



CAPITULO 3

Aula 16/17

As Capacitâncias de Difusão e de Depleção na junção pn (p. 124-125)

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			

16ª Aula:

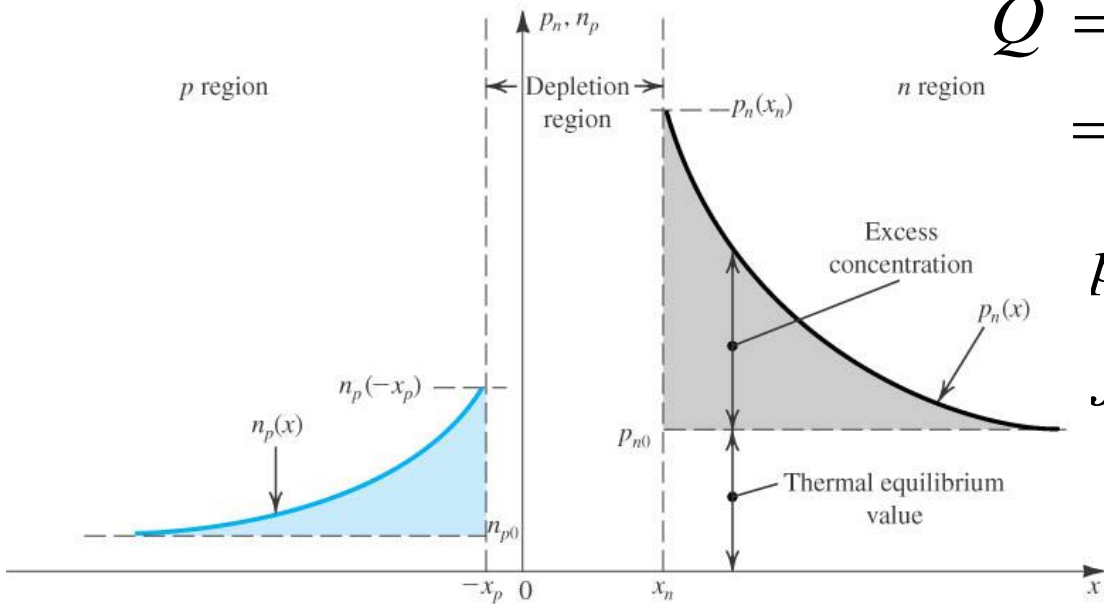
As capacitâncias de Difusão e de Depleção na junção pn

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Explicar o origem da capacitância de Difusão**
- Determinar o valor da capacitância de difusão**
- Incluir essas capacitâncias no modelo do diodo**

