

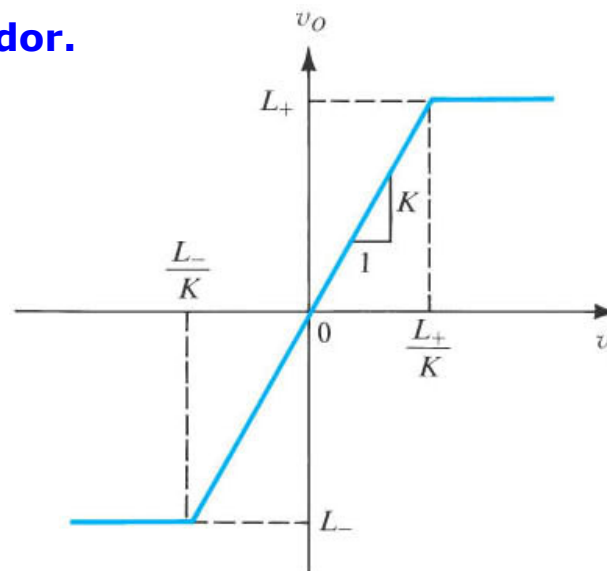


## O DÍODO REAL → **Análise de circuitos com díodos**

### **CIRCUITOS LIMITADORES**

#### ● **Característica de transferência de um circuito limitador.**

■ Para tensões de entrada dentro de uma certa gama  $L_-/K \leq v_I \leq L_+/K$ , o limitador comporta-se como um circuito linear, fornecendo uma tensão de saída proporcional à entrada,  $v_O = K v_I$ .



#### **Limitadores passivos ( $K \leq 1$ )**

■ Se  $v_I$  exceder o limiar superior ( $L_+/K$ ), a tensão de saída é limitada ou fixada no nível superior de limitação  $L_+$ . Por outro lado, se  $v_I$  se tornar inferior ao limiar inferior de limitação ( $L_-/K$ ), a tensão de saída  $v_O$  é limitada ao nível inferior de limitação  $L_-$ .



## O DÍODO REAL



## Análise de circuitos com díodos

### CIRCUITOS LIMITADORES



### Limitador duplo



O limitador funciona em ambos os picos (positivo e negativo) da onda de entrada

### Limitador duro



Transições abruptas

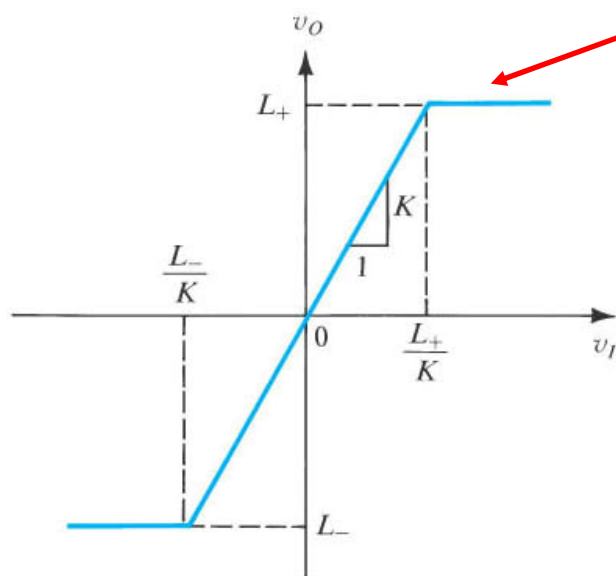


Fig. 3.32

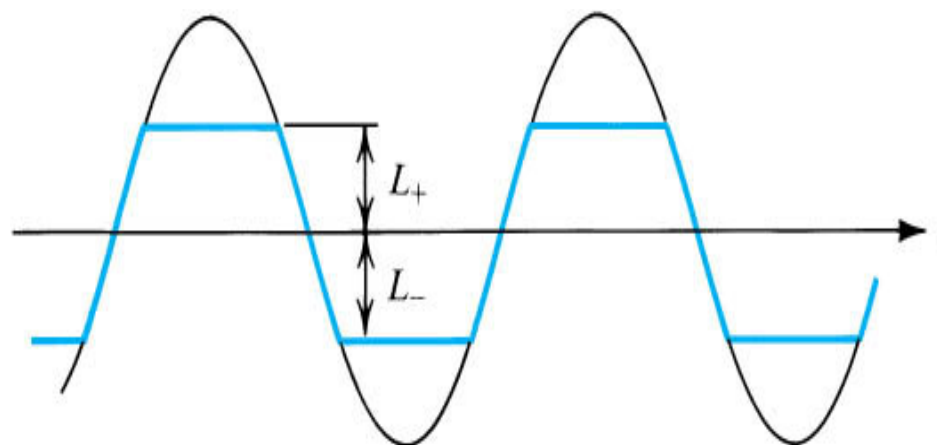


Fig. 3.33



## O DÍODO REAL



## Análise de circuitos com díodos

### CIRCUITOS LIMITADORES



### Limitador duplo

### Limitação suave

■ Caracterizada por transições suaves entre a região linear e as regiões de saturação, e uma inclinação não nula, maior do que zero, nas regiões de saturação.

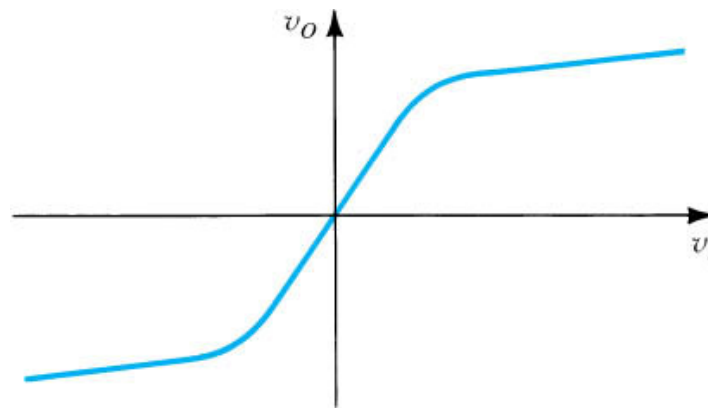


Fig. 3.34

## O DÍODO REAL → Análise de circuitos com díodos

### CIRCUITOS LIMITADORES

#### Aplicações

- Sistemas de processamento de sinal.
- Os díodos podem ser combinados com resistências para implementar realizações simples da função limitadora.

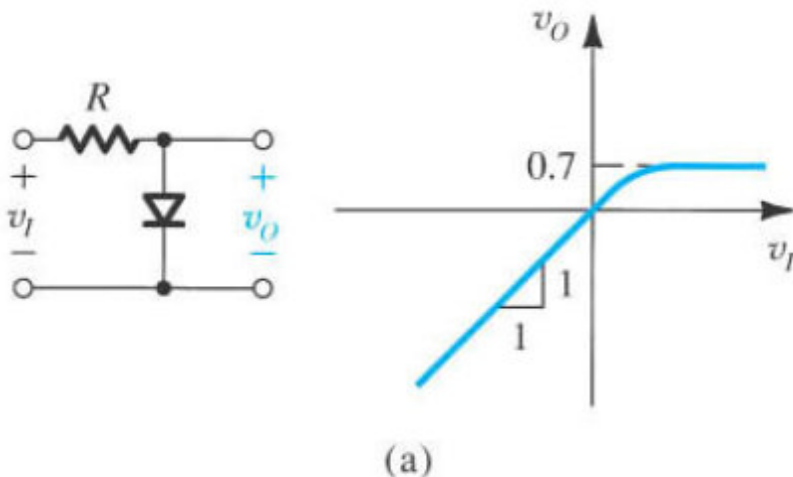
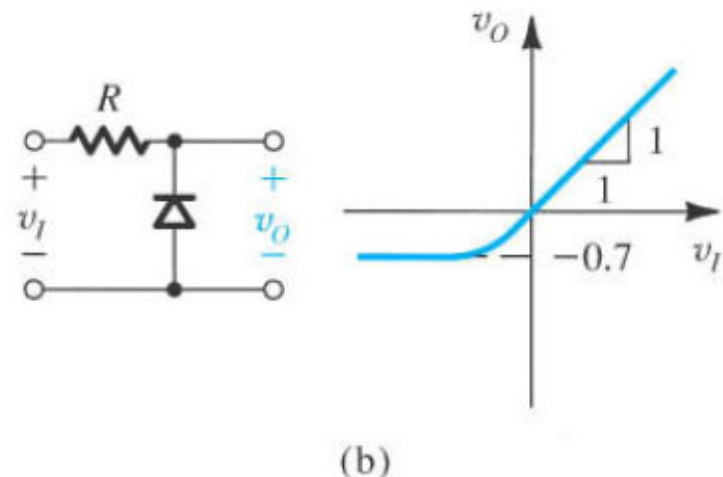


Fig. 3.35



Para  $v_I < 0,5$  V, o díodo está em corte.

- Características de transferência, obtidas usando o modelo de queda de tensão constante ( $V_D = 0,7$  V) para o díodo, mas admitindo uma transição suave entre as regiões linear e de saturação da característica.



