



CAPITULO 3

## Aula 16

# O Diodo e a junção pn na condição de polarização direta e a dedução da equação da corrente em um diodo

# Eletrônica I – PSI3321

## Programação para a Segunda Prova

10 <sup>a</sup>	07/04	Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro.	Sedra, Cap. 3 p. 109-111	
12 <sup>a</sup>	02/05	Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).	Sedra, Cap. 3 p. 112-115	Teste 06 9h20-9h35
13 <sup>a</sup>	05/05	Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28.	Sedra, Cap. 3 p. 115-118	
14 <sup>a</sup>	09/05	Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 117-121	Teste 07 9h20-9h35
15 <sup>a</sup>	12/05	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>	16/05	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	Teste 08 9h20-9h35
17 <sup>a</sup>	19/05	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	
18 <sup>a</sup>	23/05	A junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 128-129	Teste 09 9h20-9h35
19 <sup>a</sup>	26/05	Estruturas e símbolos dos transistores bipolares de junção, definição dos modos de operação (corte, ativo, saturação) do TBJ, operação do transistor npn no modo ativo (polarização e distribuição de portadores minoritários).	Sedra, Cap. 5 p. 235-238	
20 <sup>a</sup>	30/05	Equações das correntes no transistor (definição do ganho de corrente em emissor comum - $\beta$ - e do ganho de corrente em base comum - $\alpha$ ), modelos de circuitos equivalentes para grandes sinais do transistor npn operando no modo ativo, exercícios.	Sedra, Cap. 5 p. 239-243.	Teste 10 9h20-9h35

# Eletrônica I – PSI3321

## Programação para a Segunda Prova (cont.)

21 <sup>a</sup>	02/06	Análise cc de circuitos com transistores, exercícios selecionados: 5.1, 5.4, 5.10.	Sedra, Cap. 5 p. 246 + 264-269	
22 <sup>a</sup>	06/06	O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância)	Sedra, Cap. 5, p. 263-264; p. 275-276.	Teste 11 9h20-9h35
23 <sup>a</sup>	09/06	A corrente de base e a resistência de entrada da base, a resistência de entrada do emissor. Ganho de tensão, Exemplo 5.38, modelos equivalentes (modelos $\pi$ -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 276-279	
24 <sup>a</sup>	13/06	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early. O amplificador emissor comum (EC) - Exercício 5.43	Sedra, Cap. 5 p. 290-293	Teste 12 9h20-9h35
25 <sup>a</sup>	20/06	O amplificador emissor comum com resistência de emissor	Sedra, Cap. 5 p.293-295	Teste 13 9h20-9h35
26 <sup>a</sup>	23/06	O amplificador base comum (BC)	Sedra, Cap. 5 p. 296-297	
27 <sup>a</sup>	27/06	O amplificador coletor comum (CC)	Sedra, Cap. 5 p. 297-302	Teste 14 9h20-9h35
28 <sup>a</sup>	30/06	Aula de Exercícios		
2 <sup>a</sup> . Semana de Provas (01/07 a 07/07/2017)				
Data: xx/xx/2017 (xxxx-feira) – Horário: xx:xxhs				

