

## CAPITULO 3

### Aula 16 e 17

# O Diodo e a junção pn na condição de polarização direta. A capacitância de difusão

Prof. Sedra  
PSI/UFPEF

362  
362

## PSI 2223 – Introdução à Eletrônica Programação para a Primeira Prova

11 <sup>a</sup> 05/04	Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro.	Sedra, Cap. 3 p. 109-111
12 <sup>a</sup> 08/04	Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).	Sedra, Cap. 3 p. 112-115
13 <sup>a</sup> 12/04	Circuitos limitadores, circuitos grameadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28.	Sedra, Cap. 3 p. 115-118
14 <sup>a</sup> 15/04	Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 117-121
15 <sup>a</sup> 26/04	Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 121-126
16 <sup>a</sup> 29/04	Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 127-128
17 <sup>a</sup> 03/05	Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção, a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 124-125 e p. 128-129
18 <sup>a</sup> 06/05	Aula de Exercícios	

2<sup>a</sup>. Semana de Provas (09/05 a 13/05/2016)

Data: 11/05/2016 (quarta feira) – Horário: 13:10h às 15:10h

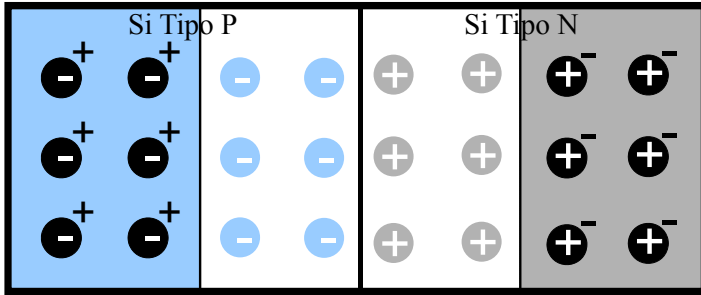
Prof. Sedra  
PSI/UFPEF

363

## JUNÇÃO PN atingiu o equilíbrio térmico (Modelo de cargas)

Se nenhuma polarização externa for aplicada, as correntes de difusão e de deriva tendem a se anular mutuamente, de forma que em equilíbrio:  $I_T = I_{dif} + I_{der} = 0$  (ou  $I_D = I_S$ )

$$I_{T_{der}} = I_S = I_{P_{der}} + I_{n_{der}} \quad \xrightarrow{\quad} \quad I_{T_{dif}} = I_D = I_{P_{dif}} + I_{n_{dif}}$$



$$\left| I_{T_{dif}} \right| = \left| I_{T_{der}} \right|$$

ou  $I_D = I_S$

Região de Depleção

$\vec{E}_i$ : campo elétrico interno de equilíbrio

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

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

Prof. Sedra  
PS/UPSP

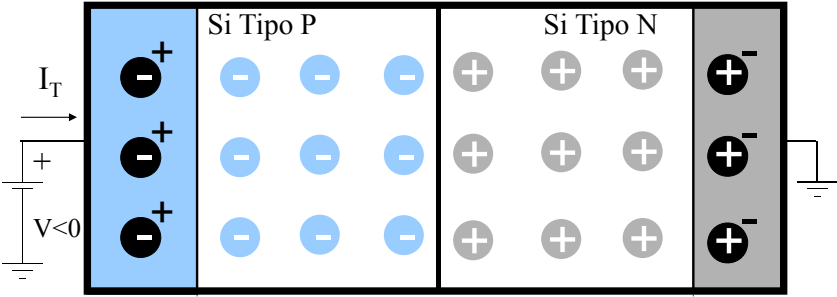
Microeletrônica – Quinta Edição – Sedra/Smith

## JUNÇÃO PN polarizada reversamente (Modelo de cargas)

Se for aplicada uma polarização negativa do anodo com relação ao catodo (polarização reversa), aumentará o campo elétrico resultante na junção ( $E_r = E_i + E_{ext}$ ), o que dificultará a passagem dos portadores majoritários por difusão exponencialmente. Neste caso aumentam-se as componentes de deriva (minoritários) devido ao aumento do campo elétrico na região de depleção, resultando em

$$I_T = I_{dif} + I_{der} < 0 \text{ (ou } I_D < I_S)$$

$$I_{T_{der}} = I_S = I_{P_{der}} + I_{n_{der}} \quad \xrightarrow{\quad} \quad I_{T_{dif}} = I_D = I_{P_{dif}} + I_{n_{dif}}$$