## O DÍODO REAL →

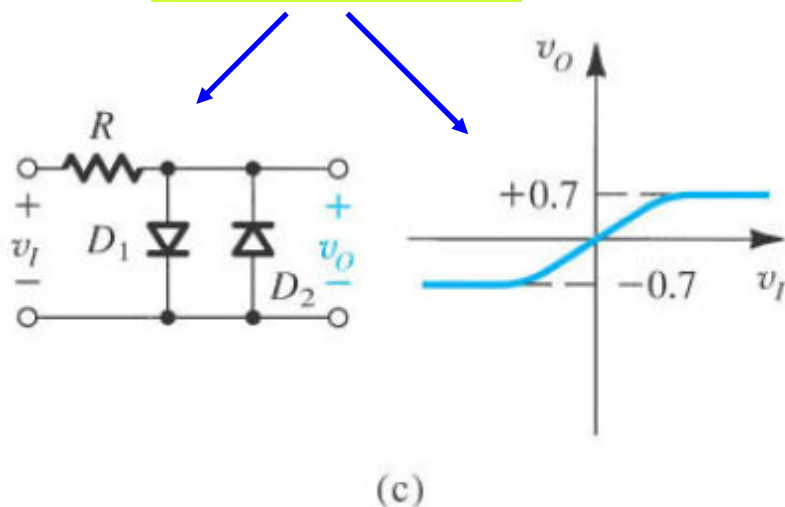
## Análise de circuitos com díodos

### CIRCUITOS LIMITADORES

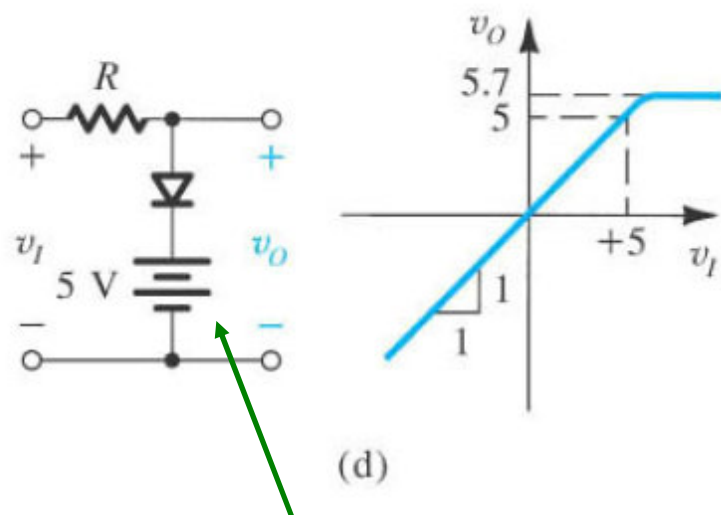
### EXEMPLOS (CONT.)

■ Usando o **modelo de rectas lineares** para o díodo, podem obter-se melhores aproximações para as características de transferência. Neste caso, a região de saturação das características apresentará uma ligeira inclinação (devido ao efeito de  $r_D$ ).

#### Limitação dupla



Para a gama  $-0,5 \text{ V} \leq v_I \leq 0,5 \text{ V}$ ,  
ambos os díodos estão em corte e  $v_O = v_I$ .



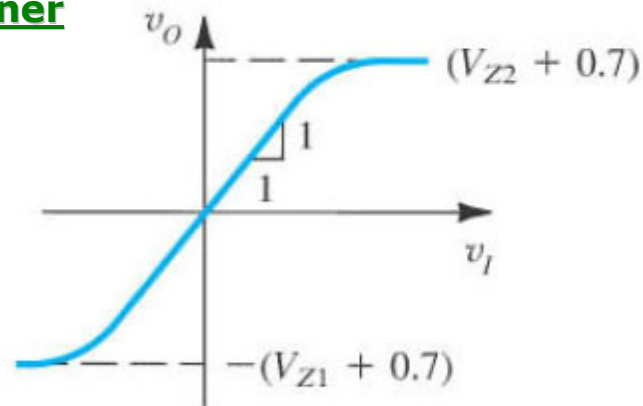
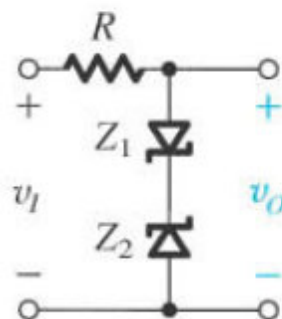
Obtenção limiares superiores



## O DÍODO REAL → **Análise de circuitos com díodos**

### **CIRCUITOS LIMITADORES** → **EXEMPLOS (CONT.)**

#### Obtenção de limiares superiores usando díodos zener

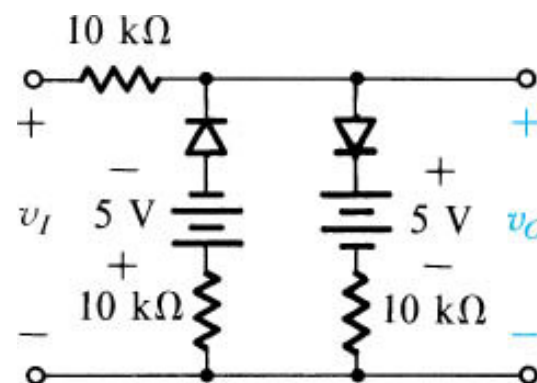


(e)

### **EXERCÍCIO**

Assumindo os díodos ideais, represente a característica de transferência do circuito.

$$\begin{aligned} v_o &= v_i \quad \text{para} \quad -5 \leq v_i \leq +5 \\ v_o &= \frac{1}{2}v_i - 2.5 \quad \text{para} \quad v_i \leq -5 \\ v_o &= \frac{1}{2}v_i + 2.5 \quad \text{para} \quad v_i \geq +5 \end{aligned}$$

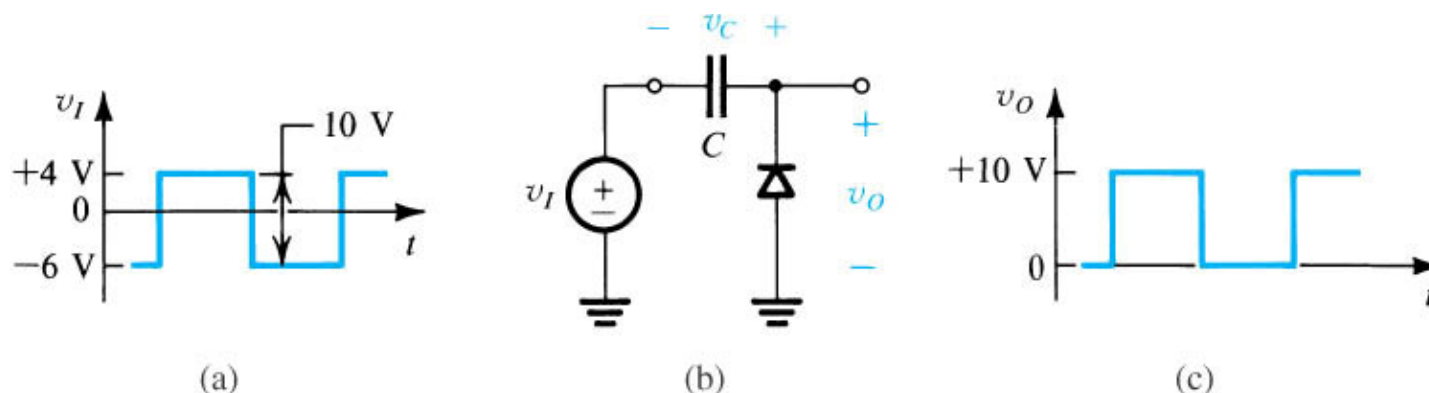




## O DÍODO REAL → **Análise de circuitos com díodos**

### **CIRCUITOS GRAMPEADORES OU RECUPERADOR DC.**

■ Considere-se o circuito rectificador de pico básico, e tome-se a saída aos terminais do díodo em vez de o fazer aos terminais do condensador.



**Fig. 3.36**

■ O condensador carrega-se à tensão  $v_C$ , igual à amplitude do pico mais negativo do sinal de entrada (neste exemplo é 6V).

■ Em seguida, o díodo entra em corte e o condensador retém a sua tensão indefinidamente.

■ A tensão de saída é dada por:  $v_O = v_I + v_C$

■ A saída será uma onda quadrada com níveis de 0 e +10 V (fig. c).

■ Invertendo a polaridade do díodo, obtém-se uma forma de onda de saída cujo pico superior é fixado em 0 V.

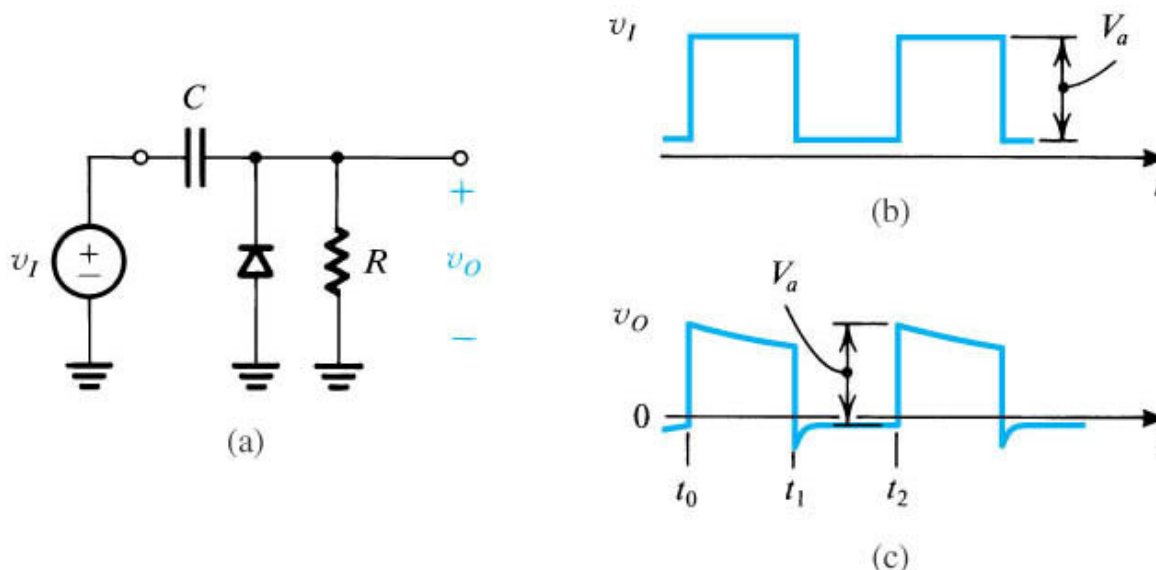


## O DÍODO REAL → **Análise de circuitos com díodos**

### **CIRCUITOS GRAMPEADORES OU RECUPERADOR DC.**

● Ligação de uma resistência de carga  $R$  em paralelo com o díodo num circuito grampeador.