O Diodo Polarizado Diretamente

A Capacitância de Difusão



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

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

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

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

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

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

$$Q_p = \tau_p I_p$$

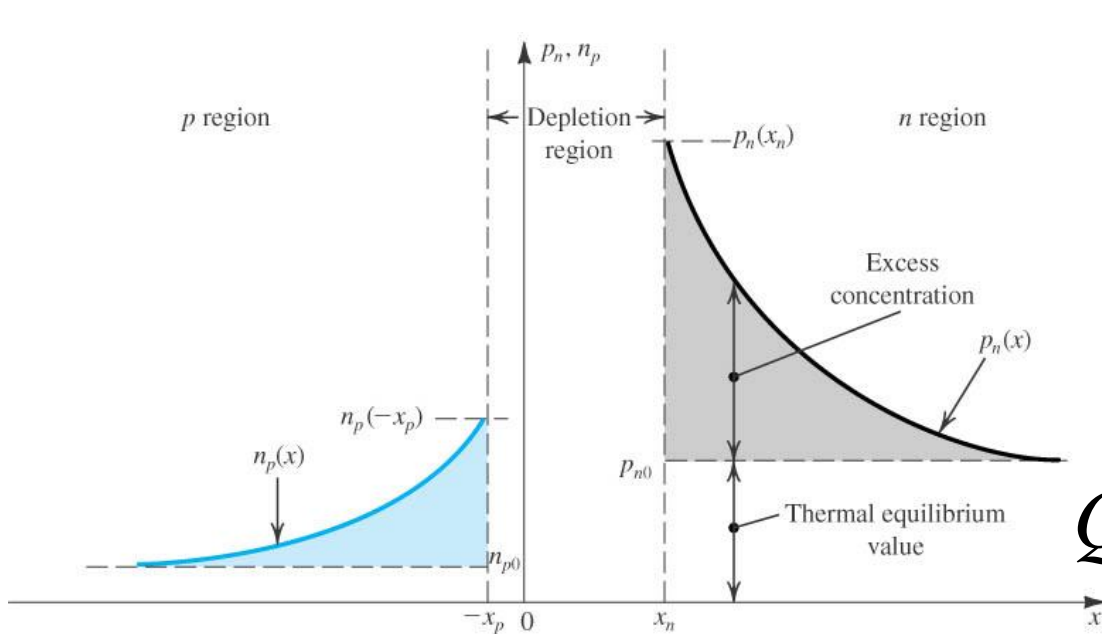
$$Q_n = \tau_n I_n$$

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

$$Q = \tau_T I_D$$

O Diodo Polarizado Diretamente

A Capacitância de Difusão



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

$$Q_p = \tau_p I_p$$

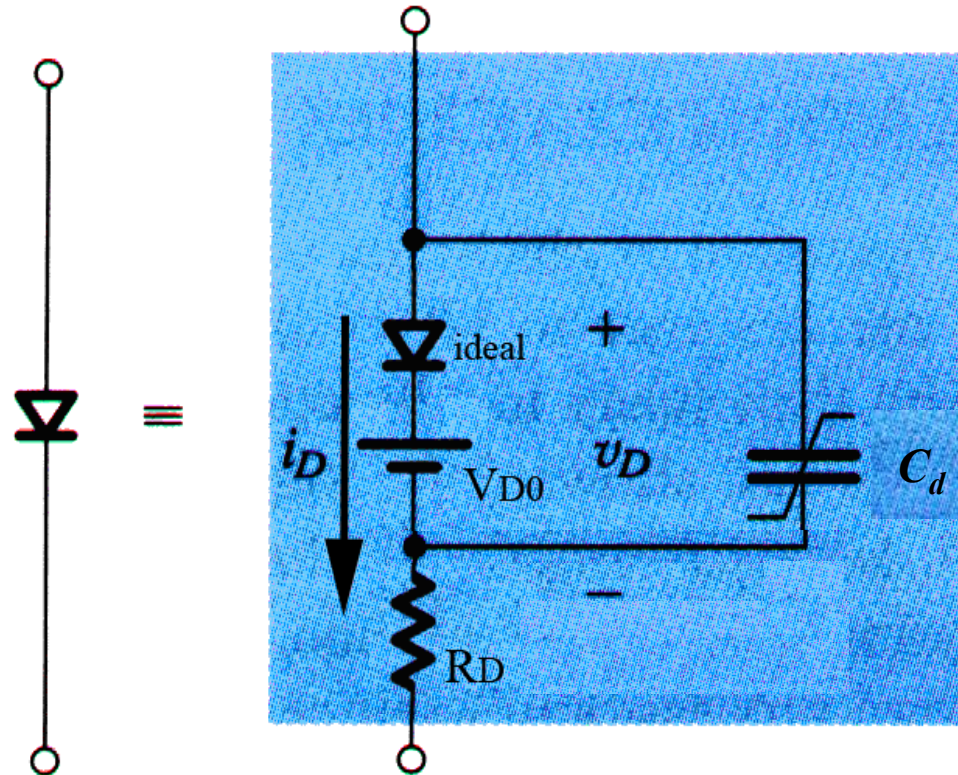
$$Q_n = \tau_n I_n$$

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

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

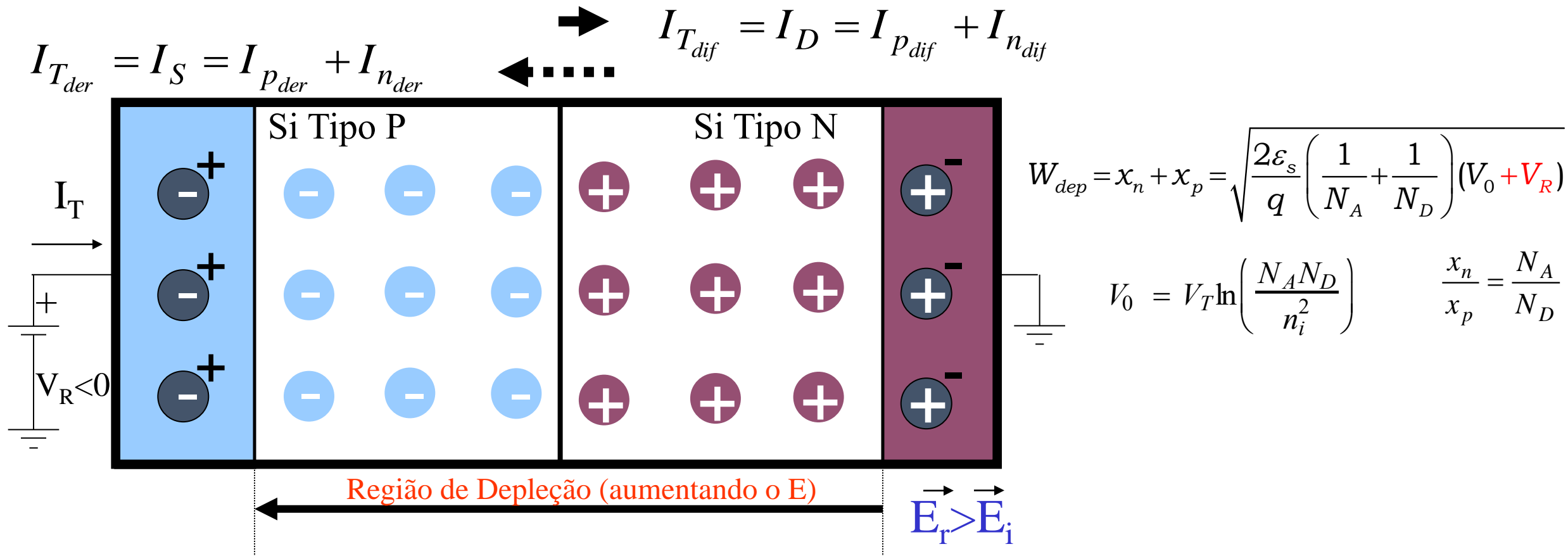
$$C_d = \left(\frac{\tau_T}{V_T} \right) I$$