# 16<sup>a</sup> Aula:

## A junção pn Diretamente polarizada

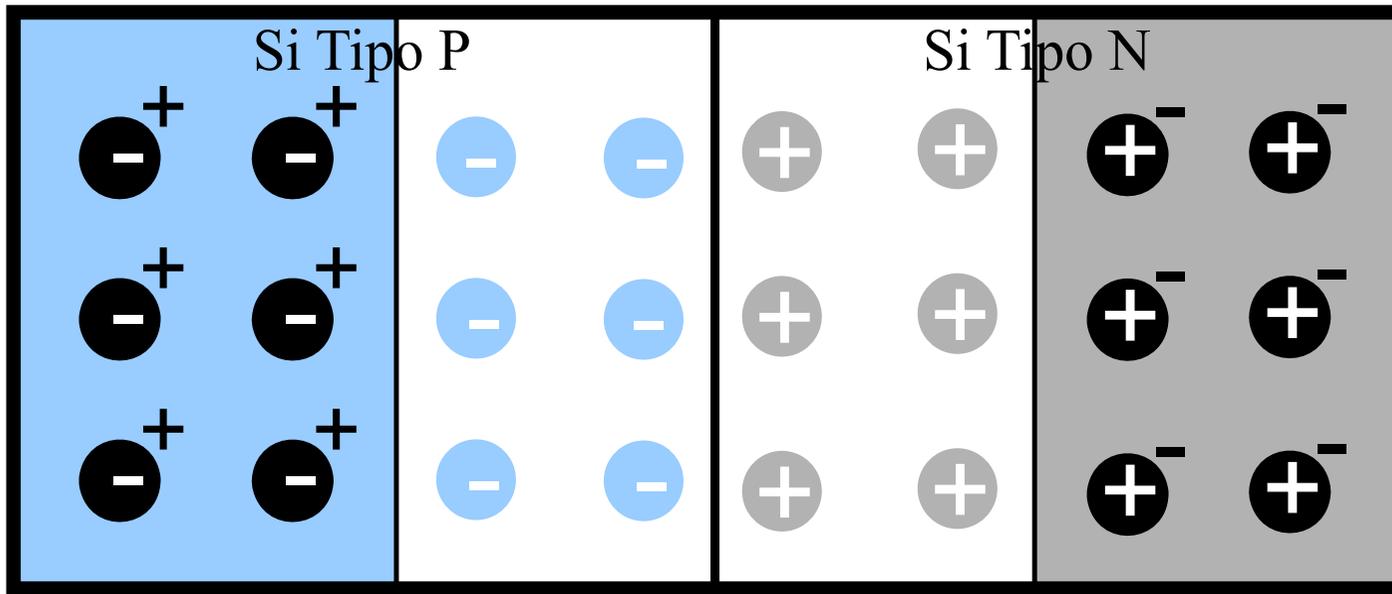
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Explicar o que ocorre quando a junção pn é diretamente polarizada
- Explicar a distribuição de portadores minoritários e o seu perfil em ambos os lados da junção quando a junção pn é diretamente polarizada
- Explicar o que é silício intrínseco e silício dopado (tipo  $n$  e tipo  $p$ )
- Deduzir a expressão da corrente no diodo em função das grandezas fundamentais da junção, como concentração de portadores, largura da região de depleção, etc.

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

$$I_{T_{\text{der}}} = I_S = I_{p_{\text{der}}} + I_{n_{\text{der}}} \quad \longleftrightarrow \quad I_{T_{\text{dif}}} = I_D = I_{p_{\text{dif}}} + I_{n_{\text{dif}}}$$