■ Para uma tensão positiva, circula corrente através de  $R$ , proveniente do condensador, levando, assim, este a descarregar-se e a tensão de saída a decrescer, como se mostra na fig. c, para uma onda quadrada de entrada.



**Fig. 3.37**





**O DÍODO REAL**



**Análise de circuitos com díodos**

**CIRCUITOS GRAMPEADORES OU RECUPERADOR DC.**

- Durante o intervalo de  $t_0$  a  $t_1$  a tensão de saída diminui exponencialmente com a constante de tempo RC. No instante  $t_1$  a entrada diminui bruscamente de  $V_a$  e a saída acompanha essa transição, tornando-se negativa. Como consequência, o diodo conduz fortemente e carrega o condensador rapidamente pois a constante de tempo é essencialmente determinada pela baixa resistência do diodo.
- No final do intervalo  $t_1$  a  $t_2$ , a tensão de saída é algumas décimas de volts negativa (p.ex: -0.5V).
- Quando a tensão de entrada aumenta para  $V_a$ , em  $t_2$ , a saída acompanha essa variação, repetindo-se o ciclo.
- Em regime permanente, a carga perdida pelo condensador durante o intervalo de  $t_0$  a  $t_1$  é recuperada durante o intervalo de  $t_1$  e  $t_2$ .

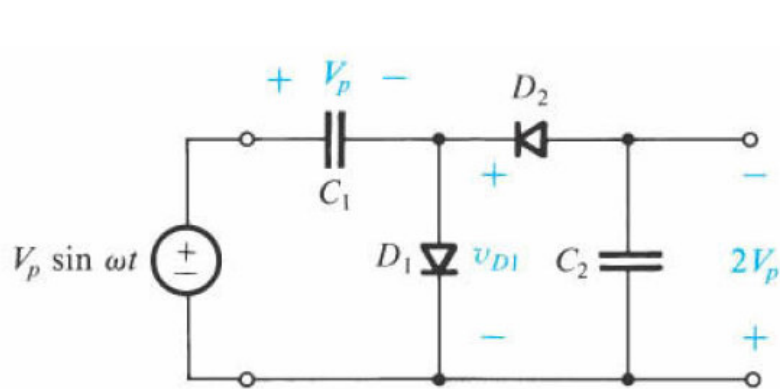


## O DÍODO REAL → **Análise de circuitos com díodos**

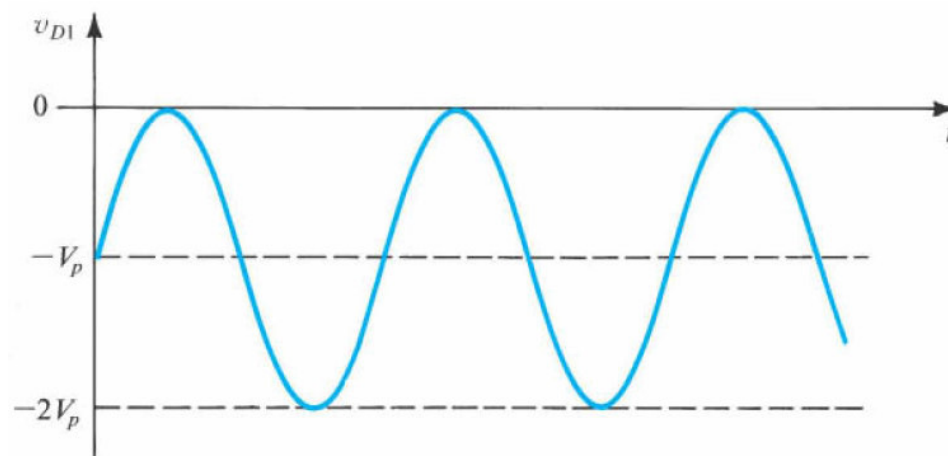
### **DUPLICADOR DE TENSÃO**

● A fig. 3.38 mostra um circuito composto de **duas secções em cascata**: um **fixador formado por  $C_1$  e  $D_1$** , e um **rectificador de pico formado por  $D_2$  e  $C_2$** .

■ Quando submetido a um sinal sinusoidal de amplitude  $V_p$ , a secção fixadora fornece a forma de onda representada na fig. b.



**(fig. 3.38)**



**(b)**

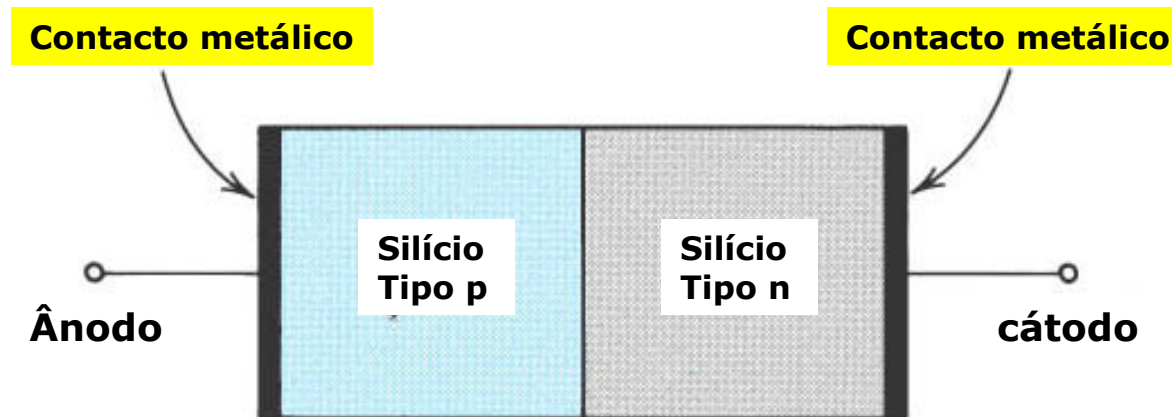
■ Uma vez que a tensão de saída é dupla do pico da entrada, o circuito é conhecido como **duplicador de tensão**.



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

### Conceitos básicos sobre semicondutores

#### A junção pn



#### Silício intrínseco

- Um cristal de silício puro ou intrínseco, tem uma estrutura cristalina regular que consiste na repetição regular em três dimensões de uma célula unitária com a forma de um tetraedro com um átomo em cada vértice.
- O átomo de silício é tetravalente, i.e., quatro dos seus electrões são electrões de valência. Cada electrão de valência é partilhado por dois átomos vizinhos, de forma que cada átomo tem, aparentemente, oito electrões na última camada, a de valência.



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

### Conceitos básicos sobre semicondutores

■ Os átomos são mantidos nas suas posições por ligações, constituídas por dois electrões de valência, chamadas ligações covalentes.

■ **Representação simbólica bidimensional da estrutura.**

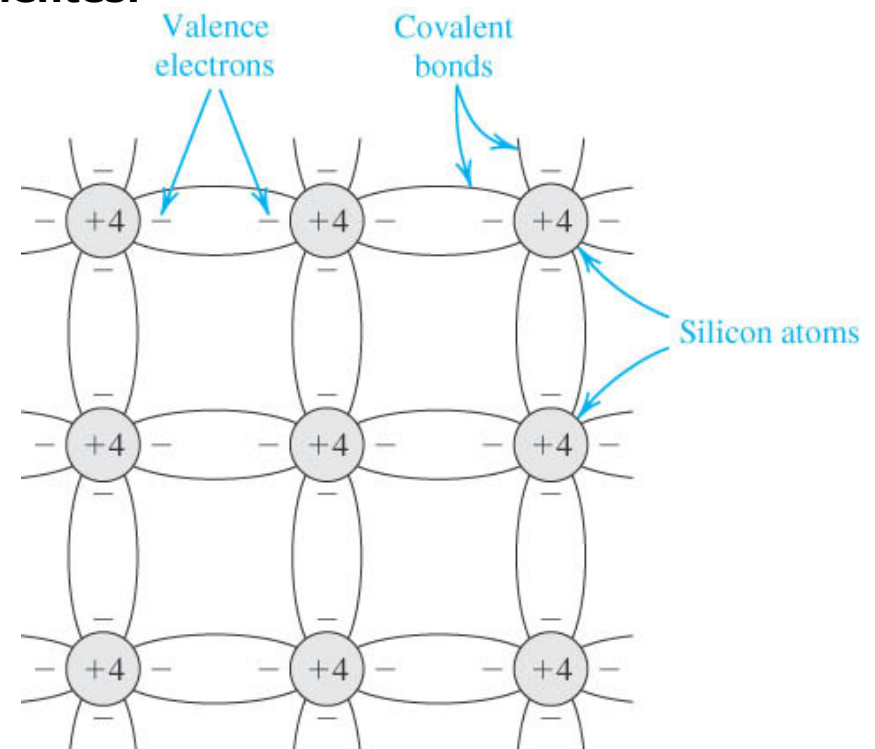
■ Para temperaturas baixas

**Ausência de electrões livres**

■ Para a temperatura ambiente

**Probabilidade de existirem alguns electrões livres**

**Formação por electrão-lacuna**



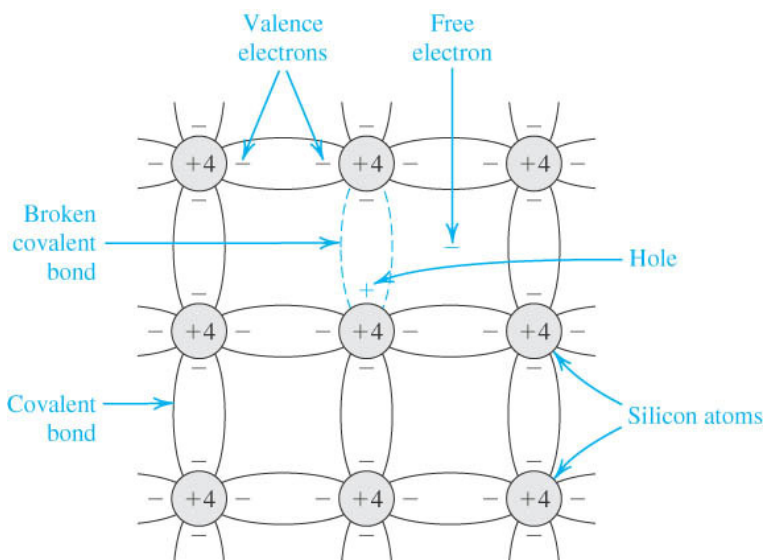


## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

### Conceitos básicos sobre semicondutores

■ Estes electrões livres e lacunas movem-se aleatoriamente através da estrutura cristalina do silício e, no desenvolvimento deste processo, alguns electrões podem preencher algumas lacunas. Este mecanismo, chamado **recombinação**. Origina o desaparecimento de electrões livres e de lacunas.