Região de Depleção

$$\vec{E}_r > \vec{E}_i$$

Prof. Sedra  
PS/UPSP

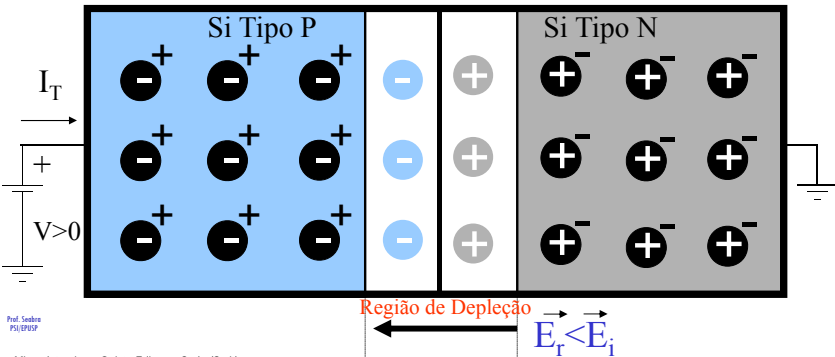
Microeletrônica – Quinta Edição – Sedra/Smith

367  
367

## JUNÇÃO PN polarizada diretamente (Modelo de cargas)

Se for aplicada uma polarização positiva do anodo com relação ao catodo (polarização direta), diminuirá o campo elétrico resultante na junção ( $E_r = E_i - E_{ext}$ ), o que facilitará a passagem dos portadores majoritários por difusão exponencialmente. Diminuem-se as componentes de deriva (minoritários) pela redução do campo elétrico, resultando em:  $I_T = I_{Tdif} + I_{Tder} > 0$  (ou  $I_D > I_S$ )

$$I_{Tder} = I_S = I_{Pder} + I_{Nder} \quad \leftarrow \dots \quad \rightarrow I_{Tdif} = I_D = I_{Pdif} + I_{Ndif}$$

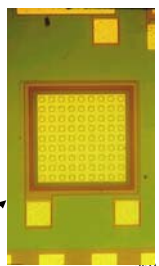
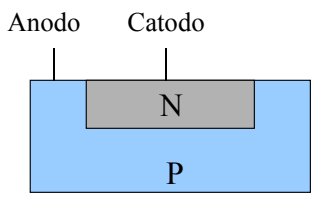
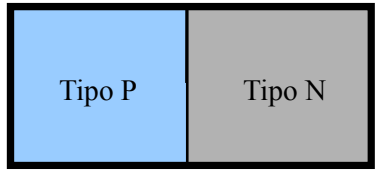
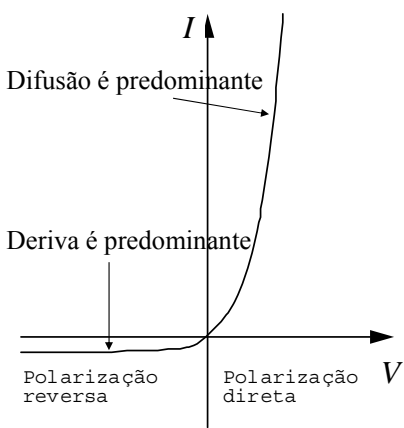