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

ou  $I_D = I_S$

Região de Depleção  $\rightarrow$   $E_i$ : campo elétrico interno de equilíbrio

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

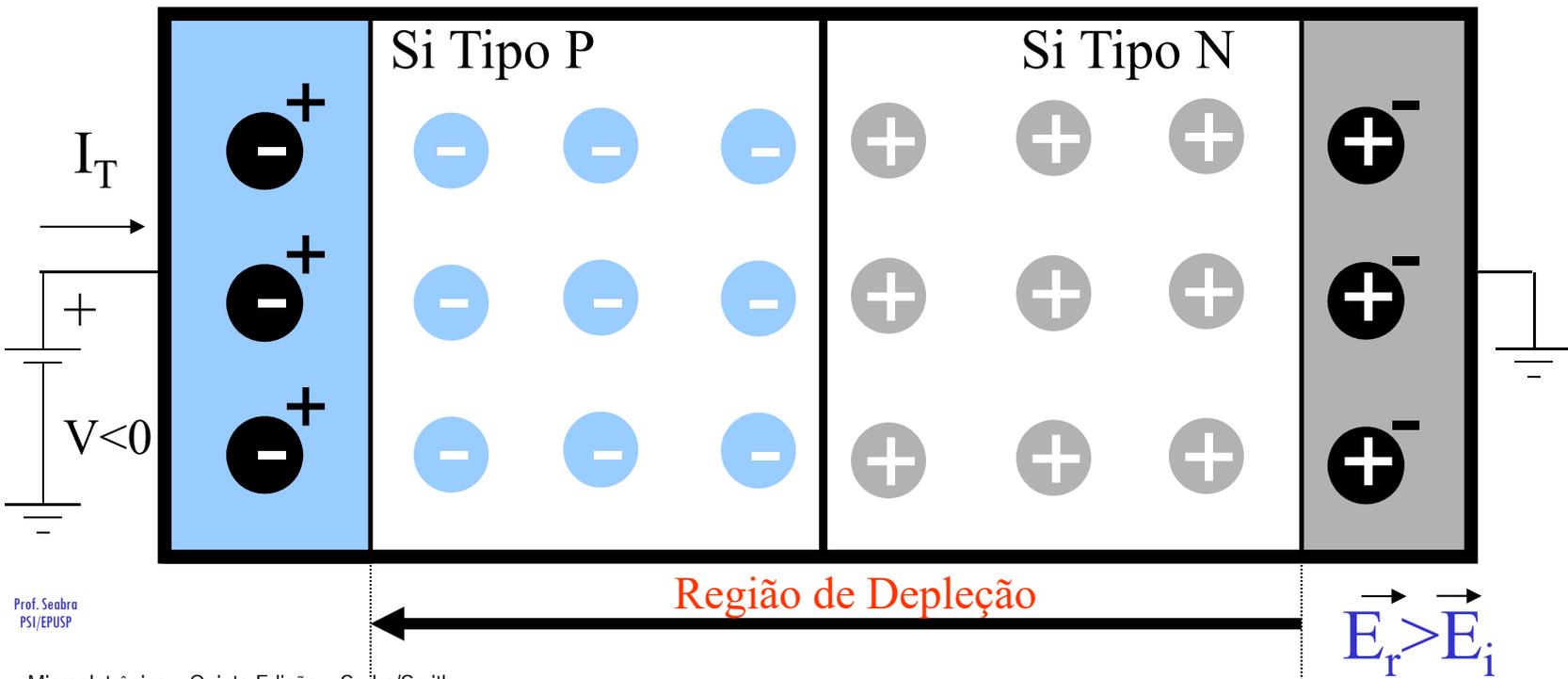
$$W_{\text{dep}} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0}$$

# 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

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

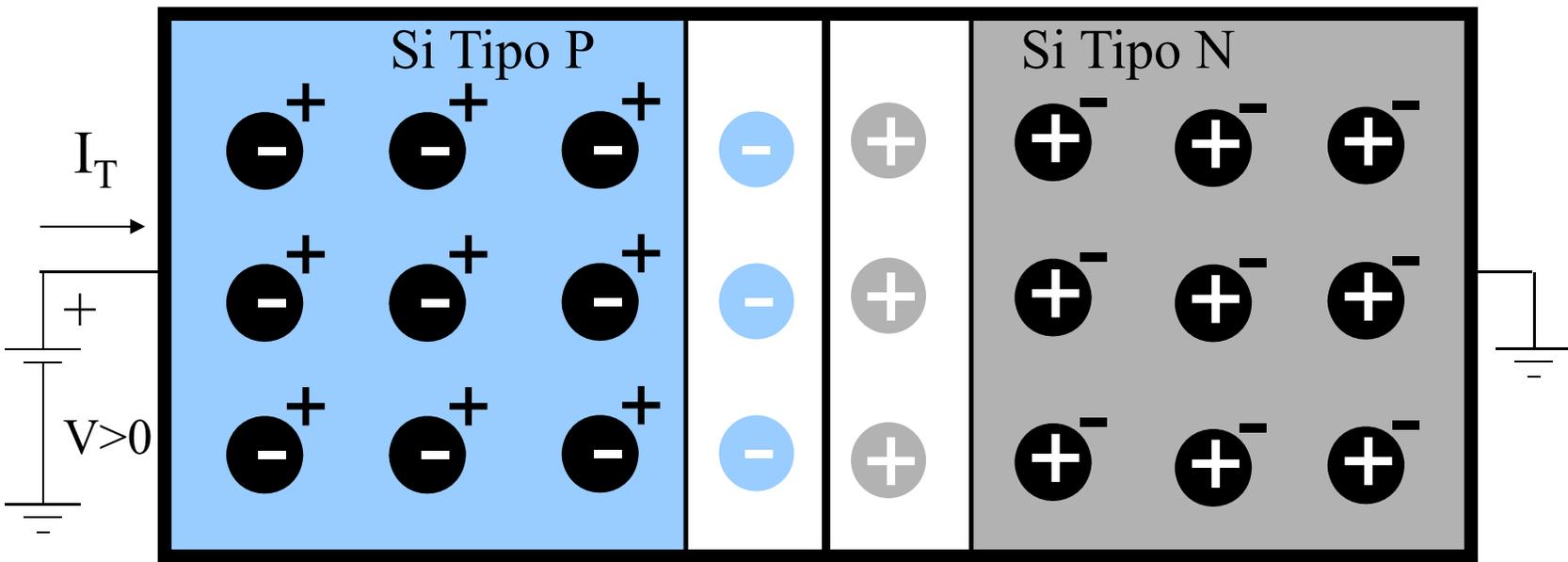
$$I_{T\ der} = I_S = I_{p\ der} + I_{n\ der} \quad \leftarrow \dots \rightarrow \quad I_{T\ dif} = I_D = I_{p\ dif} + I_{n\ dif}$$



