 \text{ }\Omega$ ). Observe que as características representadas nessa figura são as mesmas do diodo descrito no Exemplo 3.4 (1 mA com 0,7 V e 0,1 V/década).

### Solução

Substituindo o diodo no circuito da Figura 3.10 pelo modelo de circuito da Figura 3.13 resulta no circuito da Figura 3.14, a partir do qual podemos escrever para a corrente  $I_D$ ,

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D}$$

em que os parâmetros  $V_{D0}$  e  $r_D$  do modelo são vistos pela Figura 3.12 como  $V_{D0} = 0,65 \text{ V}$  e  $r_D = 20 \text{ }\Omega$ . Portanto,

$$I_D = \frac{5 - 0,65}{1 + 0,02} = 4,26 \text{ mA}$$

A tensão no diodo  $V_D$  pode ser agora computada como:

$$\begin{aligned} V_D &= V_{D0} + I_D r_D \\ &= 0,65 + 4,26 \times 0,02 = 0,735 \text{ V} \end{aligned}$$

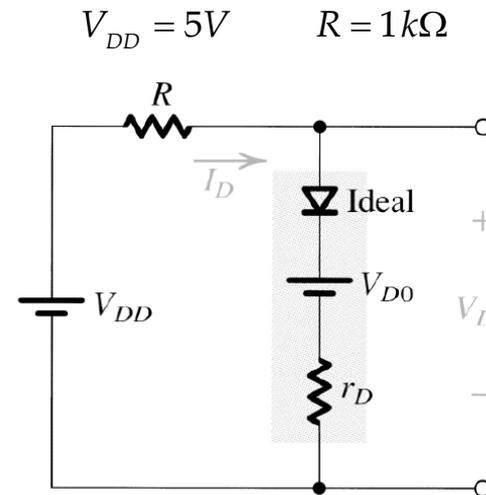
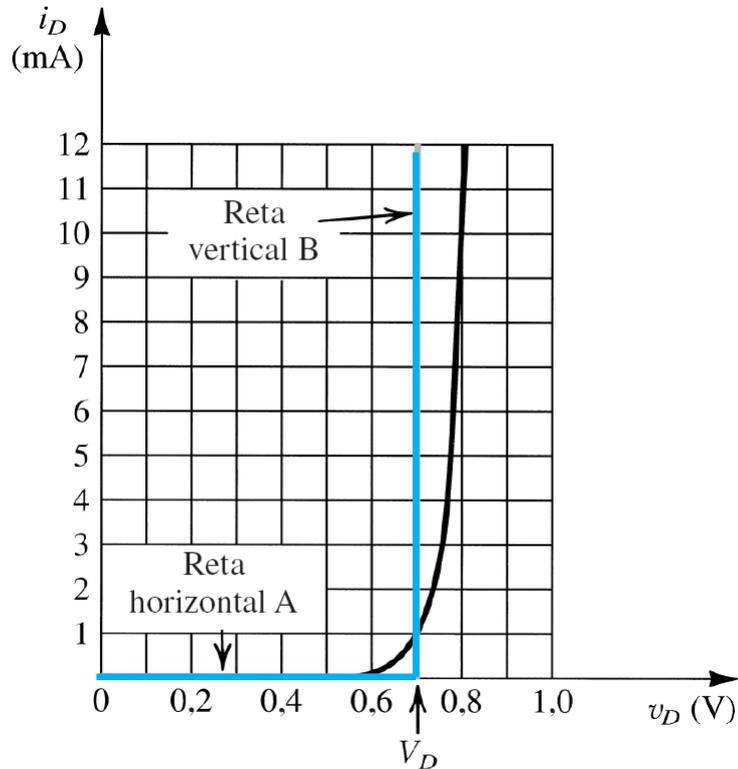


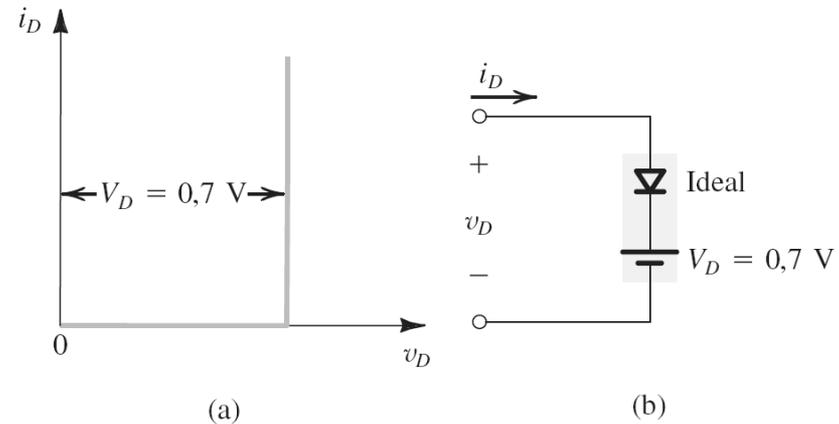
Figura 3.14 O circuito da Figura 3.10 com o diodo substituído pelo modelo de segmentos lineares da Figura 3.13.

Obs.: O Sedra omite aqui uma análise inicial, que visa definir se o diodo pode conduzir ou não. Neste caso, a tensão  $V_{DD}$  é muito superior a  $V_{D0}$ , o que resulta em condições satisfatórias para  $I_D > 0$ . Logo, o diodo conduz e o modelo pode ser usado. Note que se o modelo fosse usado indiscriminadamente, poderia ser obtido um valor de  $I_D < 0$ , o que indica bloqueio.

# Modelo de Queda de Tensão Constante



Obs.: Em geral se escolhe  $V_D = 0,7$  V.



**Figura 3.16** O modelo da queda de tensão constante para as características diretas do diodo e sua representação por circuito equivalente.

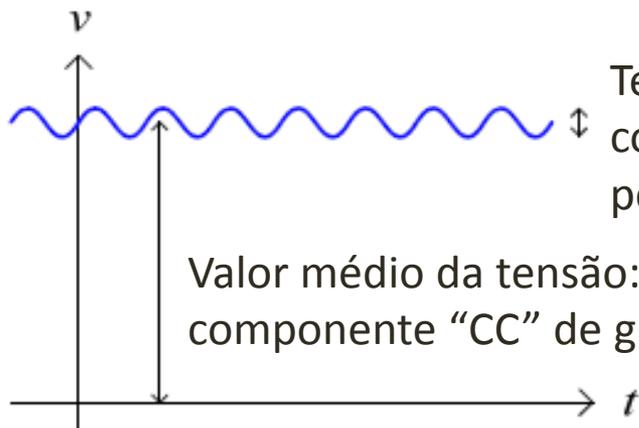
Obs.: Usando esse modelo no Exemplo 3.5, resultaria numa corrente de diodo igual a 4,3 mA. Isso implica em um erro igual a 0,9%, o que é muito pequeno é plenamente aceitável.

# O Modelo do Diodo Ideal

- É usado quando a tensão independente externa do circuito em que o diodo está inserido é muito superior à tensão de operação típica dos diodos (0,6V a 0,8V).
- Neste caso, o diodo é substituído por um curto circuito quando polarizado diretamente.
- Para o Exemplo 3.5, a corrente no diodo seria de 5mA, caso ele fosse considerado ideal. Isso implica em um erro de cerca de 16%, que pode ser usado como “primeira análise”, procedimento muito comum em Engenharia Elétrica e Eletrônica.

# O Modelo para Pequenos Sinais

- A análise até então focou-se somente em sinais puramente contínuos (CC, ou “DC modelling”, ou modelagem de grandes sinais). Devemos considerar também a análise com sinais variantes no tempo, que é complicada pela natureza não-linear do componente.
- O conceito de **operação em pequenos sinais** é que existe um sinal de pequena amplitude sobreposto a um valor contínuo (de **polarização**). A análise então pode ser dividida em duas partes:



Tensão variante no tempo:  
componente “CA” de  
pequenos sinais

Valor médio da tensão:  
componente “CC” de grandes sinais

- 1 – **Polarização CC** (“DC bias”)
- 2 – **Sinal CA de pequena amplitude** (“small-signal”)