■ A concentração de electrões livres **n** é igual à concentração de lacunas **p** para um semiconductor intrínseco (silício).



$$n = p = n_i$$

concentração intrínseca.

$$n_i^2 = BT^3 e^{-E_g / kT}$$

**B** = parâmetro dependente do material =  $5.4 \times 10^{31}$ .  
**E<sub>g</sub>** = banda proibida (eV) = 1.12 eV (silício)  
**K** = constante de boltzmann ( $8.62 \times 10^{-5}$  eV/K)



### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



Difusão e deriva

- Existem dois mecanismos pelos quais os electrões e as lacunas se movem através de um cristal de silício - **difusão e deriva**.
- A **difusão** está associada ao movimento aleatório devido à agitação térmica.

- Num cristal de silício intrínseco, com concentrações uniformes de electrões livres e de lacunas, este movimento aleatório não se traduz num fluxo ordenado de carga (i.e., corrente).
- Caso a concentração de (por exemplo) electrões livres seja maior numa parte do cristal do que noutra, então os electrões difundir-se-ão da região de maior concentração para a região de menor concentração. Este processo de difusão dá origem a um **fluxo ordenado de carga**, a que chama **corrente de difusão**.



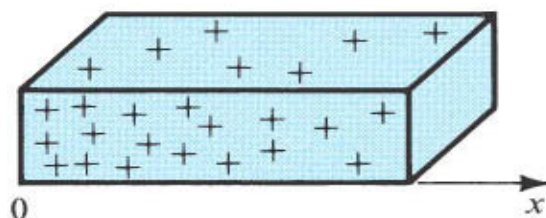
## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

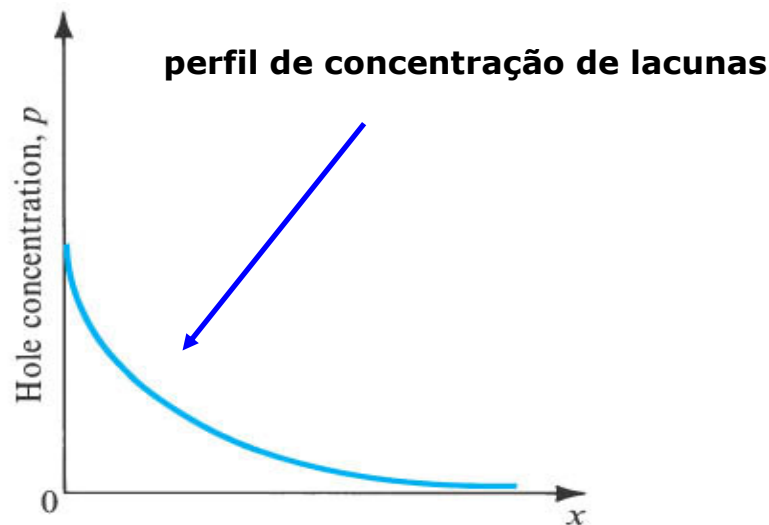


Difusão e deriva (Cont.)

Exemplo



(a)



(b)

■ A intensidade da corrente em cada ponto, é proporcional à inclinação da curva de concentração, ou gradiente de concentração, nesse ponto. Assim, a densidade de corrente de difusão de lacunas  $J_p$  é dada por:

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$D_p$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) chama-se constante de difusão de lacunas ( $12 \text{ cm}^2/\text{s}$ ).

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$D_n$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) chama-se constante de difusão de electrões ( $34 \text{ cm}^2/\text{s}$ ).

(3.37)



### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



Deriva

■ O outro mecanismo de movimento de portadores nos semicondutores é a **deriva**. A deriva de portadores ocorre quando se aplica um **campo eléctrico** através dum cristal de silício.

■ Sob a acção de um campo eléctrico, os electrões livres e as lacunas são acelerados e adquirem uma componente de velocidade (sobrepota à velocidade da sua agitação térmica), chamada **velocidade de deriva**.

■ Sob acção de um campo de intensidade  $E$  (V/m), as lacunas derivam na direcção do campo e adquirem velocidade dada por

$$v_d = \mu_p E$$

■ Em que  $\mu_p$  (m<sup>2</sup>/V.s) é designada por mobilidade das lacunas.

■ Para os electrões,

$$v_d = -\mu_n E$$

■ Em que  $\mu_n$  (m<sup>2</sup>/V.s) é designada por mobilidade dos electrões.





### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



Deriva

Para silício intrínseco

$$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V.s}$$

$$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$$

#### Cálculo da densidade de corrente de deriva

● Considere-se, agora, um cristal tendo uma **densidade de lacunas p** e uma **densidade de electrões livres n**, sujeito a um campo eléctrico E

- Densidade de carga positiva (na direcção do campo) =  $q p$  (coulomb/cm<sup>3</sup>).
- Velocidade de deriva =  $\mu_p E$  (cm/s)
- Num segundo, a carga propagando-se através de uma secção A perpendicular ao eixo x é  $q p \mu_p E A$  (coulomb).
- Dividindo pela secção, obtém-se a densidade de corrente.

$$J_p = qp\mu_p E$$



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

### Conceitos básicos sobre semicondutores



### Deriva

- Os electrões livres derivam na direcção oposta ao campo.
- Tem-se, assim, uma carga de densidade  $(-qn)$  movendo-se na direcção negativa de  $x$ , com uma velocidade negativa  $(-\mu_n E)$ .
- Corrente resultante é positiva, com uma densidade

$$J_n = qn\mu_n E$$

- A densidade de corrente de deriva total é ( electrões e lacunas)

$$J = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E$$

com



$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

condutividade do material.

- Para um semiconductor intrínseco  $n = p = n_i$ , a condutividade intrínseca é:

$$\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p)$$



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



Semicondutores dopados.

Semicondutores tipo n



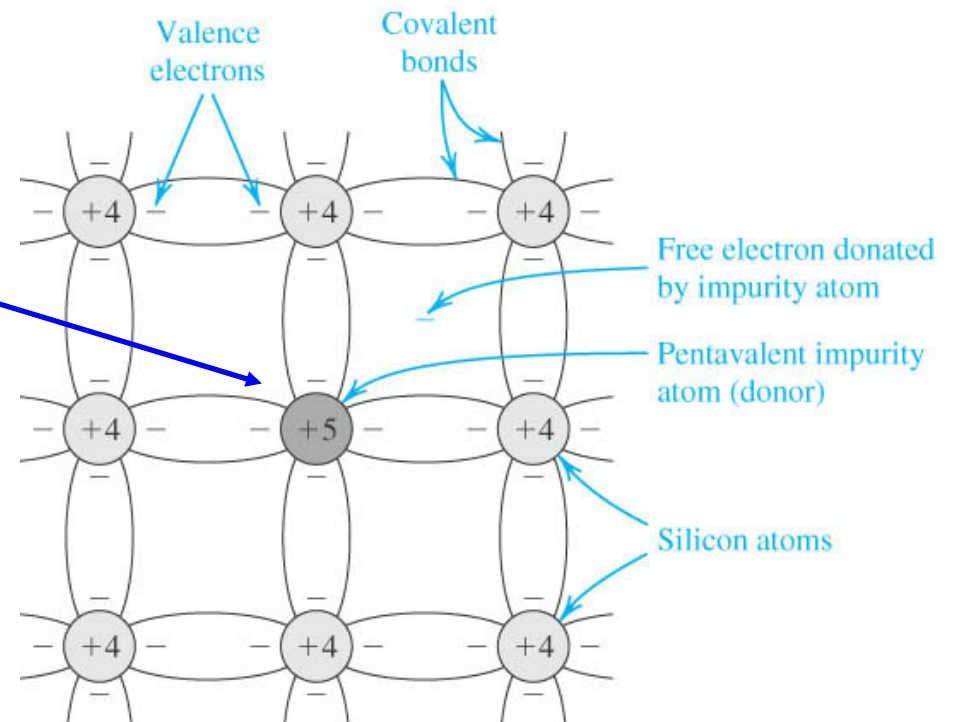
Portadores maioritários : electrões

Introdução de átomos de impurezas do grupo V (p.ex: fósforo)

■ Electricamente activos se alojados na estrutura regular do silício

■ Se a concentração de átomos dadores (fósforo) for  $N_D$ , a concentração de electrões livres no silício do tipo n, em equilíbrio térmico,  $n_{n0}$ , será:

$$n_{n0} \cong N_D$$





## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

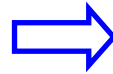
### Conceitos básicos sobre semicondutores