# JUNÇÃO PN polarizada diretamente (Modelo de cargas)

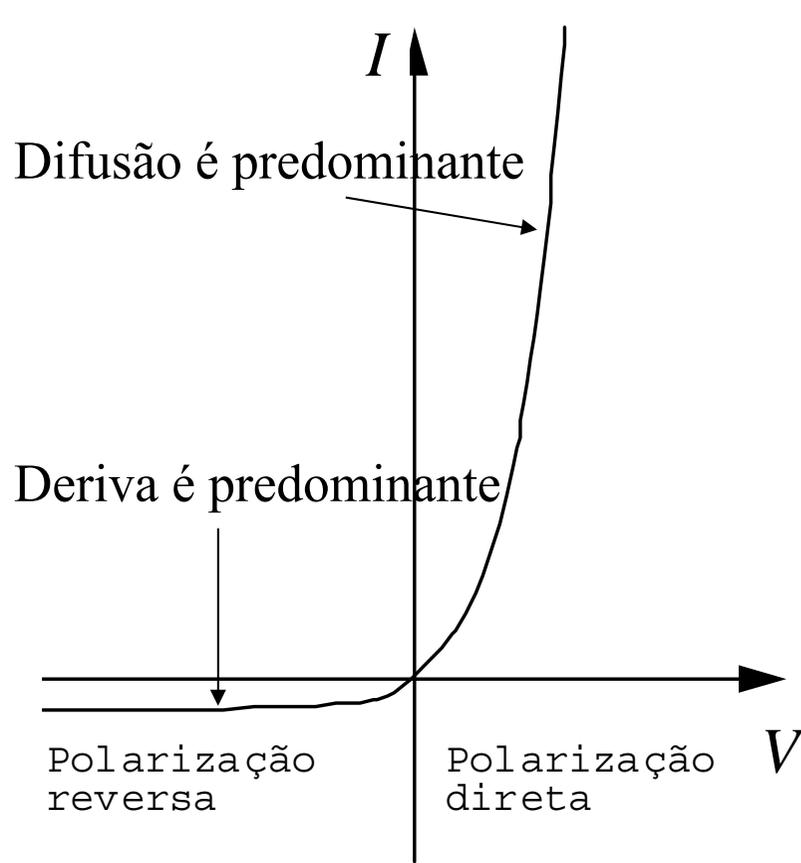
Se for aplicada uma polarização positiva do anodo com relação ao catodo (polarização direta), diminuirá o campo elétrico resultante na junção ( $E_r = E_i - E_{ext}$ ), o que facilitará a passagem dos portadores majoritários por difusão exponencialmente. Diminuem-se as componentes de deriva (minoritários)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

$$I_{T der} = I_S = I_{p der} + I_{n der} \quad \leftarrow \dots \rightarrow \quad I_{T dif} = I_D = I_{p dif} + I_{n dif}$$