Prof. Sédra PS/EPUSP

368

Microeletrônica - Quinta Edição - Sedra/Smith

## Diodo Semicondutor (Junção PN)



$$I = I_S (e^{V/nV_T} - 1)$$

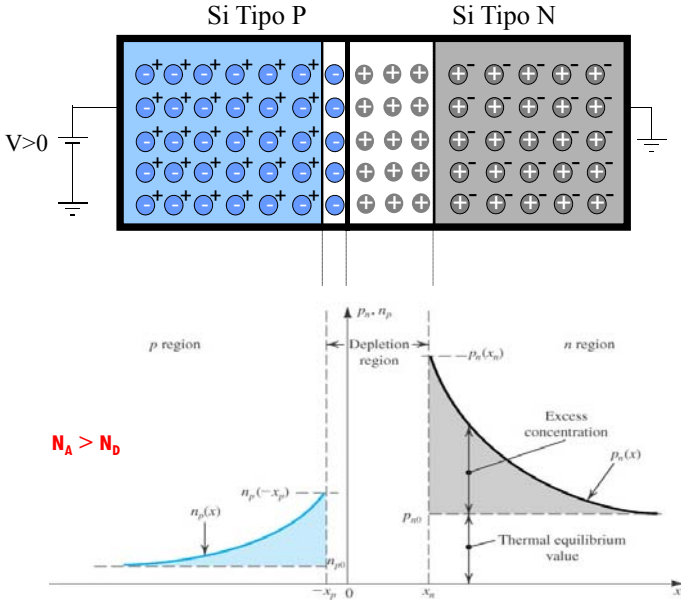
Prof. Sédra PS/EPUSP

369

Microeletrônica - Quinta Edição - Sedra/Smith

Foto de um diodo construído na EPUSP

# Distribuição de Portadores Minoritários na Junção PN Diretamente Polarizada



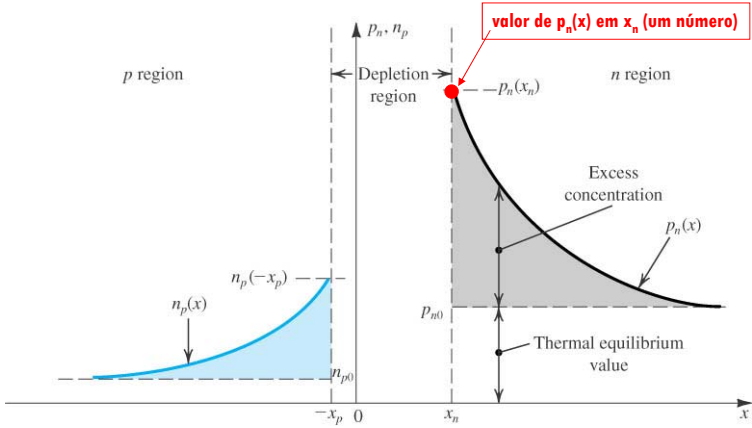
Prof. Sédra PS/UFPEF

Microeletrônica – Quinta Edição – Sedra/Smith

370

370

## O Diodo Polarizado Diretamente



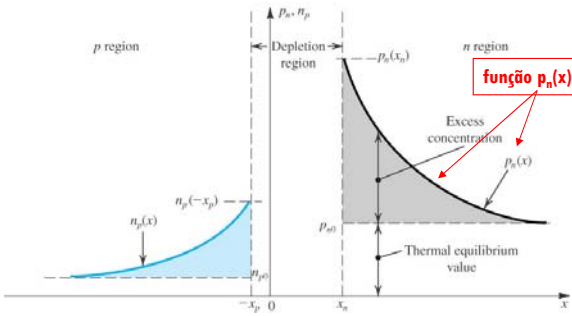
$p_n(x_n)$ , da física de semicondutores, é igual a:

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{V/V_T}$$

Prof. Sédra PS/UFPEF

371

# O Diodo Polarizado Diretamente



**$p_n(x)$ ?**

- é uma queda exponencial com constante  $\tau$
- valor inicial =  $p_n(x_n)$
- valor final =  $p_{n0}$

**De Cálculo:**  $p_n(x) = p_{nFINAL} + [p_{nINICIAL} - p_{nFINAL}]e^{-(x-x_n)/\tau}$

$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}]e^{-(x-x_n)/L_p}$$

← comprimento de difusão

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

← Tempo de vida (médio) dos portadores minoritários (no caso lacunas)

# O Diodo Polarizado Diretamente

$$J_p = D_p \frac{\partial p_n(x)}{\partial x}$$

$$= D_p \frac{\partial \{ p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}]e^{-(x-x_n)/L_p} \}}{\partial x}$$

$$= q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}$$

válido do lado n, fora da região de depleção ( $x \geq x_n$ )

**Em  $x = x_n$**   $J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1)$

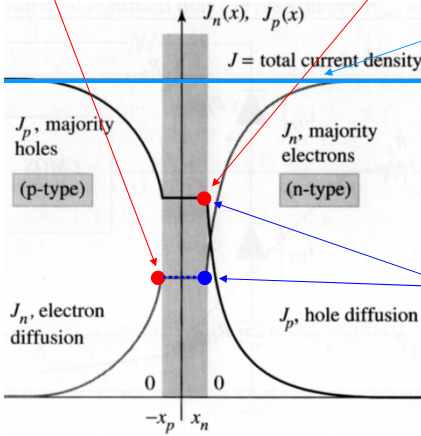
## O Diodo Polarizado Diretamente

Em  $x = -x_p$

$$J_n = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (e^{V/V_T} - 1)$$

...Em  $x = x_n$

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1)$$



$$J_{TOTAL} = J_p + J_n \text{ (em qualquer ponto)}$$

Fora da região de depleção o campo elétrico é praticamente nulo, portanto tanto  $J_p$  como  $J_n$  são devidos apenas à parcela de difusão

Em  $x = x_n$  podemos somar o valor  $J_p$  e  $J_n$  que determinamos pois  $J_n$  calculado em  $-x_p$  é o mesmo em  $x_n$  pois na região de depleção não “perdemos” cargas

## O Diodo Polarizado Diretamente

$$\begin{aligned} \text{Logo } J_{TOTAL} &= J_p^{DIF} + J_n^{DIF} \\ &= q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (e^{V/V_T} - 1) \\ &= \left\{ q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right\} (e^{V/V_T} - 1) \end{aligned}$$