### Semicondutores dopados.

■ Em equilíbrio térmico, o produto das concentrações de electrões e lacunas é constante:

$$n_{n0} p_{n0} = n_i^2$$



$$p_{n0} \cong \frac{n_i^2}{N_D}$$

### ● Semicondutores tipo p



Portadores maioritários : lacunas

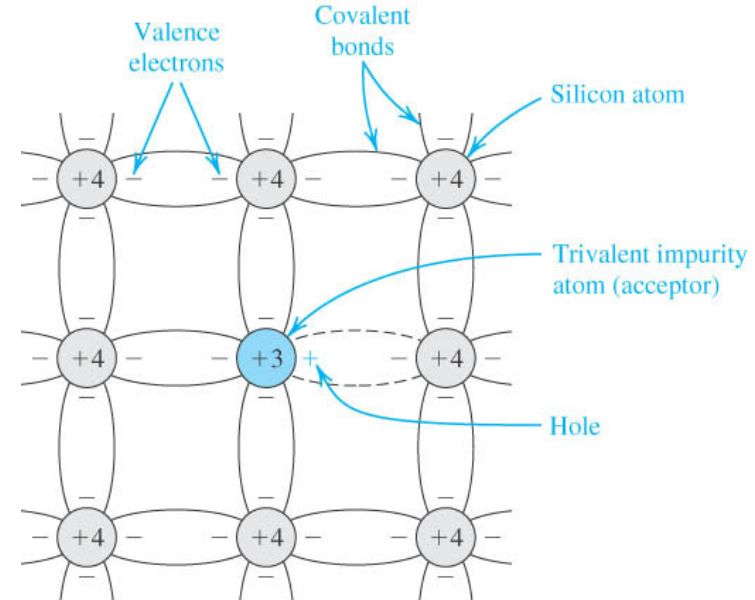


Introdução de átomos de impurezas do grupo III (p.ex: boro)



■ Se a concentração de átomos aceitadores (boro) for  $N_A$ , a concentração de lacunas no silício do tipo p, em equilíbrio térmico,  $p_{p0}$ , será:

$$p_{p0} \cong N_A$$





## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

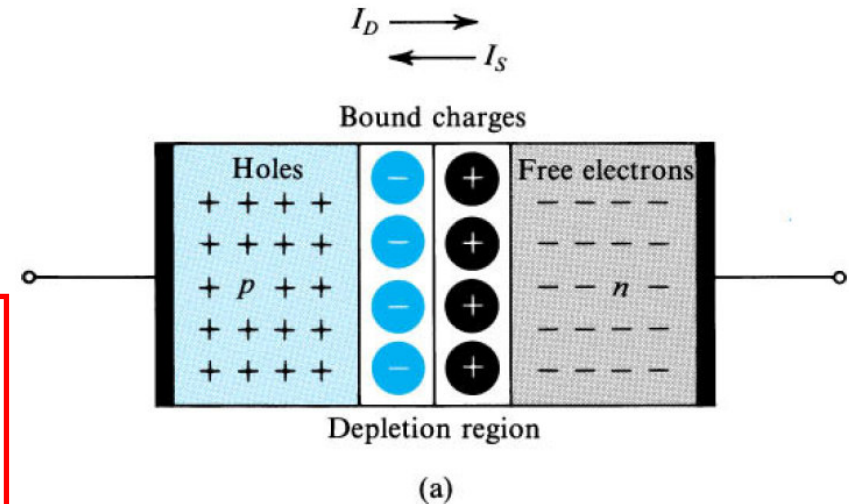
Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn em circuito aberto

### ■ Corrente de difusão $I_D$

■ Uma vez que a concentração de lacunas é elevada na região p e baixa na região n, há lacunas que se difundem através da junção do lado p para o lado n; analogamente, difundem-se electrões do lado n para o lado p.



■ Estas duas componentes de corrente somam-se constituindo a corrente de difusão  $I_D$ , cujo sentido é do lado p para o lado n.



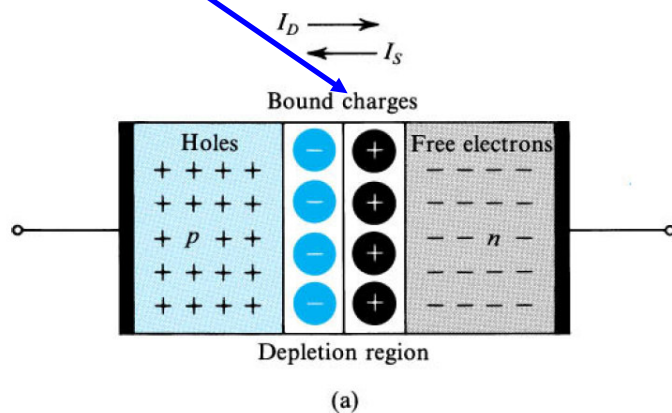
## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn em circuito aberto

- As lacunas que se difundem através da junção para o lado n, recombina-se rapidamente com alguns dos electrões maioritários aí existentes, desaparecendo.
- Este processo de **recombinação** provoca o desaparecimento de alguns electrões livres do material do tipo n, originando que alguns dos iões positivos deixem de estar neutralizados pelos electrões livres. Estes iões constituem uma carga que se diz **descoberta**. Uma vez que a recombinação se verifica próximo da **junção**, é neste local que se constitui uma **região desprovida de electrões livres** com uma certa carga positiva, correspondendo aos iões positivos não neutralizados



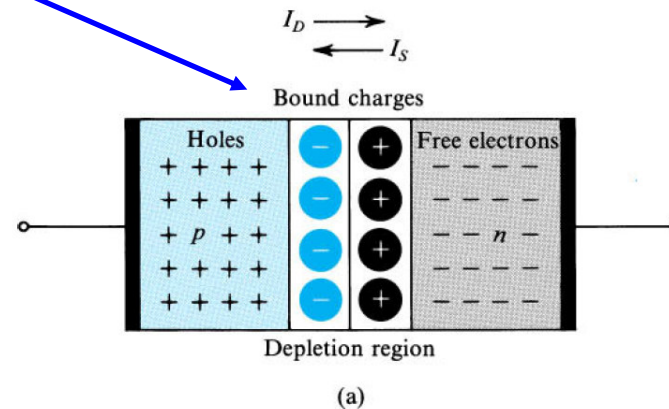


## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

A junção pn em circuito aberto

■ Os electrões que se difundem através da junção para o lado p recombina-se rapidamente com algumas das lacunas maioritárias deste cristal, desaparecendo assim. Isto leva também ao desaparecimento de algumas lacunas maioritárias, originando que alguns iões negativos não sejam neutralizados. Assim, do lado p, junto à junção constitui-se uma **região desprovida de lacunas**, com uma certa carga negativa.



Devido à **difusão e recombinação**, forma-se uma região de ambos os lados da junção esvaziada de portadores de carga e com carga positiva do lado n e carga negativa do lado p. Esta região denomina-se **região de depleção**, ou ainda região de carga espacial.



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

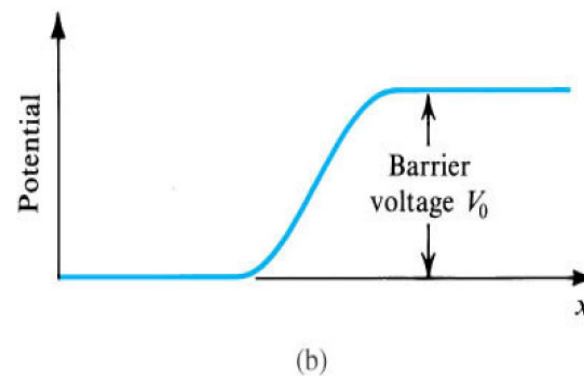
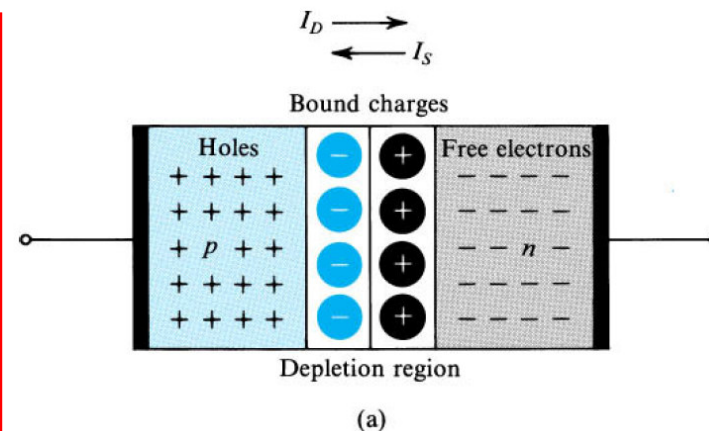
### Conceitos básicos sobre semicondutores



### A junção pn em circuito aberto

● A carga existente em ambos os lados da região de depleção origina o estabelecimento de um campo eléctrico através dessa região. Consequentemente, resulta uma diferença de potencial através da região de depleção, com o lado n positivo em relação ao lado p.

● Este campo eléctrico opõe-se à difusão de lacunas do lado p para o lado n e de electrões do lado n para o lado p. De facto, a queda de tensão na região de depleção actua como uma **barreira de potencial** que tem de ser vencida pelas lacunas para se difundirem para o lado n e pelos electrões para se difundirem para o lado p. Quanto maior for a barreira de potencial, menor será o número de portadores que a conseguem vencer e, portanto, menor será a intensidade da corrente de difusão. Assim, a **corrente de difusão  $I_D$**  depende fortemente da queda de tensão  $V_0$  através da região de depleção.







## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn em circuito aberto

### A corrente de deriva $I_s$ e o equilíbrio

- Além da componente  $I_D$  devida à **difusão dos portadores maioritários**, existe uma outra componente de corrente devida à **deriva dos portadores minoritários** através da junção.
  - De facto, algumas lacunas geradas termicamente no cristal n difundem-se ao longo dele até atingirem a região de depleção. Aqui, são acelerados pelo campo eléctrico e introduzidos no lado p. Analogamente, alguns dos electrões minoritários gerados termicamente no lado p difundem-se até à região de depleção, onde, acelerados pelo campo eléctrico penetram no lado n.
  - Estas duas componentes de corrente, electrões movendo-se do lado p para o lado n e lacunas de n para p, somam-se constituindo a **corrente de deriva  $I_s$ , cujo sentido é do lado n para o lado p da junção**.
  - Uma vez que a corrente  $I_s$  é uma corrente de portadores minoritários gerados termicamente, o seu valor é fortemente dependente da **temperatura**; contudo, é independente do valor da queda de tensão na região de depleção,  $V_0$ .
- Com a **junção em circuito aberto**, **não há corrente exterior**; assim, as duas componentes opostas de corrente através da junção devem ser iguais em grandeza:

$$I_D = I_s$$



### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn em circuito aberto

Esta condição de equilíbrio é mantida pela barreira de potencial  $V_0$ . Assim, se por qualquer razão  $I_D$  exceder  $I_S$ , então mais carga eléctrica ficará descoberta de ambos os lados da junção, a **região de depleção alargar-se-á**, e a sua tensão ( $V_0$ ) **aumentará**. Isto **fará diminuir  $I_D$  até que se atinja o equilíbrio com  $I_D = I_S$** . Por outro lado, **se  $I_S$  exceder  $I_D$** , então a quantidade de carga descoberta diminuirá, a região de depleção estreitar-se-á e a queda de tensão da barreira diminuirá. Isto faz  $I_D$  aumentar até que se atinge o equilíbrio com  $I_D = I_S$ .

### A tensão nos terminais

Quando os terminais da junção pn estão em circuito aberto, a tensão medida entre eles é zero. Isto é, a tensão  $V_0$  da região de depleção não aparece nos terminais do diodo. Isto deve-se às tensões de contacto existentes nas junções metal-semicondutor dos terminais do diodo que neutralizam exactamente a barreira de potencial. Se assim não fosse, seria possível retirar energia da junção pn, o que, claramente, viola o princípio da conservação da energia.



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn em circuito aberto

### Largura da região de depleção

- A região de depleção existe em ambos os materiais p e n e em quantidades de carga iguais de ambos os lados.
- Usualmente os níveis de dopagem dos cristais p e n não são iguais, pelo que a largura da região de depleção não será igual nos dois lados.
- Para que a carga **descoberta** seja igual, a largura da região de depleção terá de ser maior do lado com menor concentração.
- Designando a largura da região de depleção em p por  $x_p$  e no lado n por  $x_n$ , a condição de igual carga é dada por,

$$qN_A x_p A = qN_D x_n A \quad \text{ou} \quad \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D} \quad (3.49)$$

**A = secção transversa da junção.**

- Na prática, é habitual um lado ser muito menos dopado do que o outro, resultando assim que a região de depleção exista praticamente em só um dos dois materiais semicondutores.

A largura da região de depleção de uma junção em circuito aberto



$\epsilon_s$  = permitividade do silício ( $11.7 \epsilon_0$ )

**0.1 a 1  $\mu\text{m}$**

$$W_{dep} = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{q}\right) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) V_o} \quad (3.50)$$



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

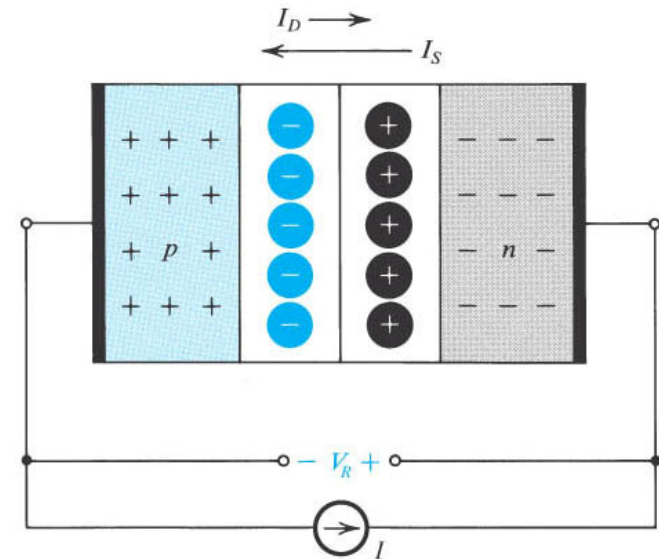
### Conceitos básicos sobre semicondutores



### A junção pn inversamente polarizada

■ **Junção pn excitada por uma fonte de corrente constante, em vez de uma fonte de tensão constante.**

■ Admitamos que o valor de  $I$  é menor do que  $I_S$ ; se  $I$  for maior do que  $I_S$ , ocorrerá ruptura.



■ A corrente  $I$  consiste em electrões fluindo no circuito exterior do cristal n para o cristal p (i.e., no sentido oposto ao de  $I$ ). Isto implica que electrões saiam do cristal n e lacunas do cristal p. Os electrões livres que saem do cristal n provocam o aumento da carga positiva descoberta junto da junção. Analogamente, as lacunas que saem do material p originam o aumento da carga negativa descoberta.



### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn inversamente polarizada

■ Assim, a corrente inversa  $I$  implica num aumento da largura da região de depleção e da carga aí armazenada. Isto, por sua vez, provoca o aumento da tensão da região de depleção, i.e., da barreira de potencial  $V_0$ , o que faz diminuir a corrente de difusão  $I_D$ .

■ A corrente de deriva  $I_S$ , como é independente da barreira de potencial, permanece constante. Finalmente, será atingido o equilíbrio quando,

$$I_S - I_D = I$$

■ Em equilíbrio, o aumento da tensão da região de depleção aparecerá como uma tensão exterior entre os terminais do diodo, positiva de n para p (tensão  $V_R$ ).



### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

→ A junção pn inversamente polarizada

■ Considere-se agora a junção pn submetida a uma tensão inversa  $V$ , com  $V$  menor do que a tensão de ruptura  $V_{ZK}$ . No instante em que a tensão  $V$  é aplicada, flui uma corrente inversa no circuito exterior de p para n, que origina o aumento da largura e da carga da região de depleção. A certa altura, o aumento da tensão da barreira atinge o valor da tensão exterior  $V$ , instante em que se estabelece o equilíbrio com a corrente inversa exterior igual a  $I_s - I_D$ . Note-se, contudo, que inicialmente a corrente exterior pode ser muito maior do que  $I_s$ . O objectivo deste transitório inicial é carregar a região de depleção e aumentar a queda de tensão de  $V$  volt.

#### Capacidade de depleção

Vê-se que há uma analogia entre a região de depleção de uma junção pn e um condensador. À medida que varia a tensão da junção, varia correspondentemente a carga armazenada na região de depleção.



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

→ A junção pn inversamente polarizada

### Característica da carga versus tensão externa típica de uma junção pn.

- Pode ser deduzida uma expressão para a carga ( $q_J$ ) armazenada na camada de depleção, calculando a carga armazenada em qualquer um dos lados da junção.
- Usando o lado n,

$$q_J = q_N = qN_D x_n A \longrightarrow A = \text{secção transversa da junção}$$

- Usando a **equação 3.49**,  $x_n$  pode ser representado em termos da largura da camada de depleção. Assim,

$$q_J = q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A W_{dep} \quad (3.51)$$

Da equação 3.50 e substituindo  $V_O$  por  $(V_O + V_R)$

$$\longrightarrow W_{dep} = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{q}\right) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) (V_O + V_R)} \quad (3.52)$$



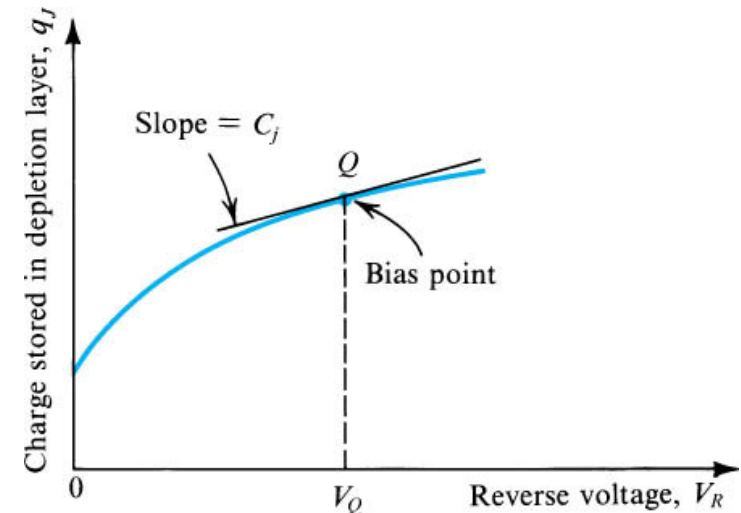
## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

A junção pn inversamente polarizada

- Combinando as equações 3.51 e 3.52, extrai-se a expressão para a relação não-linear  $q_J - V_R$ .
- Pode-se considerar o funcionamento em torno de um ponto quiescente da curva  $q-v$ , tal como o ponto Q e definir a **capacidade de depleção** para pequenos sinais ou incremental  $C_j$  como a inclinação da curva  $q-v$  no ponto de funcionamento, i.e.,

$$C_j = \left. \frac{dq_J}{dV_R} \right|_{V_R=V_Q}$$



Para **determinar  $C_j$** , pode calcular-se a **derivada** ou **tratar a camada de depleção como um condensador plano**, obtendo-se a familiar formula:

$$C_j = \frac{\epsilon_s A}{W_{dep}}$$

Com  $W_{dep}$  dado pela equação 3.52.





## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn inversamente polarizada

■ A expressão resultante pode ser escrita na seguinte forma:

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

$C_{j0}$  é o valor de  $C_j$  obtido para uma **tensão nula aplicada**,

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

Uma formula mais geral para  $C_j$  é:

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

$m$ =constante cujo valor depende do modo como a concentração varia do lado  $p$  para o lado  $n$  da junção. Os valores de  $m$  variam entre 1/3 e 1/2.

■ Resumindo, quando se aplica uma tensão inversa a uma junção pn, ocorre um transitório durante o qual a capacidade de depleção é carregada à nova tensão de polarização. Após cessar o transitório, a corrente inversa em regime permanente é simplesmente igual a  $I_S - I_D$ . Em geral,  $I_D$  é muito pequena quando o diodo está polarizado inversamente, pelo que a corrente inversa é aproximadamente igual a  $I_S$ .