Região de Depleção  
 $E_r < E_i$

# Diodo Semicondutor (Junção PN)



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

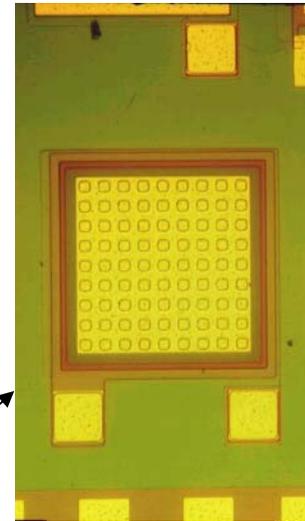
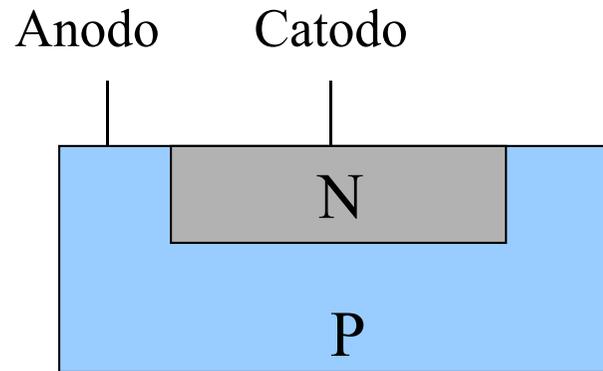
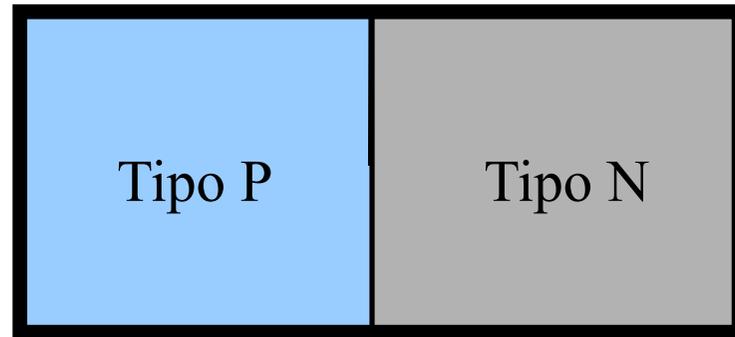
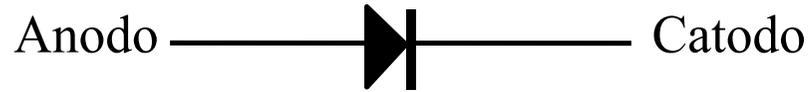
