



CAPITULO 3

Aula 15/16

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

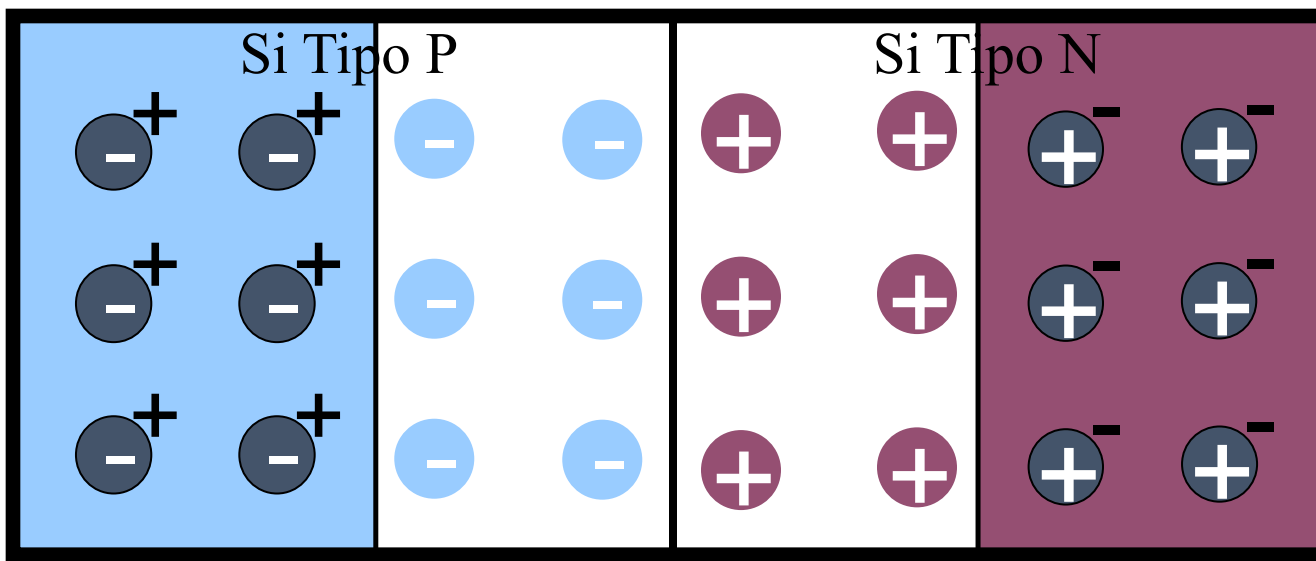
14 ^a 23/05	Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 121-126	Teste 08 9h20-9h35
15 ^a 26/05	Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 127-128	
16 ^a 30/05	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	Teste 09 9h20-9h35
17 ^a 02/06	A junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 128-129	
18 ^a 06/06	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	Teste 10 9h20-9h35
19 ^a 13/06	Equações das correntes no transistor (definição do ganho de corrente em emissor comum - β - e do ganho de corrente em base comum - α), modelos de circuitos equivalentes para grandes sinais do transistor npn operando no modo ativo, exercícios.	Sedra, Cap. 5 p. 239-243.	Teste 11 9h20-9h35
20 ^a 16/06	Análise cc de circuitos com transistores, exercícios selecionados: 5.1, 5.4, 5.10.	Sedra, Cap. 5 p. 246 + 264-269	
21 ^a 20/06	O TBJ como amplificador para pequenos sinais (as condições c.c., a corrente de coletor e a transcondutância) modelos equivalentes (modelos π -híbrido e T)	Sedra, Cap. 5, p. 263-264; p. 275-279.	Teste 12 9h20-9h35
22 ^a 23/06	Aplicação dos modelos equivalentes para pequenos sinais, Efeito Early. O amplificador emissor comum (EC). O amplificador emissor comum com resistência de emissor	Sedra, Cap. 5, p. 290-302	Teste 13 7h30-7h45
23 ^a	Aula de Exercícios a ser agendada fora dos dias de aula Será realizada enquete no Moodle para marcar data e horário		
2^a. Semana de Provas (26/06 a 30/06/2023)			
Data: xx/xx/2023 (xxxx-feira) – Horário: xx:xxh			