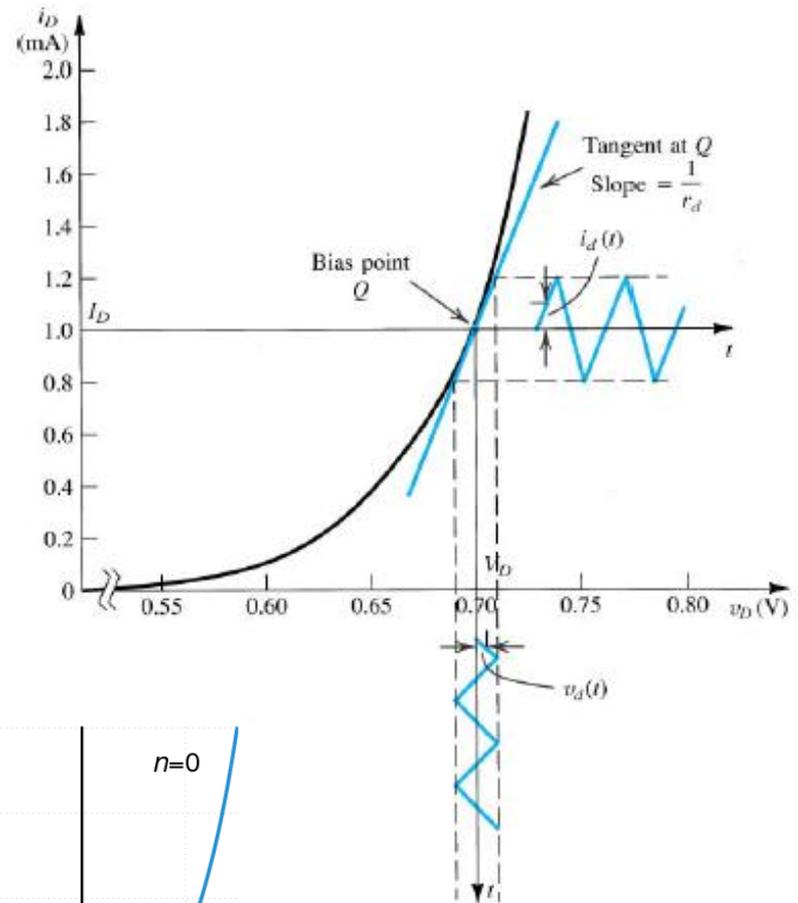
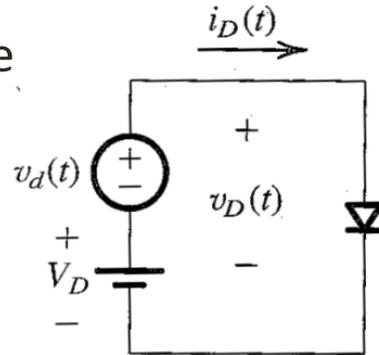
*A solução completa é encontrada por **superposição** → **linearização** de um circuito não-linear em torno de um **ponto de operação** para solucionar-se o problema com técnicas de **análise de circuitos lineares!***

# O Modelo para Pequenos Sinais

Derivação do modelo de pequenos sinais:

como:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$



e (Shockley):

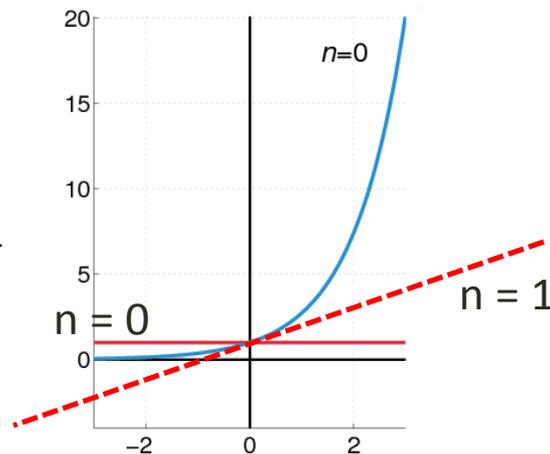
$$i_D(t) \approx I_S e^{v_D(t)/nV_T} = I_S \underbrace{\left( e^{V_D/nV_T} \right)}_{=I_D} \left( e^{v_d(t)/nV_T} \right)$$

$$\therefore i_D(t) = I_D e^{v_d(t)/nV_T}$$

Expansão da exponencial em série de Taylor:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$$

truncar nos 2 primeiros termos



# O Modelo para Pequenos Sinais

Derivação do modelo de pequenos sinais:

$$i_D(t) = I_D e^{v_d(t)/nV_T} \approx I_D + \frac{I_D}{nV_T} v_d(t)$$

Se  $v_d(t)$  é suficientemente pequeno: a solução é a superposição da solução CC e CA:

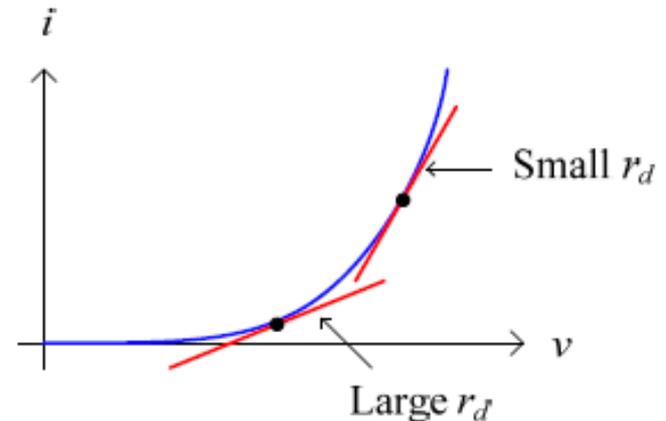
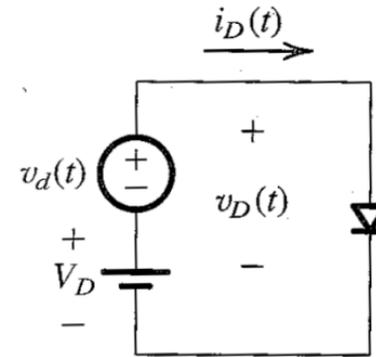
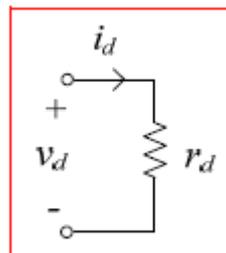
$$i_D(t) = I_D + \frac{I_D}{nV_T} v_d(t) = I_D + i_d(t) \quad \Rightarrow \quad r_d = \left[ \left( \frac{\partial i_D}{\partial v_D} \right) \Big|_{i_D = I_D (\text{ponto } Q)} \right]^{-1} = \frac{nV_T}{I_D} [\Omega]$$

(resistência dinâmica ou de pequenos sinais)

**Condição de pequenos sinais**  
(i.e., para a aprox. ser boa):

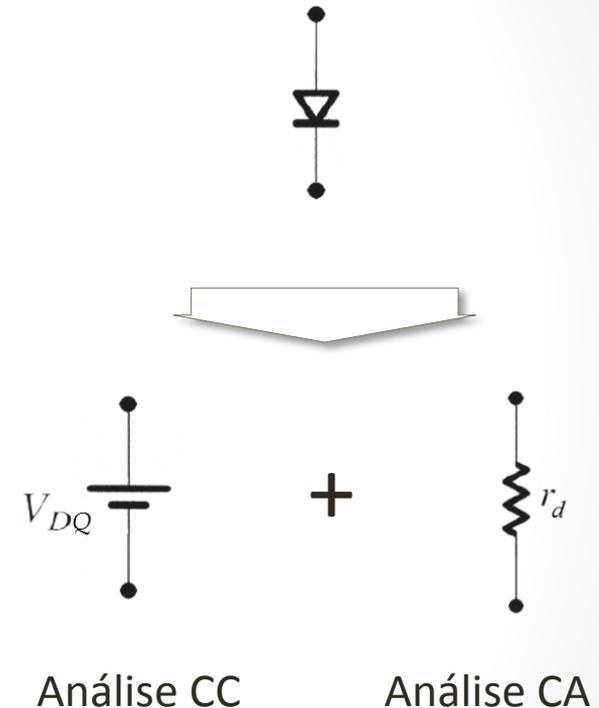
$$I_D \gg \frac{I_D}{nV_T} v_d(t) \Rightarrow \frac{|v_d|}{nV_T} \ll 1$$

equivalente p/  
pequenos sinais –  
**análise CA:**



# O que o modelo de pequenos sinais propõe?

- Submetido às condições de pequenos sinais, o diodo pode ser linearizado.
- Uma vez linearizado, se pode aplicar o Teorema da Superposição.
- O diodo, então, é representado na “análise CC” por uma queda de tensão constante (usualmente 0,7V, para diodos de silício).
- Pela análise CC é possível encontrar o valor da corrente que circula pelo diodo,  $I_{DQ}$ .
- Na “análise CA”, o diodo é substituído por uma resistência, conhecida como resistência dinâmica ( $r_d$ ), que tem um valor dependente do ponto de trabalho, pois seu cálculo é realizado com base em  $I_{DQ}$ .