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

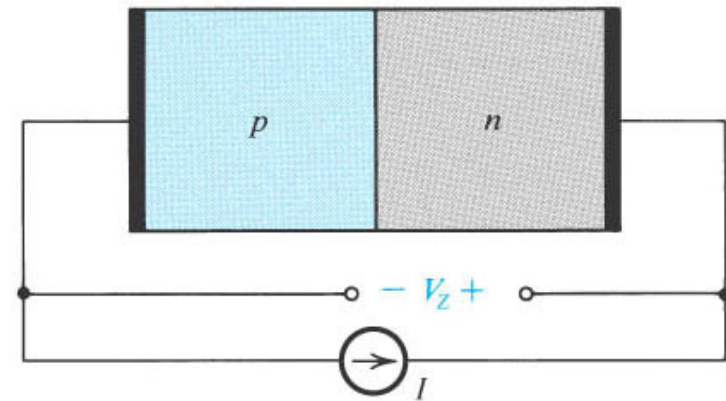
Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn na região de ruptura

■ Admita-se que a junção é excitada por uma fonte de corrente que força uma corrente  $I$  maior do que  $I_s$  no sentido inverso.

■ Esta fonte de corrente fará deslocar, através do circuito exterior, lacunas do cristal p para o cristal n (a corrente no circuito exterior é, obviamente, apenas constituída por electrões) e electrões do cristal n para o cristal p.



■ Esta acção alarga a região de depleção e aumenta a barreira de potencial, o que faz diminuir a corrente de difusão que, a certa altura, praticamente se anula. Isto, contudo, não é suficiente para que se estabeleça um regime permanente, uma vez que  $I$  é maior do que  $I_s$ . Assim, o processo de alargamento da região de depleção continua até que se desenvolve uma tensão na junção suficientemente elevada, para a qual tem lugar um novo mecanismo de fornecimento dos portadores de carga necessários para garantir a corrente  $I$ .



### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção *pn* na região de ruptura

■ Este mecanismo de fornecimento de corrente inversa superior a  $I_s$  pode tomar uma de duas formas, dependendo do material, estrutura e outras características da junção *pn*: efeito de Zener e o efeito de avalanche.

■ Se a junção *pn* entra em rotura com  $V_z < 5 \text{ V}$ , o mecanismo de rotura é usualmente o efeito de Zener. A rotura por avalanche ocorre quando  $V_z$  é maior do que cerca de 7 V. Para junções que entram em rotura entre **5 e 7 V**, o mecanismo pode ser quer o efeito de Zener, quer o de avalanche, ou uma combinação dos dois.

■ O efeito de Zener ocorre quando o campo eléctrico na região de depleção atinge o valor que permite quebrar ligações covalentes (cerca de 106 V/cm, para o silício), gerando, desta forma, pares electrão-lacuna. Os electrões assim gerados são varridos pelo campo eléctrico para o lado *n*, e as lacunas para o lado *p*. Consequentemente, **estes electrões e lacunas constituem uma corrente inversa através da junção que contribui para a corrente exterior  $I$ .**



### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção *pn* na região de ruptura

- Uma vez iniciado o **efeito de Zener**, pode gerar-se um grande número de portadores, com um aumento desprezável da **tensão da junção**. Assim, a **corrente inversa na região de rotura é determinada pelo circuito exterior**, enquanto a tensão inversa aos terminais do diodo permanece próxima do valor da tensão de rotura  $V_Z$ .
- O **efeito de avalanche** ocorre quando os portadores minoritários que atravessam a barreira sob a influência do campo eléctrico ganham energia cinética suficiente para quebrar ligações covalentes nos átomos com os quais colidem. Os portadores libertados por este processo são acelerados e podem também ganhar suficiente energia para, por sua vez, libertarem mais portadores nas colisões subsequentes.
- Este processo tem o carácter de uma avalanche, gerando assim portadores em número suficiente para viabilizarem qualquer valor da corrente inversa, com uma variação desprezável da queda de tensão na junção.
- Como já foi referido atrás, a **rotura de uma junção *pn* não é um processo destrutivo**, desde que a **potência máxima de dissipação não seja excedida**. Este valor, por sua vez, **implica a existência de um valor máximo da corrente inversa**.



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

### Conceitos básicos sobre semicondutores



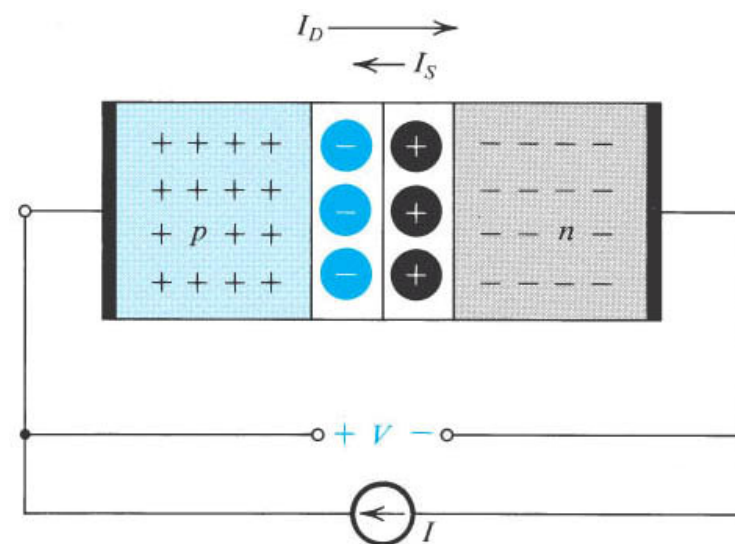
### A junção pn com polarização directa

■ Os electrões que constituem a corrente  $I$  no circuito exterior, deslocam-se do lado p para o lado n.

■ Provocam a extracção de electrões da região p e de lacunas da região n (ou injeção de electrões, se quisermos).

■ Esta acção origina um gradiente de concentração de portadores maioritários em ambos os lados, logo uma **corrente de difusão**, que se traduz num afluxo de lacunas à região de depleção do lado p, e de electrões do lado n.

■ Este afluxo de portadores maioritários vai neutralizar parte dos iões da região de depleção, diminuindo a quantidade de carga aí armazenada e, consequentemente, **diminuindo a sua largura**, bem como a barreira de potencial.





### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn com polarização directa

■ A **redução da barreira de potencial** permite que mais lacunas atravessem a barreira do lado p para o lado n, e electrões do lado n para o lado p. Assim, a corrente de difusão  $I_D$  aumenta até se atingir o equilíbrio com  $I_D - I_S = I$ .

■ Examine-se agora mais de perto o fluxo de corrente através da junção directamente polarizada, em regime permanente. A **barreira de potencial é menor do que  $V_0$  de uma quantidade  $V$  que aparece aos terminais do diodo como uma queda de tensão directa** (i.e., com o ânodo positivo relativamente ao cátodo de  $V$  volt). Devido à diminuição da barreira de potencial ou, alternativamente, devido à queda de tensão directa  $V$ , **são injectadas lacunas através da junção no lado n e são injectados electrões no lado p**.

■ **As lacunas injectadas na região n**, fazem com que a concentração de portadores minoritários nessa região,  $p_n$ , **exceda o valor de equilíbrio térmico,  $p_{n0}$** . A concentração em excesso  $p_n - p_{n0}$  será máxima junto da fronteira da região de depleção e decrescerá (exponencialmente) com a distância, tendendo para zero.



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

### Conceitos básicos sobre semicondutores

### A junção pn com polarização directa

#### Distribuição de portadores minoritários numa junção pn com polarização directa.

● Em regime permanente, o perfil da concentração de portadores minoritários em excesso permanece constante e é, de facto, esta distribuição que justifica o aumento da corrente de difusão  $I_D$  relativamente ao valor  $I_S$ . Na verdade, a distribuição mostrada origina que as lacunas minoritárias injectadas se difundam a partir da junção ao longo da região n e **desaparecendo gradualmente por recombinação**. Para manter o equilíbrio, é necessário que o circuito exterior forneça uma quantidade igual de electrões, i.e., repondo a concentração global de electrões no lado n.

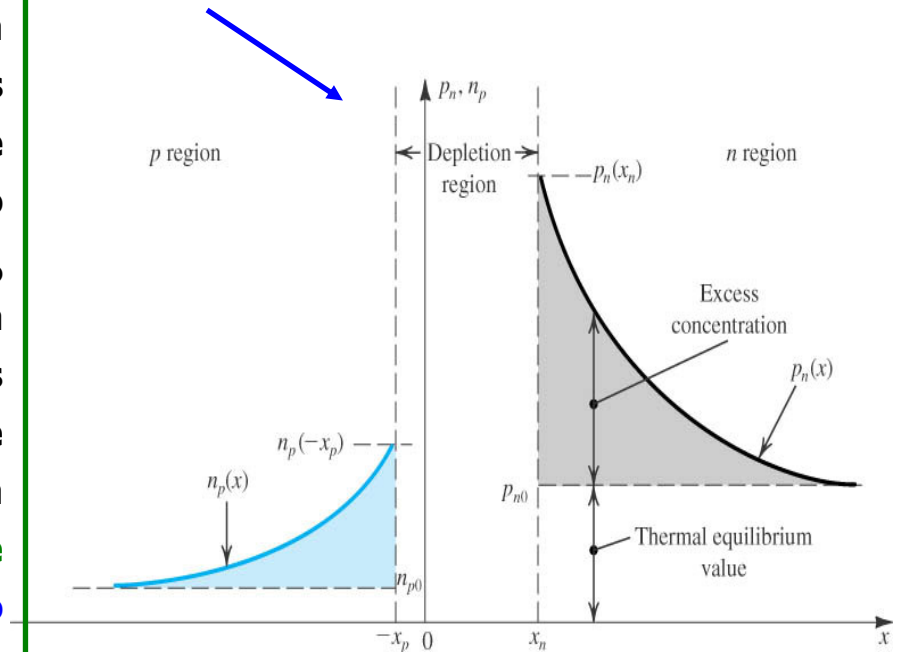


Fig. 3.50



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores



A junção pn com polarização directa

■ Considerações semelhantes podem fazer-se para os electrões minoritários no lado p. A corrente de difusão  $I_D$  é, evidentemente, a soma das componentes de lacunas e de electrões.