15ª 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.**

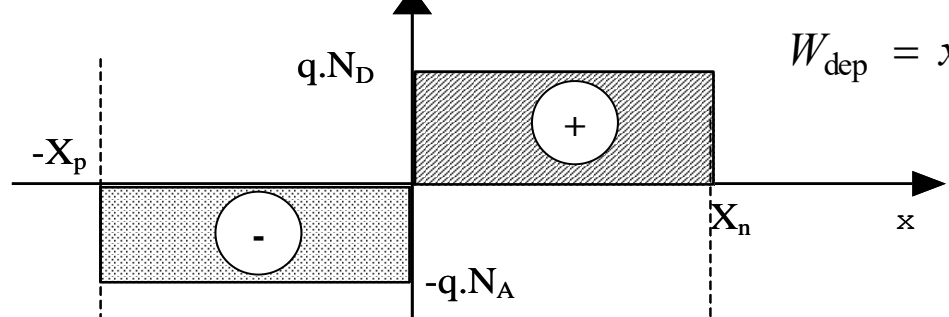


$$qx_p N_A A = qx_n N_D A$$

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$



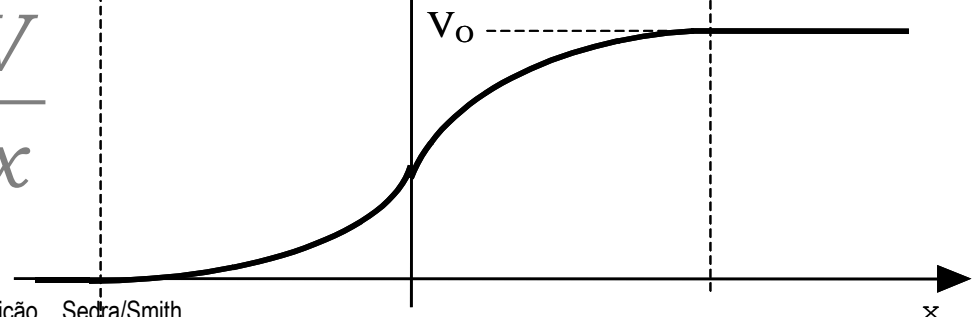
Densidade de Cargas (ρ)



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

Potencial Elétrico (V)

$$E_x = -\frac{dV}{dx}$$



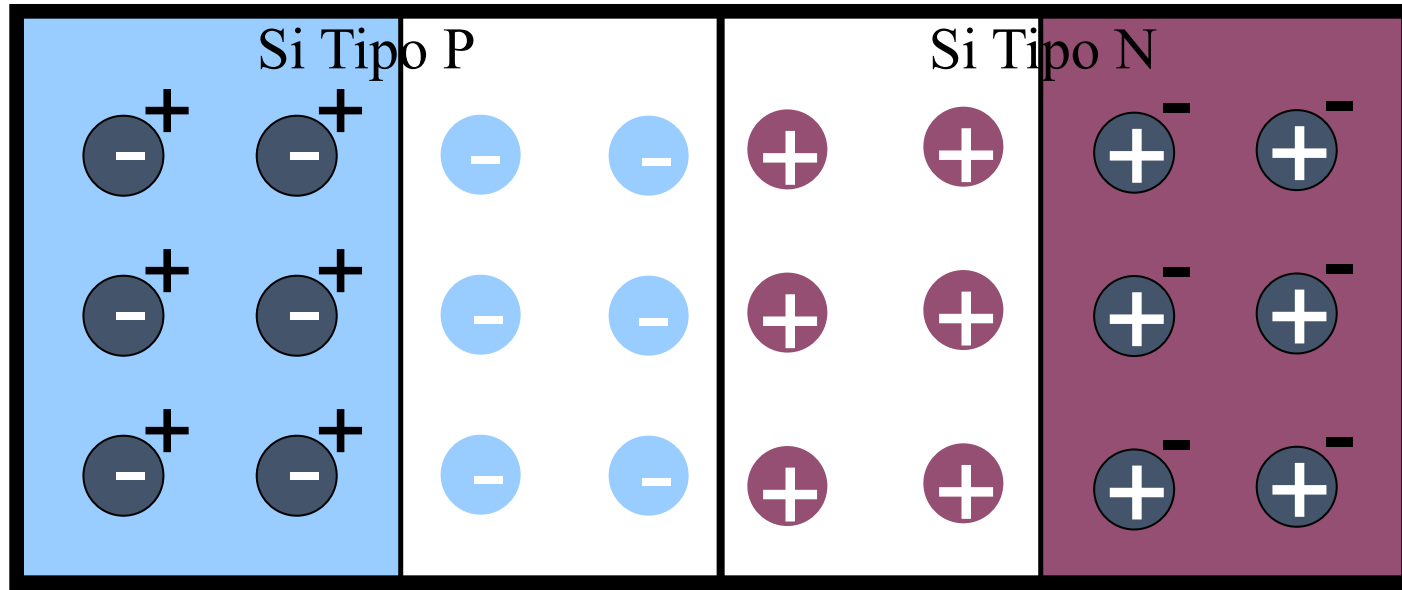
$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