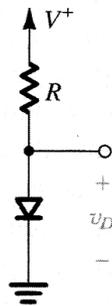
Sendo:

$$r_d = n V_T / I_{DQ}$$

# Exemplo 3.6

## EXEMPLO 3.6

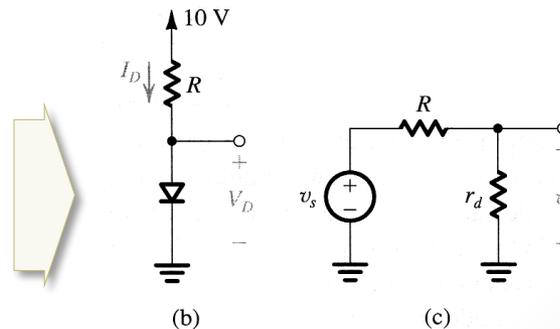
Considere o circuito mostrado na Figura 3.18(a) para o caso de  $R = 10 \text{ k}\Omega$ . A fonte de alimentação  $V^+$  tem um valor *cc* de 10 V, o qual tem sobreposta uma senóide de 60 Hz com amplitude de 1 V de pico. (Esse componente do “sinal” da fonte de alimentação é devido a uma imperfeição no projeto da fonte de alimentação. Ele é conhecido como **ondulação (ripple) da fonte de alimentação**. Continuaremos esse assunto adiante.) Calcule os valores da tensão *cc* e do sinal senoidal sobre o diodo. Suponha que o diodo tem 0,7 V de queda e 1 mA de corrente e  $n = 2$ .



(a)

Figura 3.18 (a) Circuito para o Exemplo 3.6.

Circuitos  
equivalentes  
CC e CA  
usados  
nesta solução:



## Solução

Considerando apenas valores *cc*, supomos  $V_D \approx 0,7 \text{ V}$  e calculamos a corrente *cc* no diodo

$$I_D = \frac{10 - 0,7}{10} = 0,93 \text{ mA}$$

Como esse valor é muito próximo de 1mA, a tensão no diodo será muito próxima de 0,7 V, o valor adotado. Nesse ponto de operação, a resistência dinâmica  $r_d$  é

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} = \frac{2 \times 25}{0,93} = 53,8 \Omega$$

A tensão pico a pico do sinal sobre o diodo pode ser obtida do circuito equivalente para pequenos sinais da Figura 3.18(c). Nessa figura,  $v_s$  é a componente senoidal (1 V de pico, 60 Hz) de  $V^+$  e  $v_d$  é o sinal correspondente sobre o diodo. Usando a regra do divisor de tensão, obtém-se a amplitude de pico de  $v_d$ :

$$\begin{aligned} v_d(\text{pico}) &= \hat{V}_s \frac{r_d}{R + r_d} \\ &= 1 \frac{0,0538}{10 + 0,0538} = 5,35 \text{ mV} \end{aligned}$$

Finalmente, observamos que esse valor é relativamente pequeno; nosso uso do modelo para pequenos sinais está justificado.

# Aplicação do modelo: O Diodo como simples regulador de tensão

- Uma das aplicações mais populares dos diodos.
- Reguladores de tensão são circuitos alimentados por uma tensão CC não regulada (tensão variável de baixa amplitude superposta a um nível CC) que fornecem à carga uma tensão CC com boa precisão e variação (ondulação ou *ripple*) desprezível.
- Um bom regulador de tensão é projetado para oferecer à carga uma tensão bem definida, praticamente independente de três “perturbações” básicas possíveis: a) Variações no nível CC de entrada; b) variações na amplitude da ondulação na entrada e c) variações na carga (potência de saída).
- Diodos podem ser associados em série para se alcançar o nível de tensão desejado. Mas, diodos *zener* fazem isso melhor!

# Exemplo 3.7

## EXEMPLO 3.7

Considere o circuito mostrado na Figura 3.19. Uma série de três diodos é usada para proporcionar uma tensão constante de cerca de 2,1 V. Queremos calcular em porcentagem a variação nesse regulador de tensão provocada por (a) uma variação de  $\pm 10\%$  na tensão da fonte de alimentação e (b) a ligação de uma resistência de carga de 1 k $\Omega$ . Suponha  $n = 2$ .

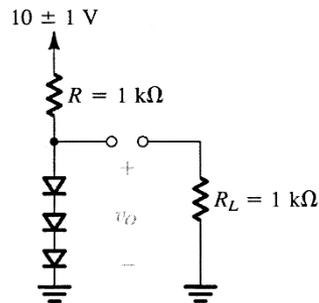


Figura 3.19 Circuito para o Exemplo 3.7.

### Solução

Sem carga, o valor nominal da corrente nos diodos em série é dada por

$$I = \frac{10 - 2,1}{1} = 7,9 \text{ mA}$$

Portanto, cada diodo terá uma resistência dinâmica de

$$r_d = \frac{nV_T}{I}$$

Usando  $n = 2$ , obtemos

$$r_d = \frac{2 \times 25}{7,9} = 6,3 \Omega$$

Os três diodos em série terão uma resistência dinâmica total de

$$r = 3r_d = 18,9 \Omega$$

Essa resistência total junto com a resistência  $R$  forma um divisor de tensão cuja razão pode ser usada para calcular a variação na tensão de saída devida à variação de  $\pm 10\%$  (isto é,  $\pm 1$  V) na fonte de alimentação. Então, a variação pico a pico na saída será

$$\Delta v_O = 2 \frac{r}{r + R} = 2 \frac{0,0189}{0,0189 + 1} = 37,1 \text{ mV}$$

isto é, para  $\pm 1$  V ( $\pm 10\%$ ) de variação na tensão da fonte de alimentação haverá uma variação correspondente na saída de  $\pm 18,5$  mV ou  $\pm 0,9\%$ . Como isso implica uma variação de cerca de  $\pm 6,2$  mV por diodo, nosso uso do modelo de pequenos sinais está então justificado.

Quando uma resistência de carga 1 k $\Omega$  é conectada em paralelo com a cadeia de diodos, ela drena uma corrente de aproximadamente 2,1 mA. Portanto, a corrente nos diodos decresce de 2,1 mA, resultando em um decréscimo de tensão sobre a cadeia de diodos de:

$$\Delta v_O = -2,1 \times r = -2,1 \times 18,9 = -39,7 \text{ mV}$$

Como isso implica que a tensão sobre cada diodo se reduz em 13,2 mV, o uso que fizemos do modelo para pequenos sinais não é plenamente justificado. Apesar disso, um cálculo detalhado da mudança na queda de tensão empregando-se o modelo exponencial resulta em  $\Delta v_O = -35,5$  mV, que não é tão diferente do valor aproximado obtido usando o modelo incremental.

**Tabela 3.1** Modelos para o diodo na região de polarização direta

Modelo	Gráfico	Equações	Circuito	Comentários
Exponencial		$i_D = I_S e^{v_D/nV_T}$ $v_D = 2,3nV_T \log\left(\frac{i_D}{I_S}\right)$ $v_{D2} - V_{D1} = 2,3nV_T \log\left(\frac{i_{D2}}{I_{D1}}\right)$ $2,3nV_T = 60 \text{ mV para } n = 1$ $2,3nV_T = 120 \text{ mV para } n = 2$		$I_S = 10^{-12}$ a $10^{-15}$ A, dependendo da área da junção. $V_T \cong 25$ mV e $n = 1$ a $2$ . Baseado em princípios físicos e extremamente precisos. Útil, quando análises muito precisas são necessárias.
Segmento de reta (bateria mais resistência)		Para $v_D \geq V_{D0}$ : $i_D = 0$ Para $v_D < V_{D0}$ : $i_D = \frac{1}{r_D} (v_D - V_{D0})$		A escolha de $V_{D0}$ e $r_D$ é determinada pela faixa de correntes para a qual o modelo está sendo empregado. Em função do trabalho necessário, não é tão útil quanto o modelo de tensão constante. Utilizado raramente.
Queda de tensão constante (ou modelo de 0,7 V)		Para $i_D > 0$ : $v_D = 0,7 \text{ V}$		Fácil de usar e muito popular para análises manuais rápidas, o que é essencial em projetos de circuitos.
Diodo ideal		Para $i_D > 0$ $v_D = 0$		Bom para determinar quais diodos estão conduzindo e quais não estão em circuitos com vários diodos. Bom para obter valores aproximados de correntes em diodos, especialmente quando as tensões do circuito são muito maiores que $V_D$ .
Pequenos sinais		Para pequenos sinais superpostos a $V_D$ e $I_D$ : $i_d = v_d/r_d$ $r_d = nV_T/I_D$ (Para $n = 1$ , $v_d$ é limitado a 5 mV; para $n = 2$ , 10 mV)		Útil para determinar a componente de sinal na tensão do diodo (por exemplo, em reguladores de tensão). Serve como base para a modelagem para pequenos sinais de transistores (capítulos 4 e 5).

# Outros dispositivos correlatos de dois terminais

# O Diodo Zener

- Exploram a característica de tensão na região de ruptura inversa.
- São projetados e fabricados exclusivamente para operarem na região de ruptura.
- Deve-se respeitar a máxima corrente reversa (ou a potência *nominal* máxima do dispositivo, que estão inter-relacionadas).

Note que  $r_z = \Delta V / \Delta I$ :

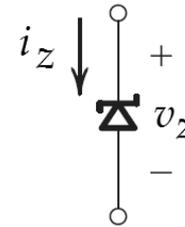


Figura 3.20 Símbolo de circuito para o diodo zener.