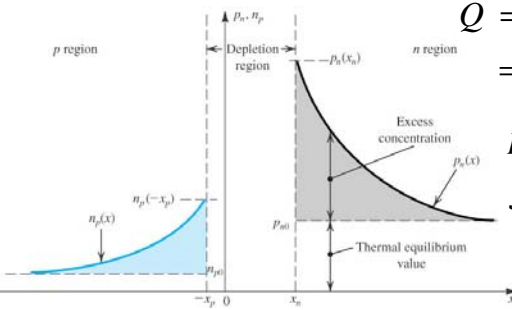
$$\text{Logo } I_{TOTAL} = A \left\{ q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right\} (e^{V/V_T} - 1)$$

$$\text{Logo } I_{TOTAL} = I_S (e^{V/V_T} - 1)$$

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

# O Diodo Polarizado Diretamente

## A Capacitância de Difusão



$$Q = Aq \times \text{área embaixo da exponencial } pn(x)$$

$$= Aq \times [p_n(x_n) - p_{n0}]L_p$$

$$p_n(x_n) = p_{n0}e^{V/V_T}$$

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0}(e^{V/V_T} - 1)$$

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

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

$$Q_p = \tau_p I_p$$

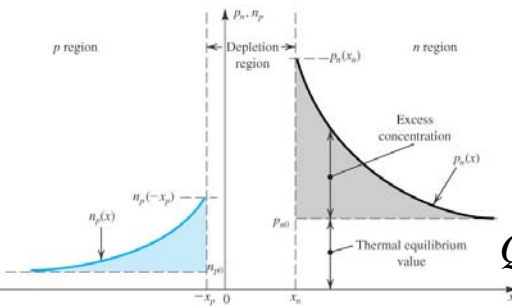
$$Q_n = \tau_n I_n$$

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

$$Q = \tau_T I_D$$

# O Diodo Polarizado Diretamente

## A Capacitância de Difusão



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

$$Q_p = \tau_p I_p$$

$$Q_n = \tau_n I_n$$

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

$$C_d = \frac{dQ}{dV}$$

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

# O Modelo para o Diodo

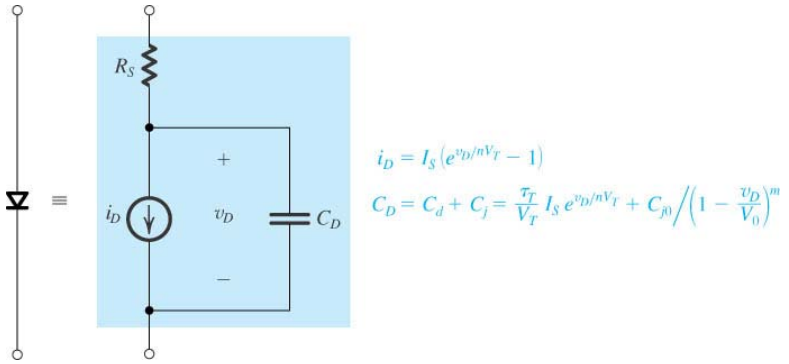
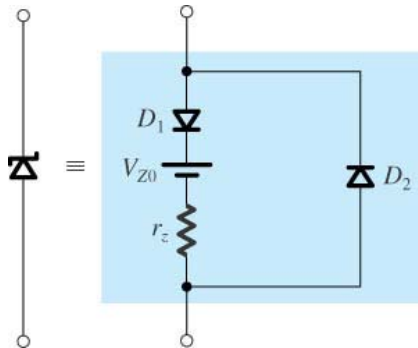


Figura 3.51 The SPICE diode model.

# E para o Zener?





### Exercício 3.34 (pg 128)

3.34 Um diodo tem  $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$ ,  $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$ ,  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3$ ,

$L_p = 5 \mu\text{m}$ ,  $L_n = 10 \mu\text{m}$ ,  $A = 2500 \mu\text{m}^2$ ,  $D_p$  (na região  $n$ ) =  $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , e  $D_n$  (na região  $p$ ) =  $18 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

O diodo está diretamente polarizado e conduzindo uma corrente  $I = 0,1 \text{ mA}$ .

Calcule:

- $I_S$
- A tensão de polarização direta  $V$
- A componente da corrente devida à injeção de lacunas e aquela devida à injeção de elétrons através da junção
- $\tau_p$  e  $\tau_n$
- a carga  $Q_p$  do excesso de lacunas na região  $n$  e a carga  $Q_n$  do excesso de elétrons na região  $p$ ; e a carga total  $Q$  de portadores minoritários armazenada, e o tempo de trânsito  $\tau_T$
- A capacitância de difusão.

Resp. (a)  $2 \cdot 10^{-15} \text{ A}$ ; (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)  $2,29 \text{ pC}$ ,  $0,46 \text{ pC}$ ,  $2,75 \text{ pC}$ ,  $27,5 \text{ pC}$ ; (f)  $110 \text{ pF}$