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 $I_D = I_S$)

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



Região de Depleção →
 E_i : campo elétrico interno de equilíbrio

$$|I_{T_{dif}}| = |I_{T_{der}}|$$

ou $I_D = I_S$

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

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

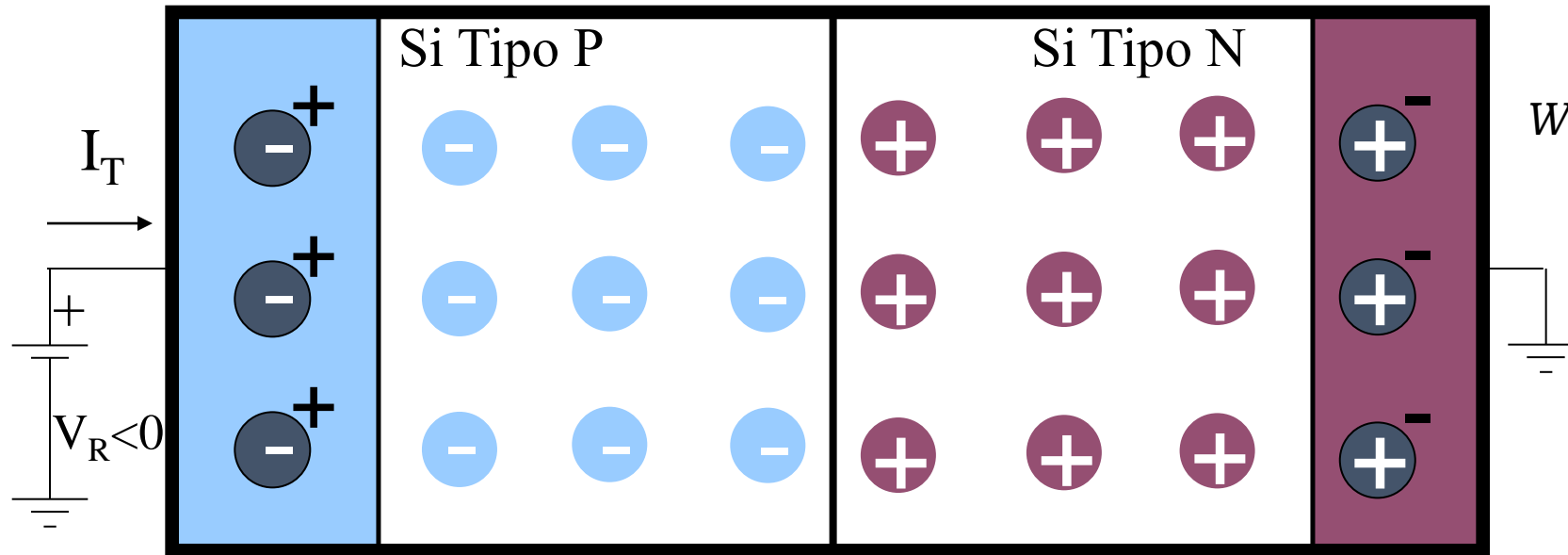
JUNÇÃO PN polarizada reversamente

(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

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

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



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

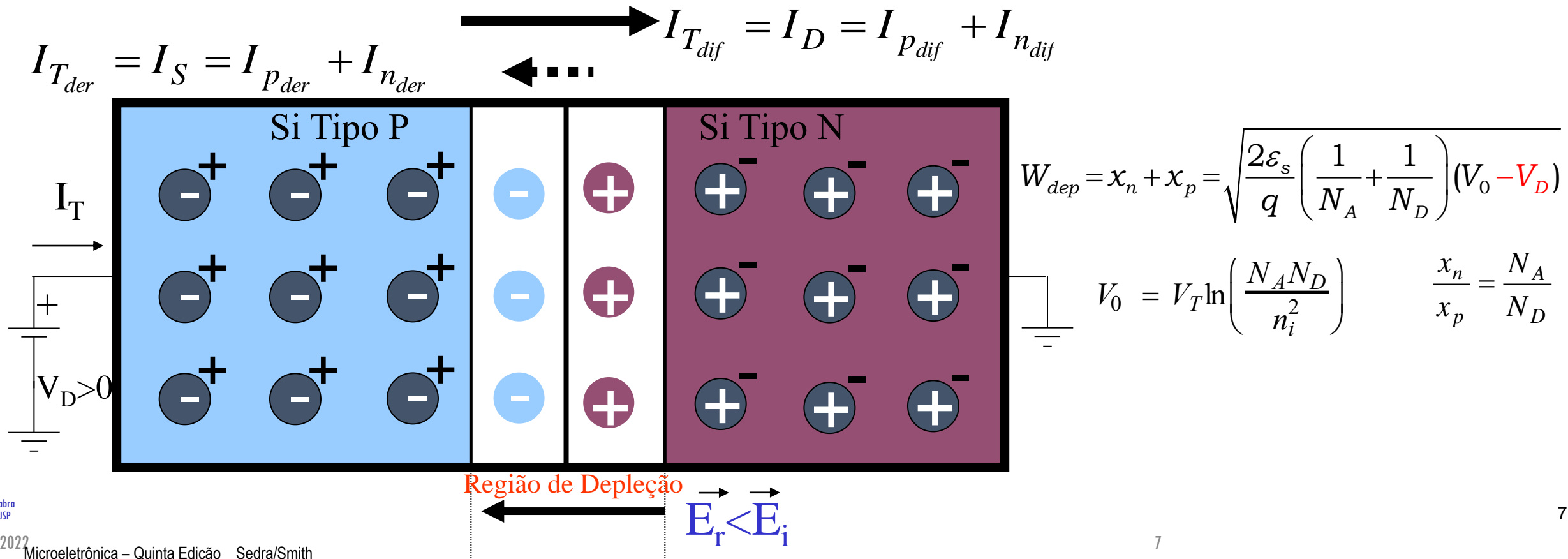
$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

Região de Depleção (aumentando o E)