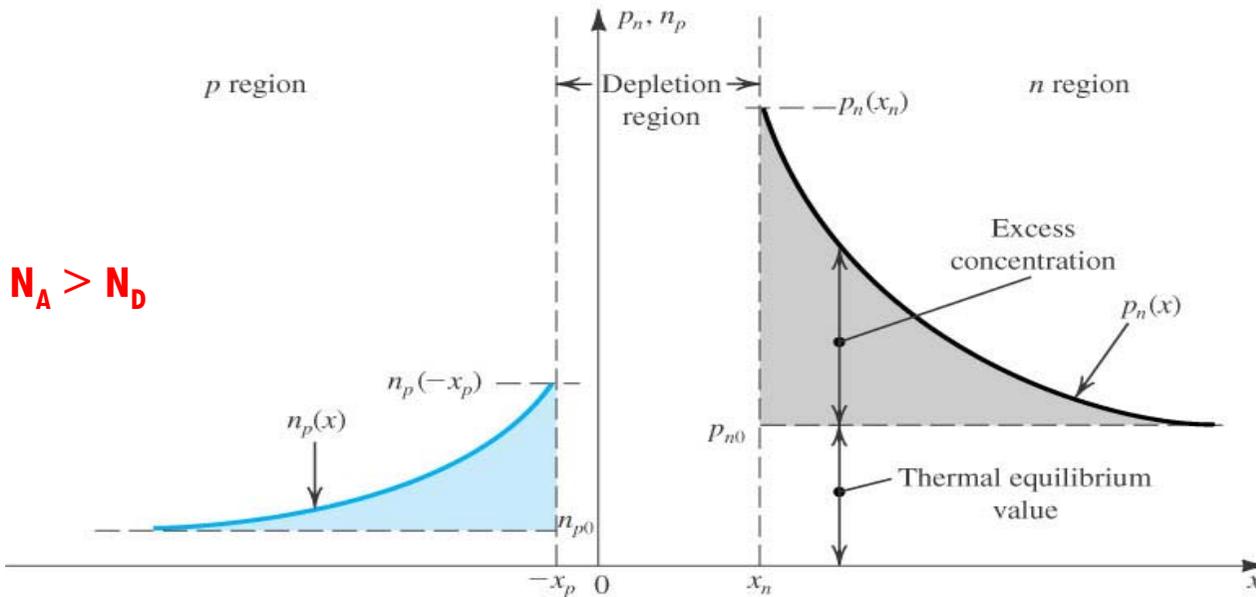
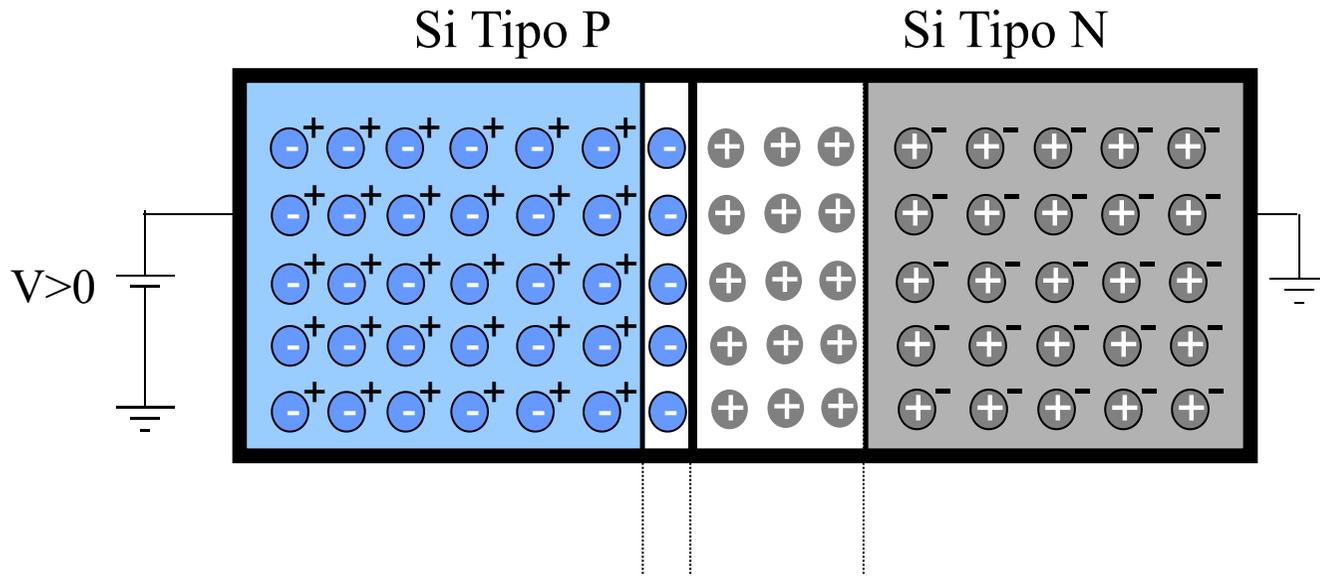
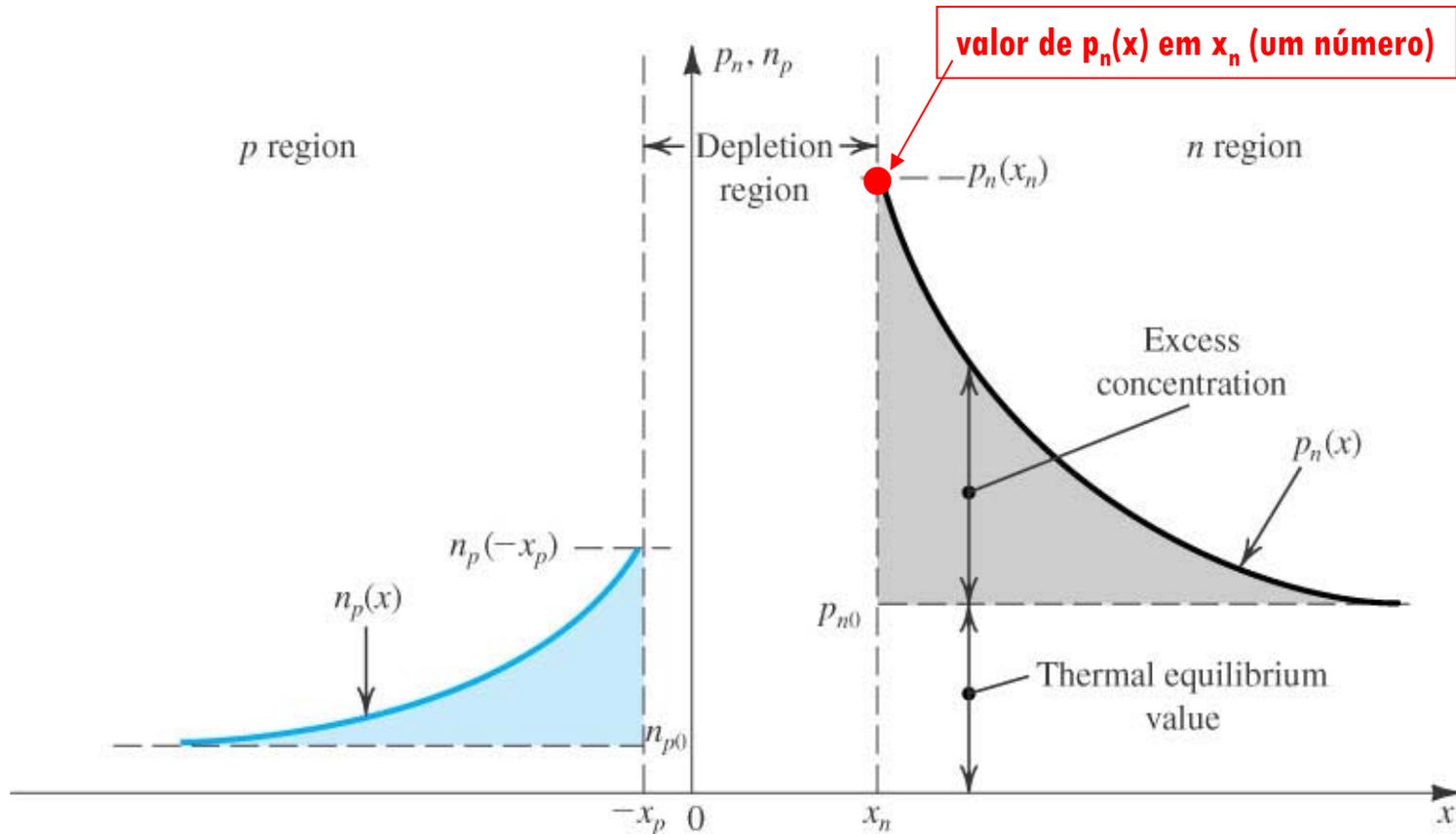