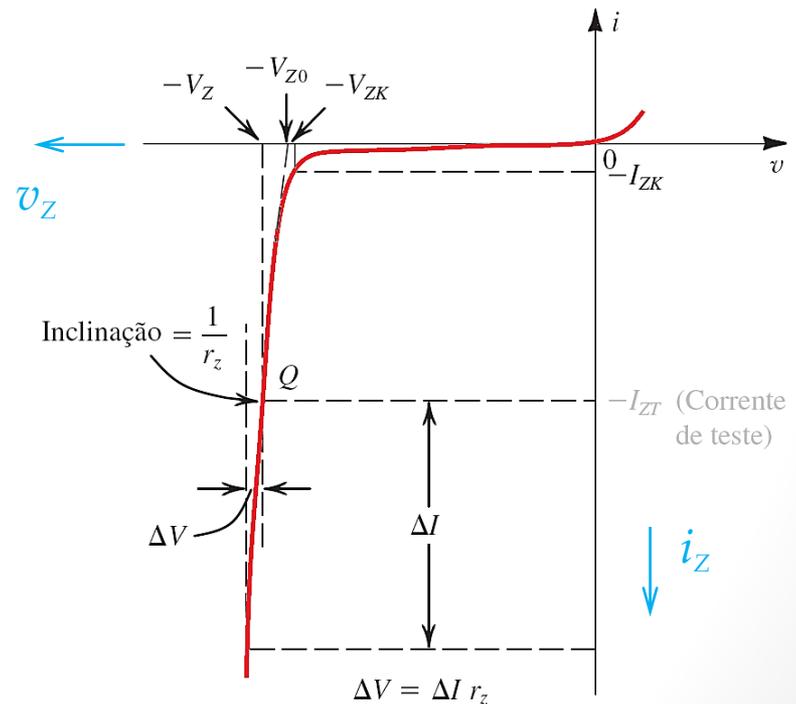


Figura 3.21 As características  $i-v$  do diodo com detalhes da região de ruptura.

# O Modelo do Diodo Zener

- Similar ao modelo linear por partes do diodo comum.
- Neste caso,  $V_{D0} = V_{Z0}$  e  $r_D = r_Z$ .
- Pela LKT:  $V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z$ . (eq. 3.20, do Sedra)
- A resistência  $r_Z$  é da ordem de poucos ohms a poucas dezenas de ohms.
- A tensão  $V_Z$  é tipicamente na faixa de alguns volts a algumas centenas de volts.
- Além de  $V_Z$  (para um dado  $I_{ZT}$ ),  $r_Z$  e  $I_{zk}$ , os fabricantes também definem a potência máxima que um diodo zener pode suportar.

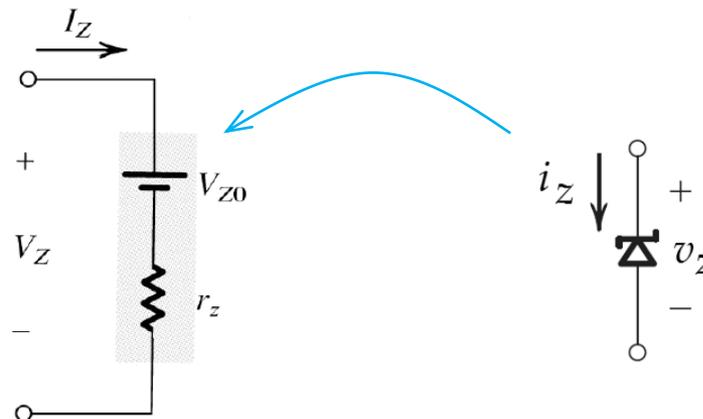


Figura 3.22 Modelo para o diodo zener.

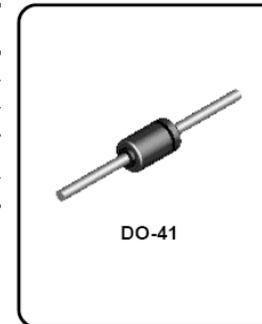
## 1N4728A - 1N4752A Series One Watt Zeners

### Absolute Maximum Ratings\*

TA = 25°C unless otherwise noted

Parameter	Value	Units
Storage Temperature Range	-65 to +200	°C
Maximum Junction Operating Temperature	+ 200	°C
Lead Temperature (1/16" from case for 10 seconds)	+ 230	°C
Total Device Dissipation Derate above 25°C	1.0 6.67	W mW/°C
Surge Power**	10	W

Tolerance: A = 5%



\*These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.

\*\*Non-recurrent square wave PW= 8.3 ms, TA= 55 degrees C.

#### NOTES:

- 1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 200 degrees C.
- 2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

### Electrical Characteristics

TA = 25°C unless otherwise noted

Device	V <sub>Z</sub> (V)	Z <sub>Z</sub> (Ω)	@ I <sub>ZT</sub> (mA)	Z <sub>ZK</sub> (Ω)	@ I <sub>ZK</sub> (mA)	V <sub>R</sub> (V)	@ I <sub>R</sub> (μA)	I <sub>SURGE</sub> (mA)	I <sub>ZM</sub> (mA)
1N4728A	3.3	10	76	400	1.0	1.0	100	1,380	276
1N4729A	3.6	10	69	400	1.0	1.0	100	1,260	252
1N4730A	3.9	9.0	64	400	1.0	1.0	50	1,190	234
1N4731A	4.3	9.0	58	400	1.0	1.0	10	1,070	217
1N4732A	4.7	8.0	53	500	1.0	1.0	10	970	193
1N4733A	5.1	7.0	49	550	1.0	1.0	10	890	178
1N4734A	5.6	5.0	45	600	1.0	2.0	10	810	162
1N4735A	6.2	2.0	41	700	1.0	3.0	10	730	146
1N4736A	6.8	3.5	37	700	1.0	4.0	10	660	133
1N4737A	7.5	4.0	34	700	0.5	5.0	10	605	121
1N4738A	8.2	4.5	31	700	0.5	6.0	10	550	110
1N4739A	9.1	5.0	28	700	0.5	7.0	10	500	100
1N4740A	10	7.0	25	700	0.25	7.6	10	454	91
1N4741A	11	8.0	23	700	0.25	8.4	5.0	414	83
1N4742A	12	9.0	21	700	0.25	9.1	5.0	380	76
1N4743A	13	10	19	700	0.25	9.9	5.0	344	69
1N4744A	15	14	17	700	0.25	11.4	5.0	304	61
1N4745A	16	16	15.5	700	0.25	12.2	5.0	285	57
1N4746A	18	20	14	750	0.25	13.7	5.0	250	50
1N4747A	20	22	12.5	750	0.25	15.2	5.0	225	45
1N4748A	22	23	11.5	750	0.25	16.7	5.0	205	41
1N4749A	24	25	10.5	750	0.25	18.2	5.0	190	38
1N4750A	27	35	9.5	750	0.25	20.6	5.0	170	34
1N4751A	30	40	8.5	1,000	0.25	22.8	5.0	150	30
1N4752A	33	45	7.5	1,000	0.25	25.1	5.0	135	27

V<sub>F</sub> Forward Voltage = 1.2 V Maximum @ I<sub>F</sub> = 200 mA for all 1N4700 series

Folha de Dados  
(Datasheet)  
para um Diodo  
Zener Típico

# O Regulador Paralelo (Shunt)

## EXEMPLO 3.8

O diodo zener de 6,8 V no circuito da Figura 3.23(a) é especificado para ter  $V_Z = 6,8\text{V}$  com  $I_Z = 5\text{ mA}$ ,  $r_z = 20\Omega$  e  $I_{ZK} = 0,2\text{ mA}$ . A fonte de alimentação  $V^+$  é de 10 V nominal, mas pode variar em  $\pm 1\text{ V}$ .

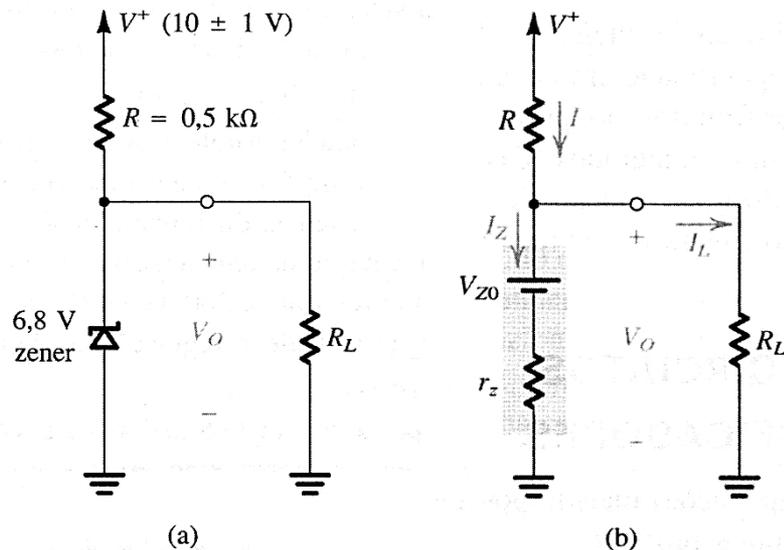


Figura 3.23 (a) Circuito para o Exemplo 3.8. (b) O circuito com o diodo zener substituído pelo modelo de circuito equivalente.