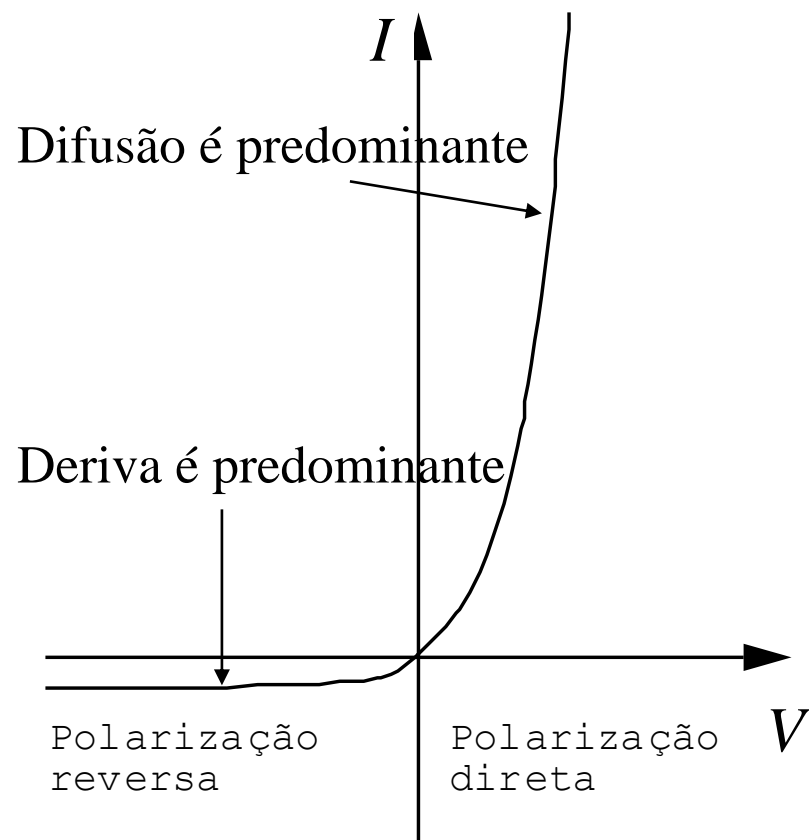
$$\vec{E}_r > \vec{E}_i$$

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 $I_D > I_S$)



Diodo Semicondutor (Junção PN)