### Relação corrente-tensão

■ Relação entre a concentração de **portadores minoritários** na vizinhança da região de depleção e a tensão de polarização directa  $V$ .

Lei da junção



$$p_n(x_n) = p_{no} e^{V/V_T}$$

(3.58)

■ A distribuição de concentração de lacunas em excesso na região n, é uma função exponencialmente decrescente da distância:

$$p_n(x) = p_{no} + [p_n(x_n) - p_{no}] e^{-(x-x_n)/L_p}$$

(3.59)





## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

A junção pn com polarização directa

$$p_n(x) = p_{no} + [p_n(x_n) - p_{no}] e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$L_p$  = **constante**: determina a inclinação do decaimento exponencial.



Designada por **comprimento de difusão** das lacunas em silício tipo n

■ Quanto menor for  $L_p$ , mais rápida é a recombinação das lacunas com os electrões maioritários, resultando num decaimento acentuado da concentração de portadores minoritários.

■  $L_p$  é relacionado com um outro parâmetro do semiconductor designado por **tempo de vida do portador minoritário em excesso**  $\tau_p$ .

$\tau_p$  = tempo médio necessário para que uma lacuna injectada se recombine com um electrão (maioritário).

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

(3.60)

Valores típicos para  $L_p$  :  $1 \mu m - 100 \mu m$

Valores típicos para  $\tau_p$  :  $1 ns - 10 \mu s$



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

### Conceitos básicos sobre semicondutores

### A junção pn com polarização directa

A **difusão das lacunas na região n**, dá origem a uma corrente (lacunas), cuja densidade pode ser calculada usando equações 3.37 e 3.59.

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{no} (e^{V/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}$$

O valor mais elevado de  $J_p$  verifica-se para  $x=x_n$

- Decaimento devido à **recombinação com os electrões**.
- **Em regime permanente, os portadores maioritários terão de ser re-preenchidos.**
- Os electrões são fornecidos a partir do circuito externo para a região n, a uma taxa que conserve a corrente no valor constante verificado para  $x=x_n$ .

Assim,

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{no} (e^{V/V_T} - 1)$$

(3.61)



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

A junção pn com polarização directa

■ Para os electrões injectados através da junção na região p, a densidade de corrente de electrões é:

$$J_n = q \frac{D_n}{L_n} n_{po} (e^{V/V_T} - 1) \quad (3.62)$$

$L_n$  é o **comprimento de difusão** dos electrões na região p.

■ **Corrente total** : soma das densidades de corrente  $J_p$  e  $J_n$ , multiplicada pela secção transversa da junção.

$$I = A \left( \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \right) (e^{V/V_T} - 1) \quad \text{ou} \quad I = A q n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) (e^{V/V_T} - 1) \quad (3.63)$$

com

$$p_{no} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

e

$$n_{po} = \frac{n_i^2}{N_A}$$



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

A junção pn com polarização directa

■ A equação (3.63) traduz a **equação do díodo** em que a corrente de saturação  $I_S$  é dada por

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

- $I_S$  é directamente proporcional à área da junção A.
- $I_S$  é directamente proporcional a  $n_i^2$  o qual é função da temperatura.

### ● Capacidade de difusão

- Em regime permanente, uma certa quantidade de **portadores minoritários** é armazenada em cada uma das regiões p e n.
- Se a tensão aos terminais variar, esta carga vai variar até se atingir novo regime permanente.



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

A junção pn com polarização directa

■ Esta carga armazenada, dá origem a um novo efeito capacitivo, diferente do verificado devido à carga armazenada na região de depleção.

■ A **carga positiva (lacunas) em excesso na região n** pode ser calculada a partir da área sombreada (exponencial) da figura 3.50.

$$Q_p = A q \times (\text{área sombreada da exponencial } p_n(x)).$$

$$= A q \times [p_n(x_n) - p_{no}] L_p$$

■ Usando as equações 3.58 e 3.61, permite representar

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

onde  $I_p = AJ_p$ , é a corrente de lacunas através da junção.

Usando a equação 3.60, pode-se substituir  $L_p^2/D_p = \tau_p$  e obter

$$Q_p = \tau_p I_p \quad (3.65)$$



## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

A junção pn com polarização directa

A **carga negativa (electrões)** armazenada na região p, é representada de modo semelhante:

$$Q_n = \tau_n I_n \quad (3.66)$$

$\tau_n$  é o tempo de vida do electrão na região p.

### Carga total

$$Q = \tau_p I_p + \tau_n I_n \quad \text{ou} \quad Q = \tau_T I \quad \text{Com} \quad I = I_p + I_n$$

$\tau_T$  é designado por tempo de propagação médio do díodo.

Se  $N_A \gg N_D \longrightarrow I_p \gg I_n, I \approx I_p, Q_p \gg Q_n, Q \approx Q_p$  e  $\tau_T \approx \tau_p$

■ Para pequenas variações em torno do ponto de operação, pode ser definida a capacidade de difusão para pequenos sinais ( $C_d$ ).

$$C_d = \frac{dQ}{dV} \longrightarrow \text{A qual pode ser representada por} \longrightarrow C_d = \left( \frac{\tau_T}{V_T} \right) I$$

Quantity	Relationship	Values of Constants and Parameters (for Intrinsic Si at $T = 300$ K)
Carrier concentration in intrinsic silicon ( $/\text{cm}^3$ )	$n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$	$B = 5.4 \times 10^{31} / (\text{K}^3 \text{cm}^6)$ $E_G = 1.12 \text{ eV}$ $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ $n_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$
Diffusion current density ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$ $J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$	$q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$ $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$ $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$
Drift current density ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	$J_{\text{drift}} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$	$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
Resistivity ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$	$\mu_p$ and $\mu_n$ decrease with the increase in doping concentration
Relationship between mobility and diffusivity	$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$	$V_T = kT/q$ $\approx 25.8 \text{ mV}$
Carrier concentration in $n$ -type silicon ( $/\text{cm}^3$ )	$n_{n0} \approx N_D$ $p_{n0} = n_i^2/N_D$	

Quantity	Relationship	Values of Constants and Parameters (for Intrinsic Si at $T = 300$ K)
Carrier concentration in $p$ -type silicon ( $/\text{cm}^3$ )	$p_{p0} = N_A$ $n_{p0} = n_i^2 / N_A$	
Junction built-in voltage (V)	$V_0 = V_T \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$	
Width of depletion region (cm)	$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$ $W_{dep} = x_n + x_p$ $= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V_R)}$	$\epsilon_s = 11.7 \epsilon_0$ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$
Charge stored in depletion layer (coulomb)	$q_J = q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A W_{dep}$	
Depletion capacitance (F)	$C_J = \frac{\epsilon_s A}{W_{dep}}, C_{J0} = \frac{\epsilon_s A}{W_{dep} _{V_R=0}}$ $C_J = C_{J0} \left( 1 + \frac{V_R}{V_0} \right)^m$ $C_J \approx 2C_{J0}$ (for forward bias)	$m = \frac{1}{3} \text{ to } \frac{1}{2}$
Forward current (A)	$I = I_p + I_n$ $I_p = Aq n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} (e^{V/V_T} - 1)$ $I_n = Aq n_i^2 \frac{D_n}{L_n N_A} (e^{V/V_T} - 1)$	
Saturation current (A)	$I_S = Aq n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$	
Minority-carrier lifetime (s)	$\tau_p = L_p^2 / D_p \quad \tau_n = L_n^2 / D_n$	$L_p, L_n = 1 \mu\text{m to } 100 \mu\text{m}$ $\tau_p, \tau_n = 1 \text{ ns to } 10^4 \text{ ns}$
Minority-carrier charge storage (coulomb)	$Q_p = \tau_p I_p \quad Q_n = \tau_n I_n$ $Q = Q_p + Q_n = \tau_T I$	
Diffusion capacitance (F)	$C_d = \left( \frac{\tau_T}{V_T} \right) I$	





## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO FÍSICO DOS DÍODOS

Conceitos básicos sobre semicondutores

A junção pn com polarização directa

### Exercício 3.34

Um diodo possui uma concentração  $N_A=10^{17}/\text{cm}^3$ ,  $N_D=10^{16}/\text{cm}^3$ ,  $n_i=1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ,  $L_p=5 \mu\text{m}$ ,  $L_n=10 \mu\text{m}$ ,  $A=2500 \mu\text{m}^2$ ,  $D_p$  (na região n)  $=10 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ; e  $D_n$  (na região p)  $=18 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ . O diodo é directamente polarizado e conduz uma corrente  $I=0.1 \text{ mA}$ .

Determine:

- $I_s$ .
- A tensão de polarização directa.
- As componentes da corrente  $I$ , devido à injeção de lacunas e à injeção de electrões através da junção.
- $\tau_p$  e  $\tau_n$ .
- A carga (lacunas) na região n  $Q_p$ ; a carga (electrões) na região p  $Q_n$ ; a carga total minoritária armazenada  $Q$  e o tempo de propagação  $\tau_T$ .
- A capacidade de difusão.

**Resposta:** (a)  $2 \times 10^{-15} \text{ A}$ ; (b)  $0.616 \text{ V}$ ; (c)  $91.7 \mu\text{A}$ ,  $8.3 \mu\text{A}$ ; (d)  $25 \text{ ns}$ ,  $55.6 \text{ ns}$ ; (e)  $2.29 \text{ pC}$ ,  $0.46 \text{ pC}$ ,  $2.75 \text{ pC}$ ,  $27.5 \text{ ns}$ ; (f)  $110 \text{ pF}$ .