- Calcule o valor de  $V_O$  sem carga e com o valor de  $V^+$  nominal.
- Calcule a variação em  $V_O$  resultante da variação de  $\pm 1\text{ V}$  em  $V^+$ . Note que  $(\Delta V_O/\Delta V^+)$ , normalmente expressa em mV/V, é conhecida como **regulação de linha**.
- Calcule a variação em  $V_O$  resultante da conexão de uma carga  $R_L$  que consome uma corrente  $I_L = 1\text{ mA}$  e determine então a **regulação de carga**  $(\Delta V_O/\Delta I_L)$  em mV/mA.
- Calcule a variação em  $V_O$  quando  $R_L = 2\text{ k}\Omega$ .
- Calcule a variação em  $V_O$  quando  $R_L = 0,5\text{ k}\Omega$ .
- Qual o valor mínimo de  $R_L$  com o qual o diodo continua operando na região de ruptura?

### Solução

Primeiro, precisamos determinar o valor do parâmetro  $V_{Z0}$  do modelo do diodo zener. Substituir  $V_Z = 6,8\text{ V}$ ,  $I_Z = 5\text{ mA}$  e  $r_z = 20\Omega$  na Equação 3.20 resulta em  $V_{Z0} = 6,7\text{ V}$ . A Figura 3.23(b) mostra o circuito com o diodo zener substituído por seu modelo.

- Sem carga conectada, a corrente pelo zener é dada por

$$\begin{aligned} I_Z = I &= \frac{V^+ - V_{Z0}}{R + r_z} \\ &= \frac{10 - 6,7}{0,5 + 0,02} = 6,35\text{ mA} \end{aligned}$$

Portanto,

$$\begin{aligned} V_O &= V_{Z0} + I_Z r_z \\ &= 6,7 + 6,35 \times 0,02 = 6,83\text{ V} \end{aligned}$$

# Exemplo 3.8 (cont.)

(b) Para uma variação de  $\pm 1$  V em  $V^+$ , a variação na tensão de saída pode ser encontrada por

$$\begin{aligned}\Delta V_O &= \Delta V^+ \frac{r_z}{R + r_z} \\ &= \pm 1 \times \frac{20}{500 + 20} = \pm 38,5 \text{ mV}\end{aligned}$$

Logo,

↙

$$\text{Regulação de linha} = 38,5 \text{ mV/V}$$

(c) Quando se conecta uma resistência de carga que consome uma corrente de carga  $I_L = 1$  mA, a corrente no zener diminuirá de 1 mA. A mudança correspondente na tensão zener será então:

$$\begin{aligned}\Delta V_O &= r_z \Delta I_Z \\ &= 20 \times -1 = -20 \text{ mV}\end{aligned}$$

Assim, a regulação de carga será

$$\text{Regulação de carga} \equiv \frac{\Delta V_O}{\Delta I_L} = -20 \text{ mV/mA}$$

(d) Quando uma resistência de carga de  $2 \text{ k}\Omega$  for conectada, a corrente na carga será de aproximadamente  $6,8 \text{ V} / 2 \text{ k}\Omega = 3,4 \text{ mA}$ . Portanto, a variação na corrente zener será de  $\Delta I_Z = -3,4 \text{ mA}$ , e a correspondente variação na tensão zener (tensão de saída) será então de

$$\begin{aligned}\Delta V_O &= r_z \Delta I_Z \\ &= 20 \times -3,4 = -68 \text{ mV}\end{aligned}$$

Esse cálculo, no entanto, é aproximado, porque desconsidera a mudança na corrente  $I$ . Um valor estimado mais preciso de  $\Delta V_O$  pode ser obtido pela análise do circuito na Figura 3.23(b). O resultado dessa análise é  $\Delta V_O = -70 \text{ mV}$ .

(e)  $R_L$  de  $0,5 \text{ k}\Omega$  deve drenar uma corrente de carga de  $6,8 / 0,5 = 13,6 \text{ mA}$ . Isso não é possível, visto que a corrente  $I$  que circula por  $R$  é de apenas  $6,4 \text{ mA}$  (para  $V^+ = 10 \text{ V}$ ). Portanto, o zener deve estar em corte. Se este for realmente o caso, então  $V_O$  é determinado pelo divisor de tensão formado por  $R_L$  e  $R$  (Figura 3.23a):

$$\begin{aligned}V_O &= V^+ \frac{R_L}{R + R_L} \\ &= 10 \frac{0,5}{0,5 + 0,5} = 5 \text{ V}\end{aligned}$$

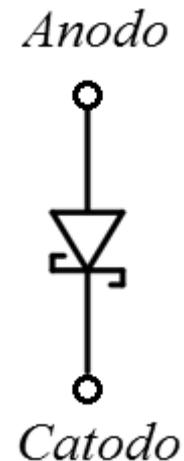
Como essa tensão é menor que a tensão de ruptura do zener, o diodo não está realmente operando na região de ruptura.

(f) Para o zener operar na borda da região de ruptura,  $I_Z = I_{ZK} = 0,2 \text{ mA}$  e  $V_Z \approx V_{ZK} \approx 6,7 \text{ V}$ . Nesse ponto, a menor (pior caso) corrente fornecida a  $R$  é  $(9 - 6,7) / 0,5 = 4,6 \text{ mA}$  e, portanto, a corrente na carga é de  $4,6 - 0,2 = 4,4 \text{ mA}$ . O valor correspondente de  $R_L$  é

$$R_L = \frac{6,7}{4,4} \approx 1,5 \text{ k}\Omega$$

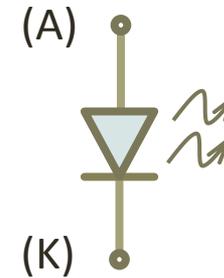
# O Diodo Schottky

- Também conhecido como diodo de barreira Schottky (SBD).
- É formado pela junção de um material metálico com um semicondutor, processo que também funciona como um retificador.
- Apresenta queda de tensão direta bem inferior à dos diodos de silício comuns, ou seja  $V_F$  é da ordem de 0,3V.
- Permitem comutações (on-off) muito mais rápidas que os diodos comuns.
- Existem diodos Schottky à base de arseneto de gálio (GaAs), que é um composto muito importante na indústria eletrônica atual.

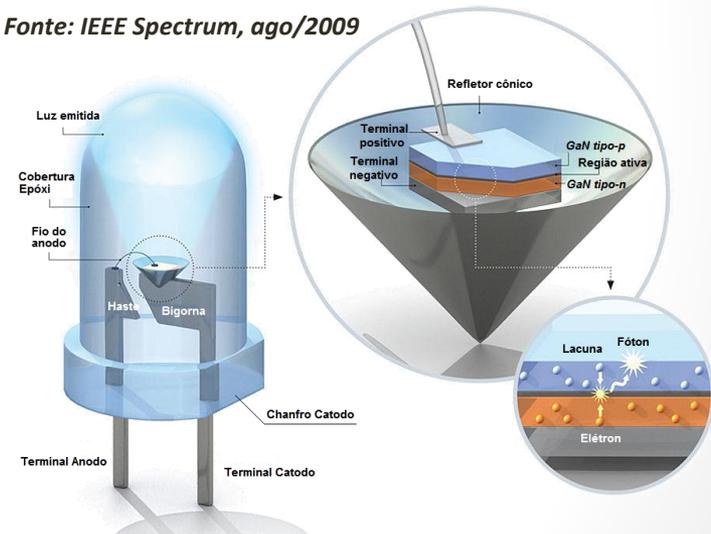


# O Diodo Emissor de Luz (LED)

- O acrônimo LED vem do inglês: *Light Emitting Diode*.
- São diodos otimizados para emitir luz quando da passagem de corrente direta (de anodo para catodo), fenômeno fundamentado no princípio da *recombinação* de elétrons no material semiconductor (ver cap. 4).
- O processo de emissão de luz em LEDs é conhecido como **ELETROLUMINESCÊNCIA**.
- A cor da luz de um LED depende do material semiconductor usado na sua fabricação.
- Existem LEDs incolores, ou seja, emitem radiação não visível com infravermelho (IR, do inglês *infrared*) e ultravioleta (UV).
- LEDs possuem reduzida capacidade de bloqueio de tensão reversa (ou seja, não são apropriados para operarem como retificadores).



Fonte: IEEE Spectrum, ago/2009



# LEDs (Histórico)

- O início das pesquisas sobre diodos emissores de luz aconteceu na primeira metade do século XX, envolvendo cientistas britânicos (H. J. Round), russos (Oleg Vladimirovich Losev) e americanos.
- Nicholas (Nick) Holonyak , Jr. (1928 ~), considerado o pai dos LEDs modernos, reportou a primeira emissão visível de LEDs, em 1962.
- Shuji Nakamura (1954 ~), engenheiro eletrônico japonês (Nichia Corp., atualmente na UCSB), demonstrou o primeiro LED azul em 1994, o que rapidamente viabilizou a produção de LEDs brancos de alta intensidade.