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

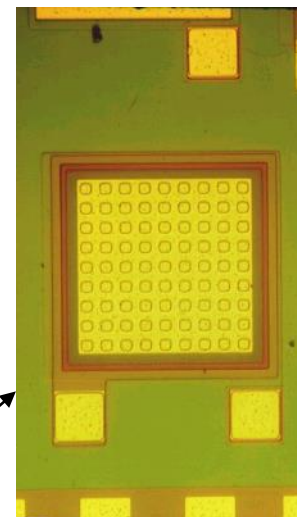
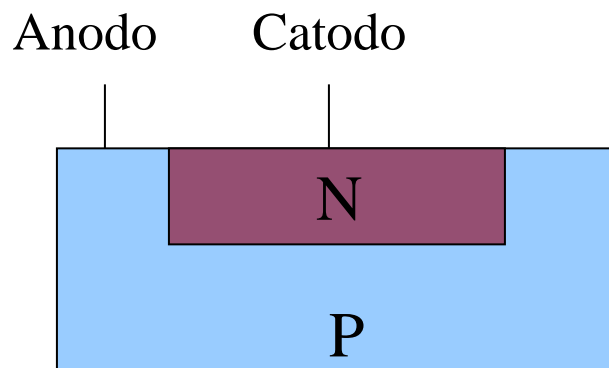
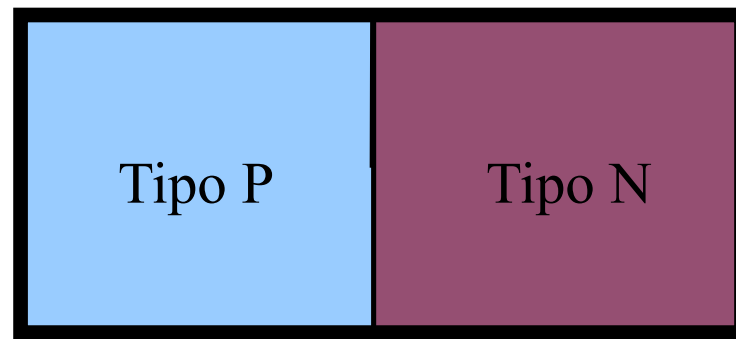
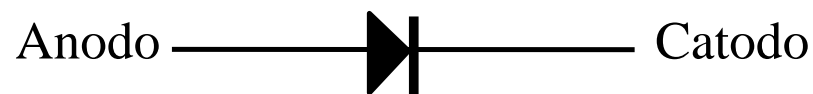