Foto de um diodo construído na EPUSP

# Distribuição de Portadores Minoritários na Junção PN Diretamente Polarizada



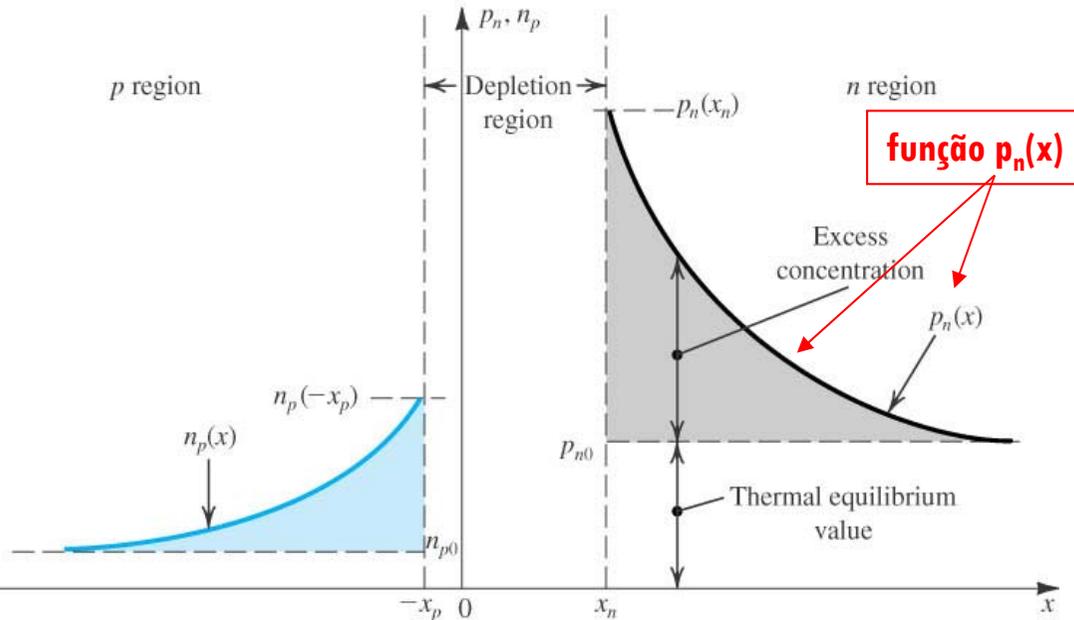
# O Diodo Polarizado Diretamente



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

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

# 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

$$\begin{aligned} J_p &= -qD_p \frac{\partial p_n(x)}{\partial x} \left( J_n = +qD_n \frac{\partial n_p(x)}{\partial x} \right) \\ &= -qD_p \frac{\partial \left\{ p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}] e^{-(x-x_n)/L_p} \right\}}{\partial x} \\ &= q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p} \end{aligned}$$

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

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

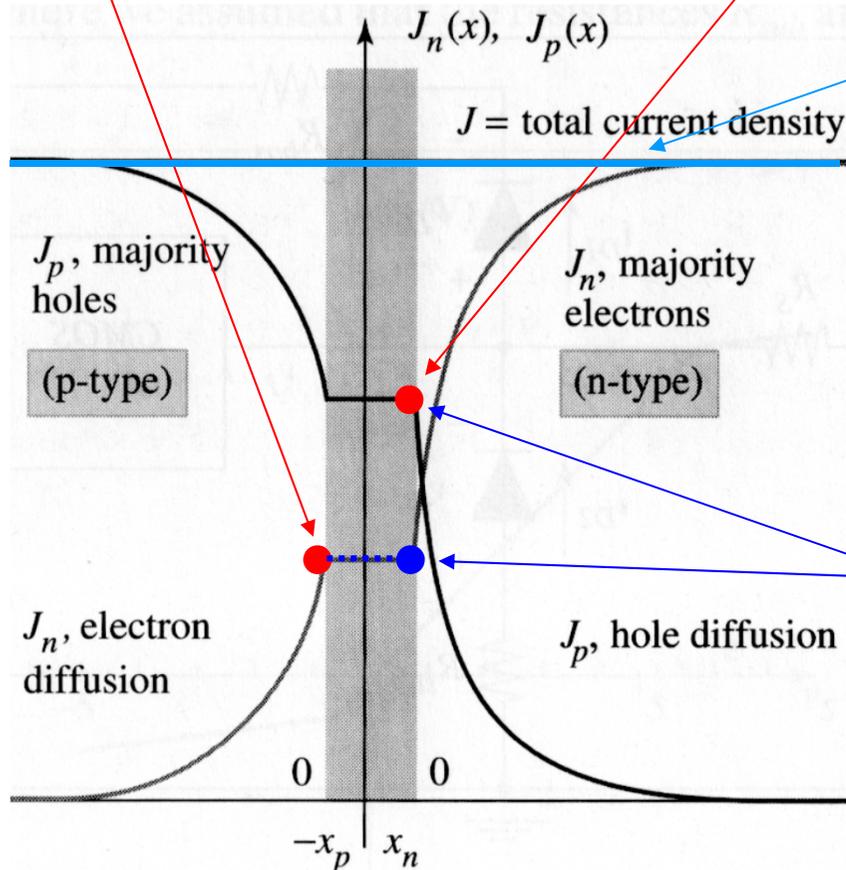
# O Diodo Polarizado Diretamente

Em  $x = -x_p$

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

...Em  $x = x_n$

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



$J_{TOTAL} = J_p + J_n$  (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

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

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

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

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