- *1907 – Carborundum “luminoso”*
- *1955 – LED IR (Infravermelho)*
- *1962 – LED vermelho*
- *1971 – LED azul / 1993 comercial  
(Shuji Nakamura)*
- *1972 – LED amarelo/ 90's comercial*
- *1972 – LED âmbar / 90's comercial*
- *1995 – LED branco/ 90's comercial*
- *Final dos anos 90 – UV LED / 90's  
comercial*

# LEDs (Comparação Simples)

Cor	Faixa de Comprimento de Onda (nm)	$V_F$ típica @ 20mA	Eficiência (W/W)	Energia do bandgap
Infravermelho	$\lambda > 720$	1,6 V	-	< 1,72 eV
Vermelho	$625 < \lambda < 720$	1,8 V	39%	1,72-1,98 eV
Laranja	$600 < \lambda < 625$	2,0 V	29%	1,98-2,06 eV
Amarelo	$570 < \lambda < 600$	2,1 V	-	2,06-2,18 eV
Verde	$515 < \lambda < 570$	3,5 V	15%	2,18-2,41 eV
Ciano	$490 < \lambda < 515$	3,2 V	26%	2,41-2,53 eV
Azul	$455 < \lambda < 490$	3,6 V	35%	2,53-2,72 eV
Violeta	$390 < \lambda < 455$	4 V	-	2,72-3,78 eV
Ultravioleta	$\lambda < 390$	4,4 V	-	> 3,8 eV



*Obs.: O espectro eletromagnético visível ao olho humano engloba a faixa de 390nm a 700nm, aproximadamente. Porém, alguns consideram uma faixa mais abrangente, que vai de 380nm a 780nm.*

# LEDs (Comparação Simples)

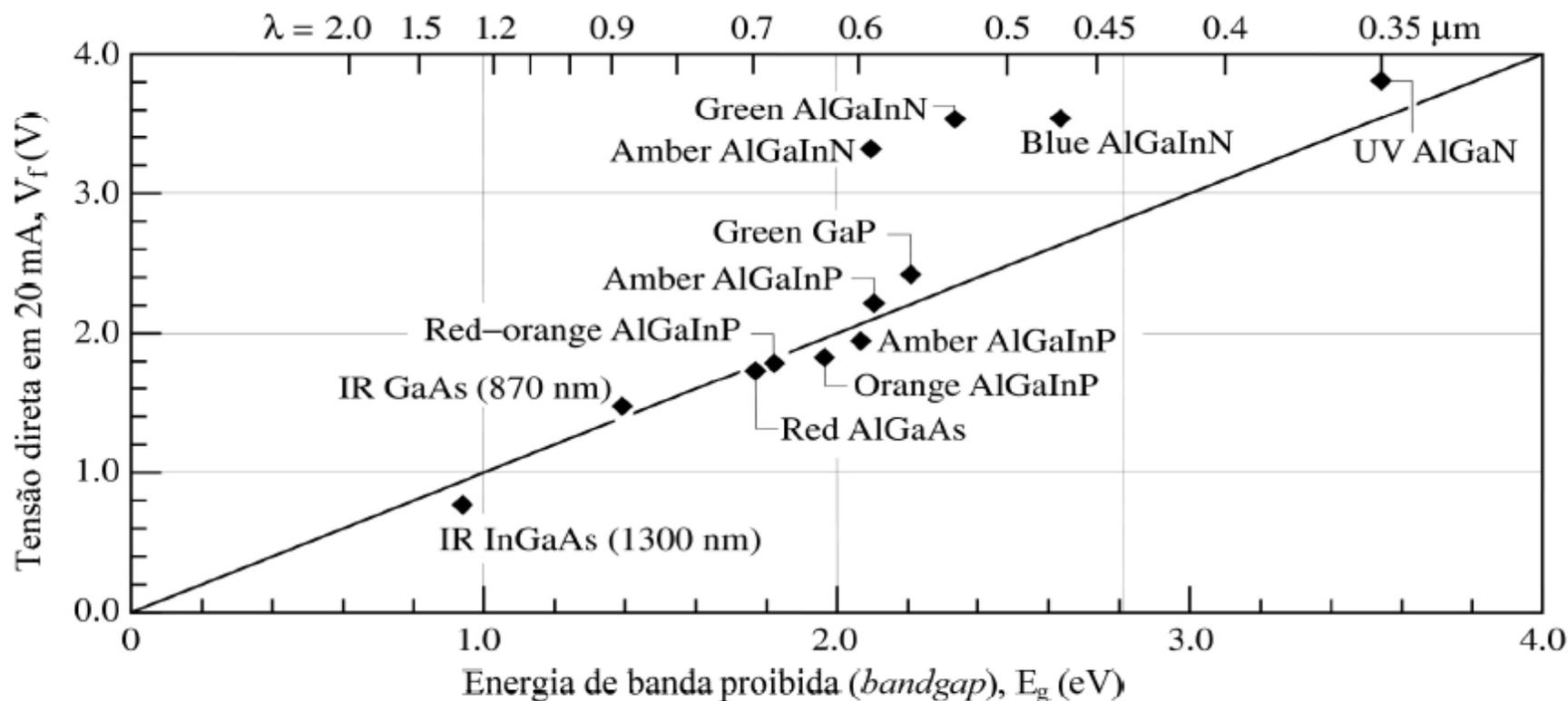
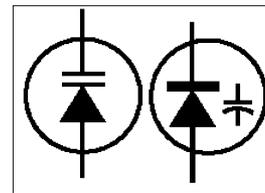


Figura 1.3 – Tensões diretas versus *bandgap*, para LEDs de diferentes materiais semicondutores (SCHUBERT, 2003, p. 63).

# Diodo Varactor (ou Varicap)

- Exploram um efeito parasita dos diodos reais, denominado **capacitância de depleção**,  $C_j$  (ver Cap. 4).
- A capacitância equivalente (entre anodo e catodo) é uma função da **tensão inversa**,  $V_R$ , sobre o dispositivo.
- Assim, o varactor pode apresentar uma **capacitância variável** (*Variable Capacitor diode*).
- Possui uma aplicação importante na sintonia automática de emissoras em radioreceptores.
- $C_{j0}$  é a capacitância observada com tensão A-K nula.
- Apesar de em diodos reais  $1/3 < m < 1/2$ , nos varactores  $m$  está entre 3 e 4.

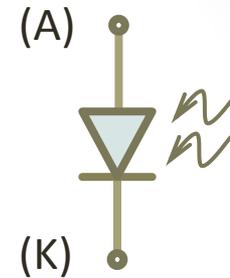
$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_0}\right)^m}$$



Simbologia.

# Fotodiodos

- Quando a junção do diodo está reversamente polarizada e é iluminada com uma determinada intensidade luminosa ocorre a geração de uma *fotocorrente*, proporcional à luz incidente.
- O fotodiodo pode ser usado para converter sinais luminosos em sinais elétricos.
- Tal como os LEDs, os fotodiodos pertencem à família dos dispositivos optoeletrônicos, que compõem o campo de conhecimento conhecido como fotônica.
- Em geral: a eletrônica é ideal para processamento de sinais e a óptica para a transmissão e armazenamento de dados.
- Aplicações importantes: CD-ROM (*compact disc read only memory*), DVD (digital versatile disc), discos blu-ray, controles remotos, optoacopladores e células solares (fotovoltaicas).