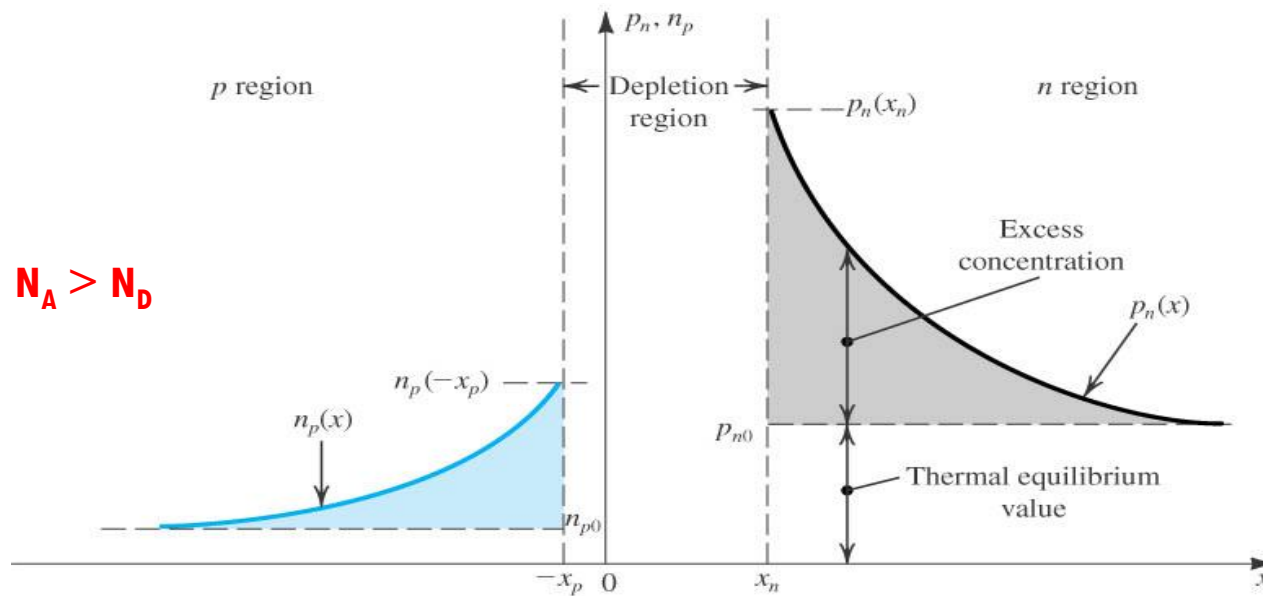
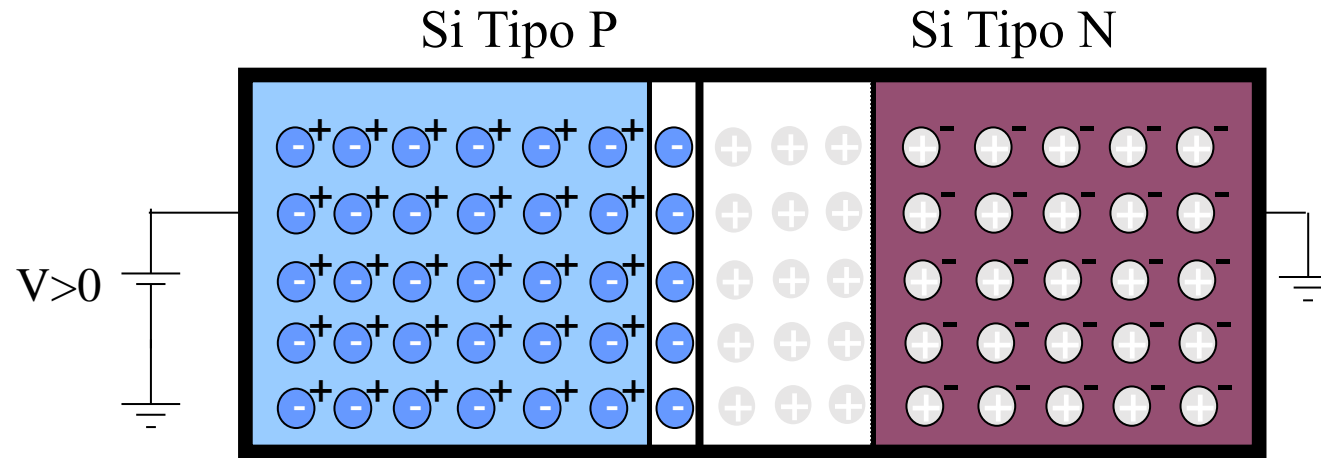
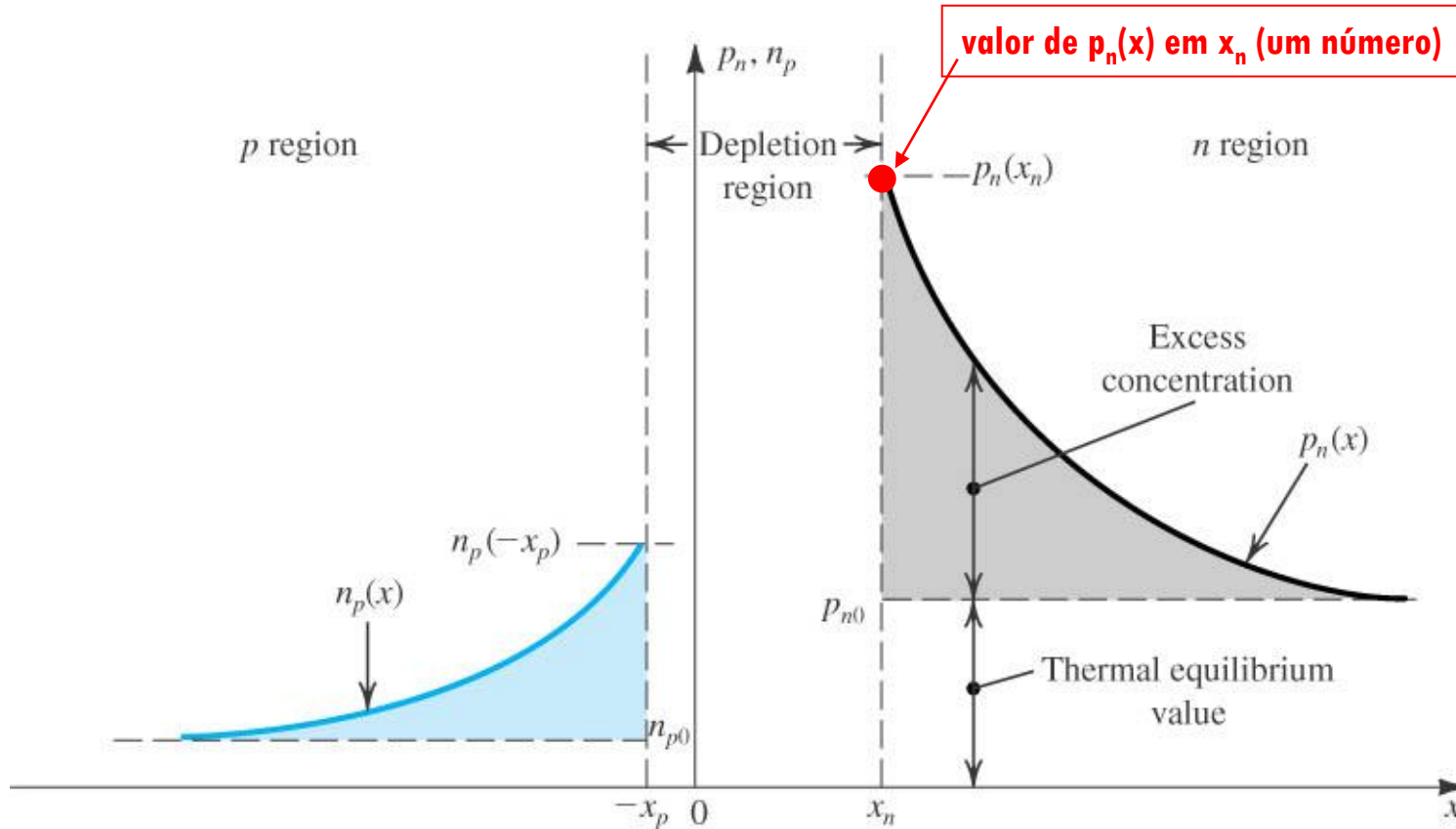


Foto de um diodo construído na EPUSP

Distribuição de Portadores Minoritários na Junção PN Diretamente Polarizada



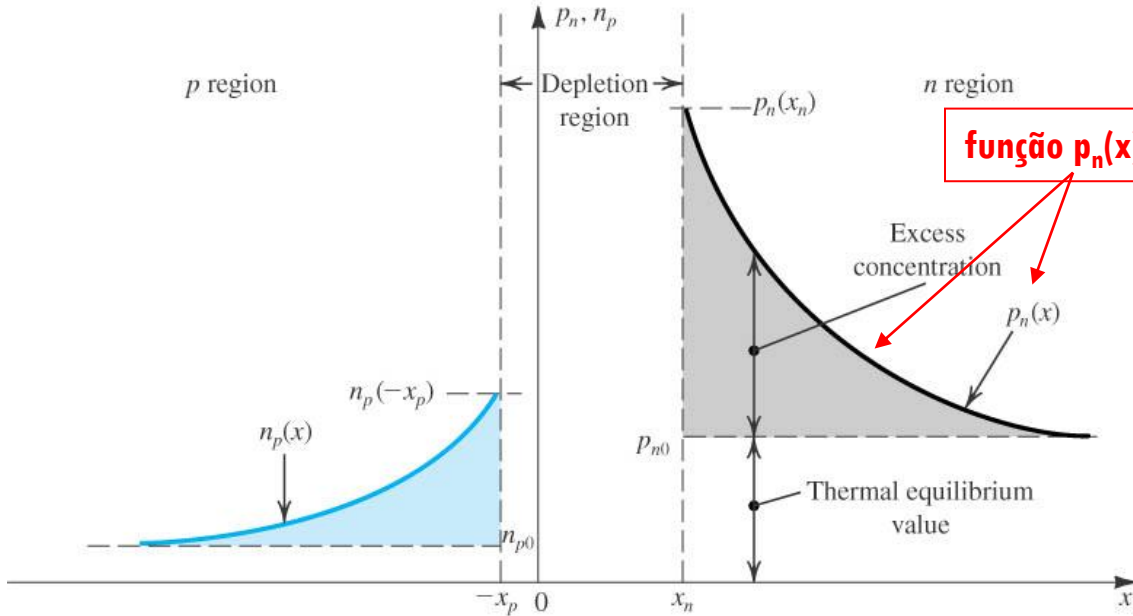
O Diodo Polarizado Diretamente



$p_n(x_n)$, 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 τ
- 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

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

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

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

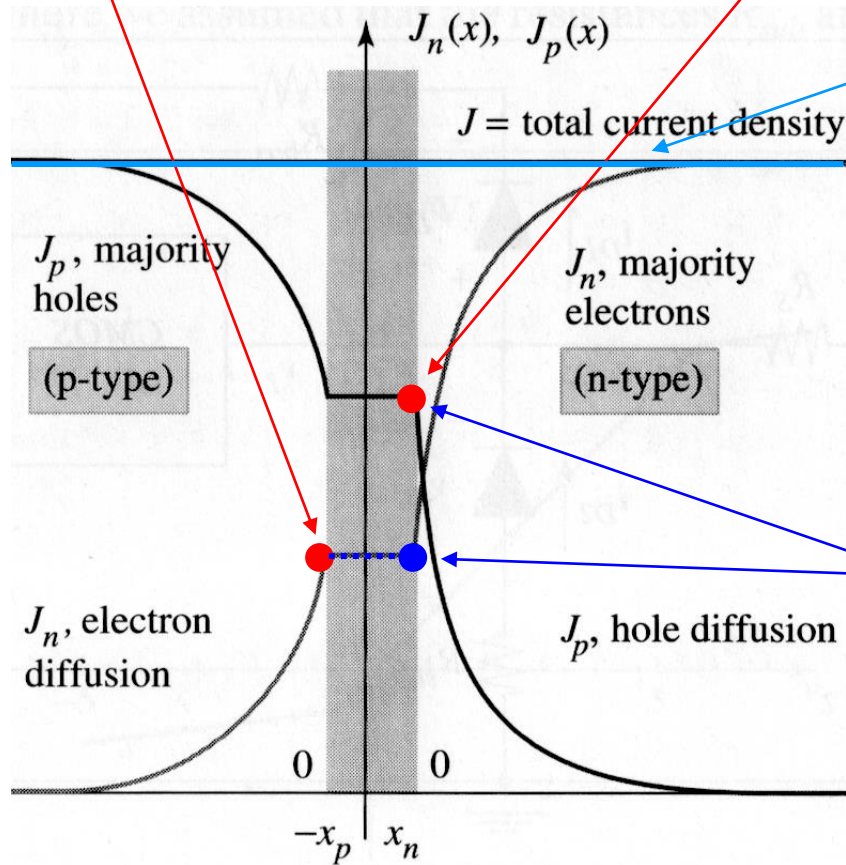
O Diodo Polarizado Diretamente

Em $x = -x_p$

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

...Em $x = x_n$

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



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

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

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

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

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

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