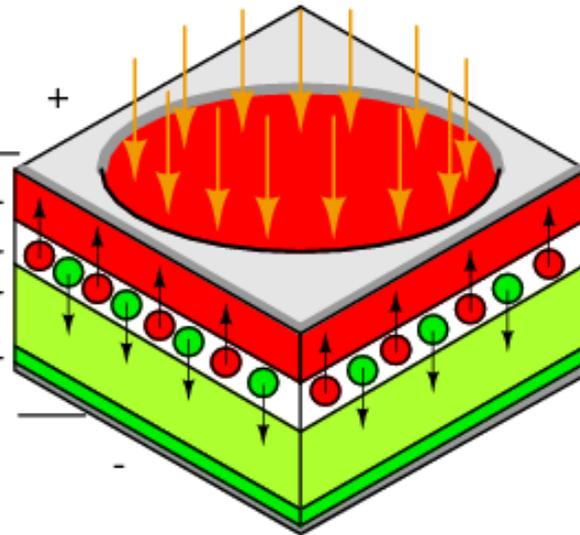
# Fotodiodos - construção

(A)



(K)

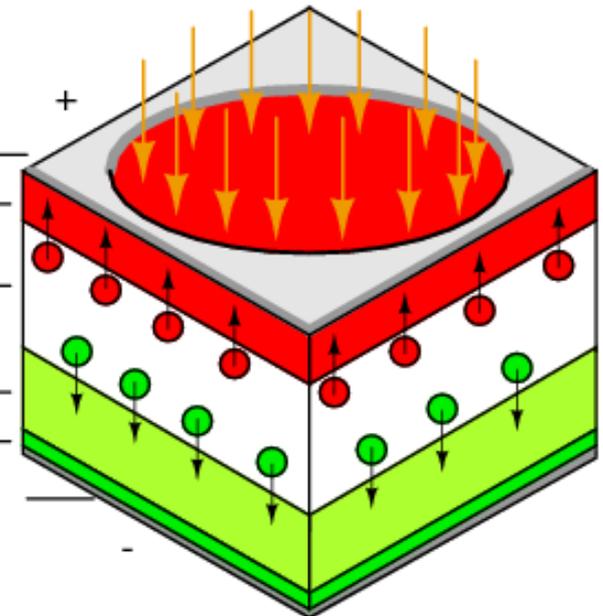
top metal contact  
p diffusion  
depletion region  
n type  
n+ contact region  
bottom metal contact



## Diodo PIN

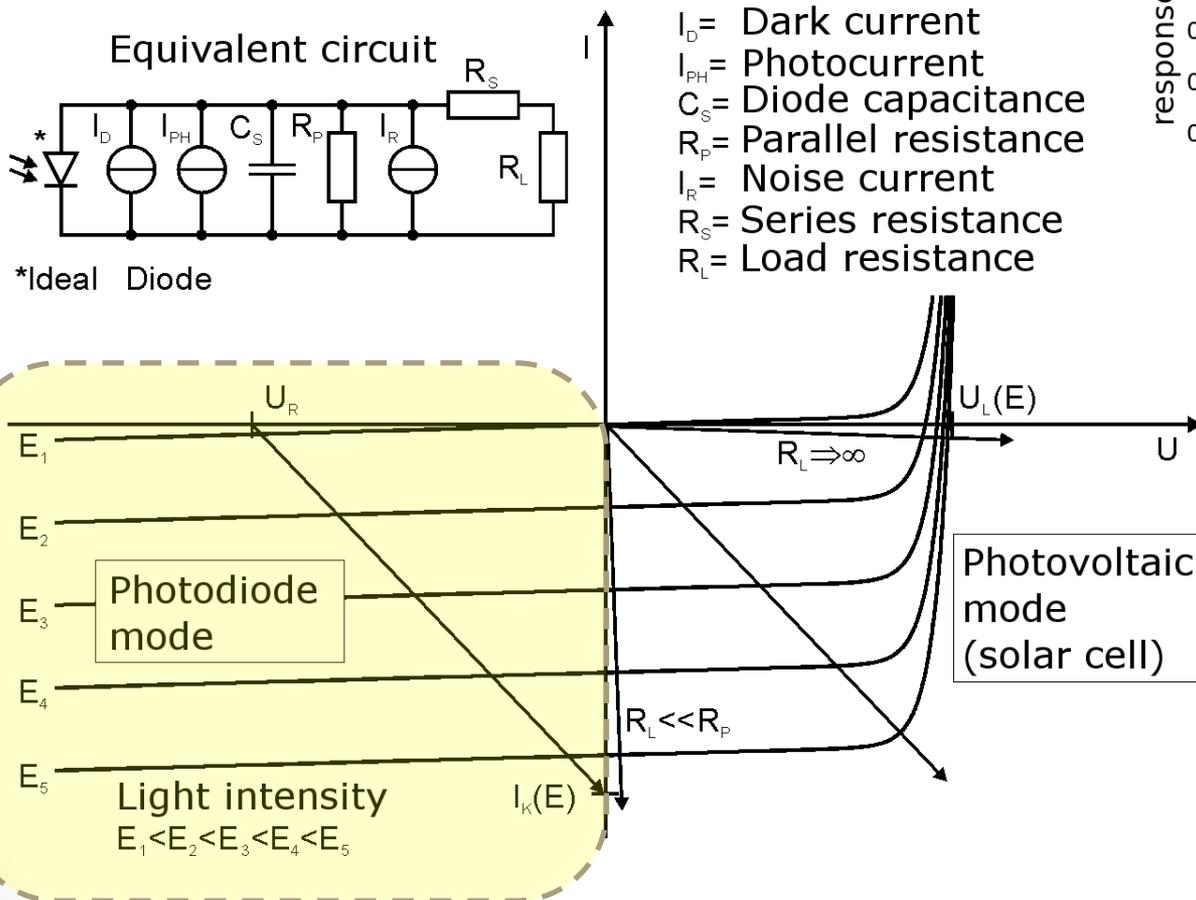
*Inserção de uma camada intrínseca → aumenta a camada de depleção (região fotossensível) → reduz capacitância, aumenta velocidade, possui mais possibilidade de criar pares de portadores com a incidência de luz*

top metal contact  
p diffusion  
intrinsic region (larger depletion region)  
n type  
n+ contact region  
bottom metal contact

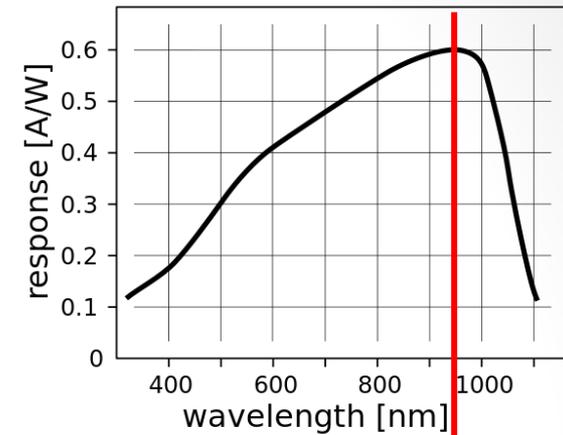


# Fotodiodos

## Modelo e Característica v-i

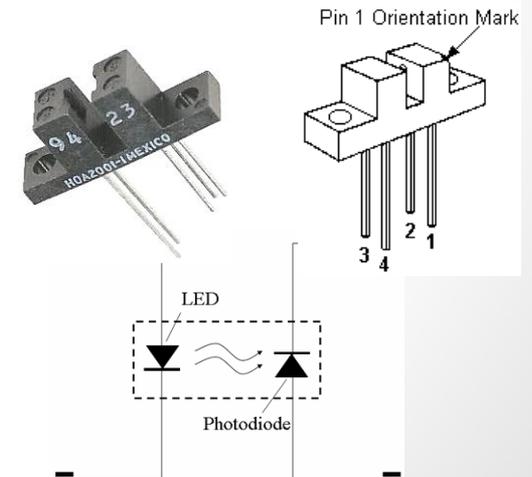


## Resposta luminosa:



~ 950 nm (IR)

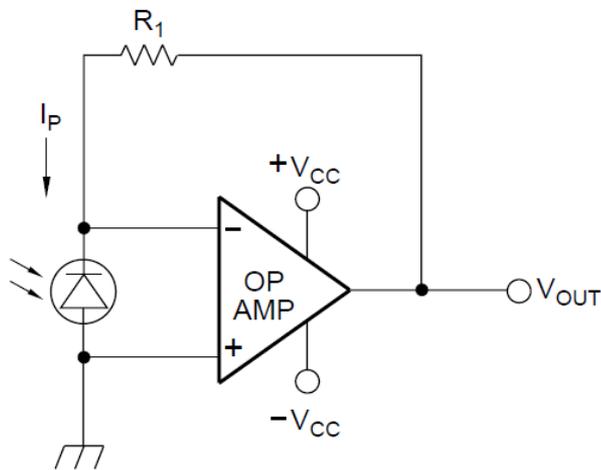
## Chave óptica:



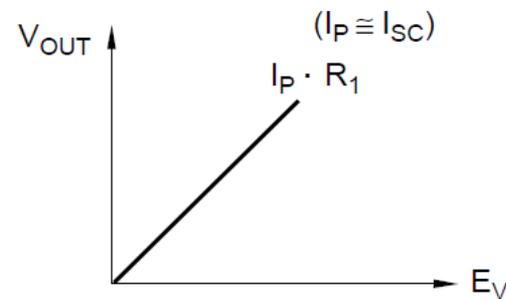
**Modo fotocorrente (PC)  $\rightarrow i_D \approx cte.$**

# Fotodiodos

- Circuito de aplicação (amplificador de fotocorrente)



*Circuito com amp. operacional*

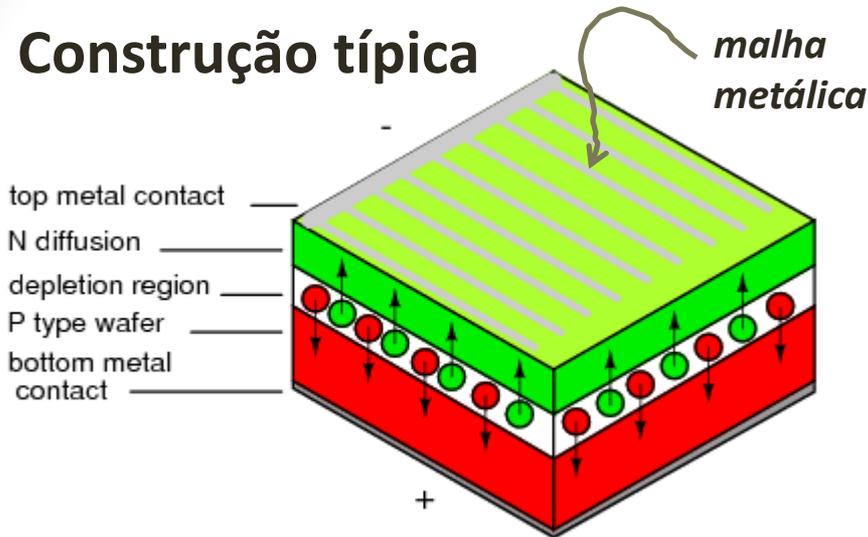


*Característica de transferência*

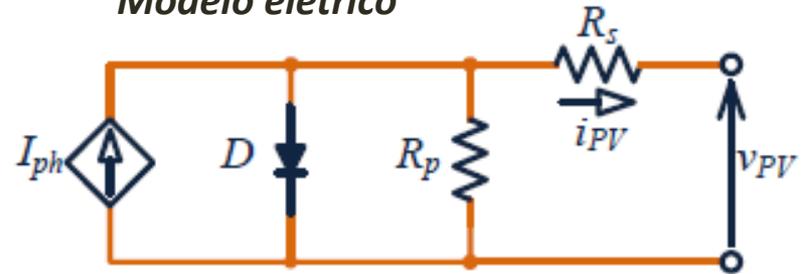
Obs.:  $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito do fotodiodo (ver próximo slide), visto que a entrada do operacional apresenta um curto virtual.  $E_V$  é a luminosidade incidente (intensidade luminosa, ver próximo slide), de modo que a tensão de saída é proporcional à variação da luminosidade.

# Célula fotovoltaica

## Construção típica

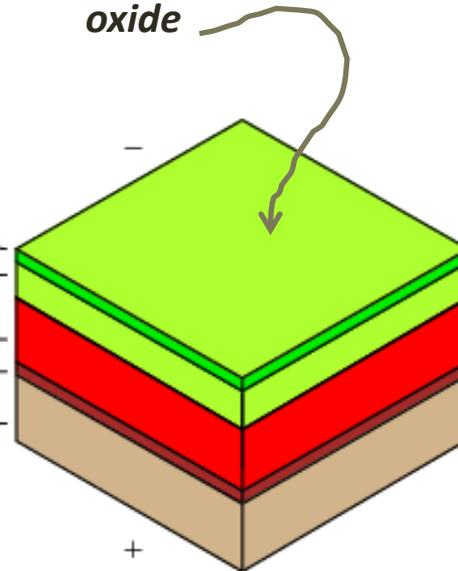
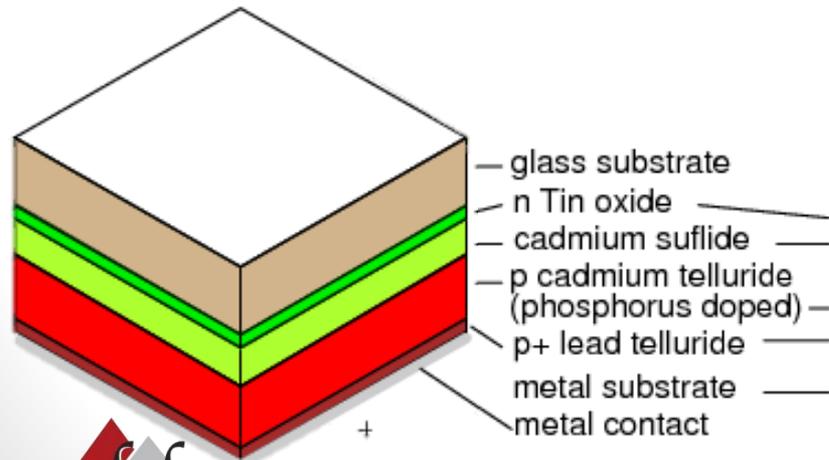


## Modelo elétrico

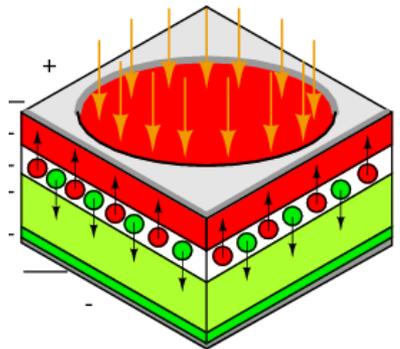


## Com catodo transparente:

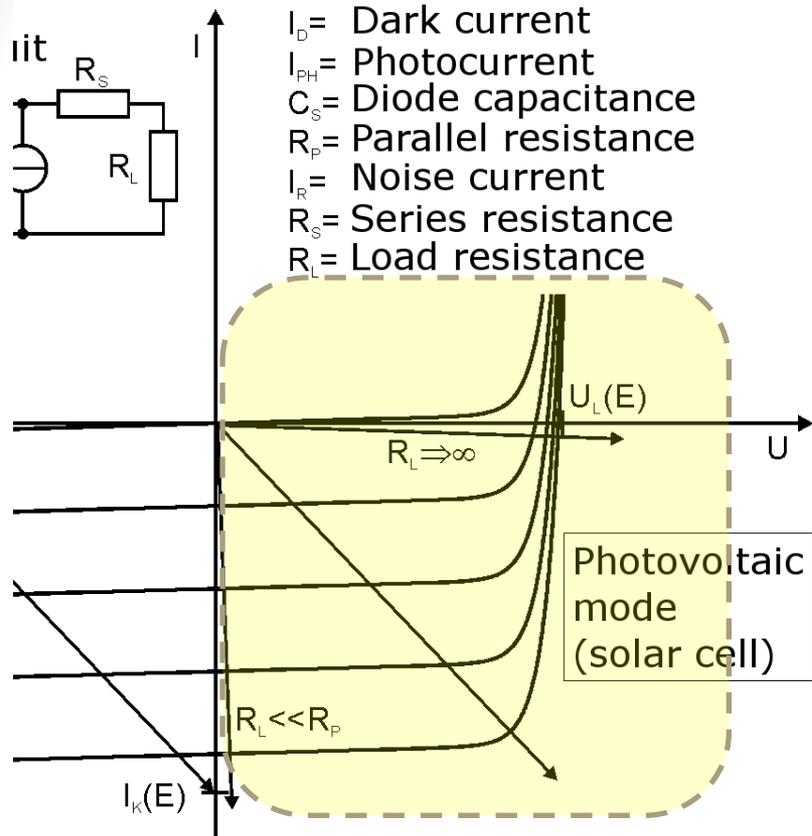
ITO –  
indium-tin  
oxide



Comparativo  
construtivo c/  
fotodiodo:



# Célula fotovoltaica

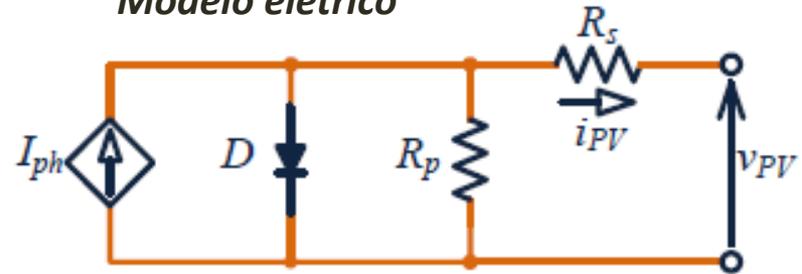


## Modo fotovoltaico (PV):

$v_{PV} \cong \text{cte. se } i_{PV} \rightarrow 0$  (aberto)

$i_{PV} \cong \text{cte. se } v_{PV} \rightarrow 0$  (curto)

## Modelo elétrico



$$i_{PV}(v_{PV}, P_{sun}, T) \cong I_{ph} - I_s e^{\left( \frac{v_{PV} + i_{PV} R_s}{n V_T} \right)} - \frac{v_{PV} + i_{PV} R_s}{R_p}$$

$$\begin{cases} I_{ph}(T, P_{sun}) \propto P_{sun}, T \rightarrow \text{fotocorrente} \\ I_s(T) = \left[ \left( \frac{1}{e^{n V_T}} \right) \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_p} \right) \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\frac{q E_G}{n k_B} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)} \right] \rightarrow \text{saturação reversa} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{OC} \approx n V_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \rightarrow \text{tensão de circuito aberto} \\ I_{SC} \approx I_{ph} \rightarrow \text{corrente de curto-circuito} \end{cases}$$

# Célula fotovoltaica