O Diodo Polarizado Reversamente



O Diodo Polarizado Reversamente

A Capacitância de Junção



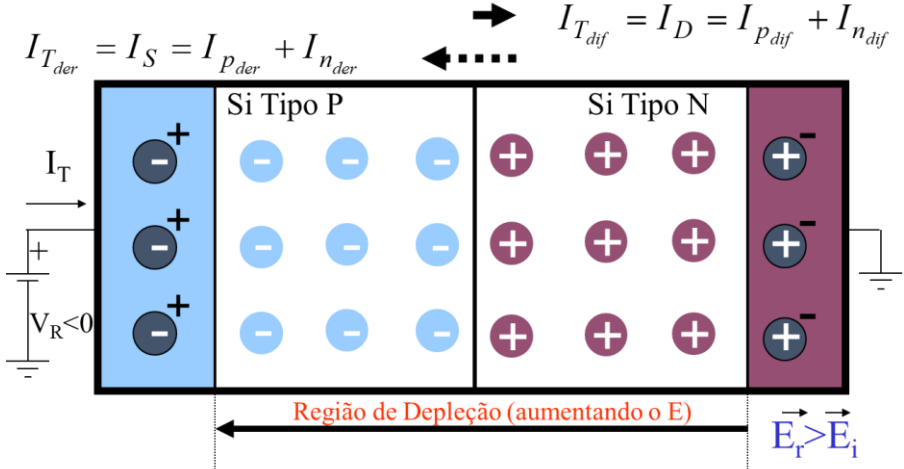
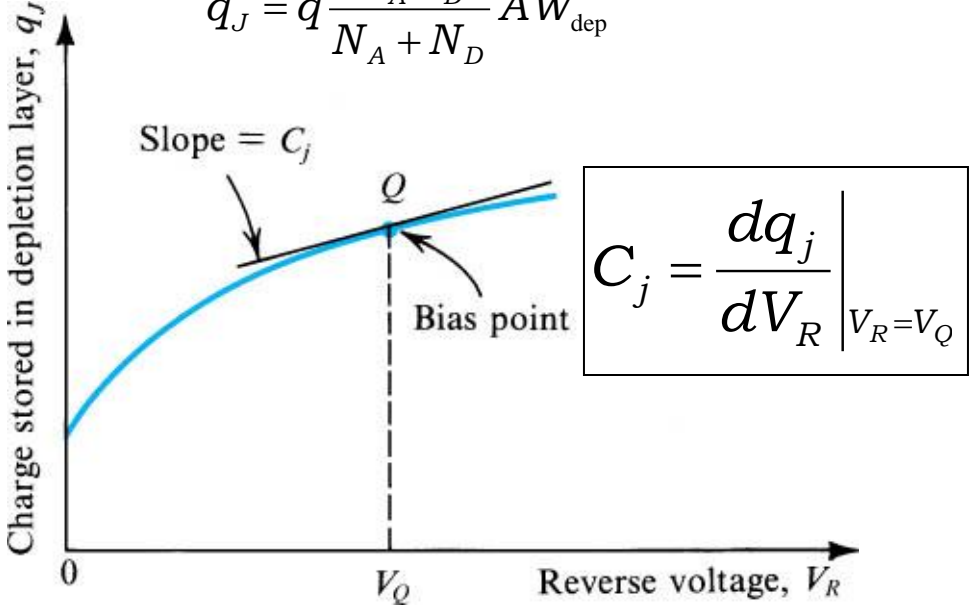
O Diodo Polarizado Reversamente

(a capacitância de junção ou de depleção)

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

$$q_J = q_N = qN_D x_n A$$

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



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

O Diodo Polarizado Reversamente

(a capacitância de junção ou de depleção)

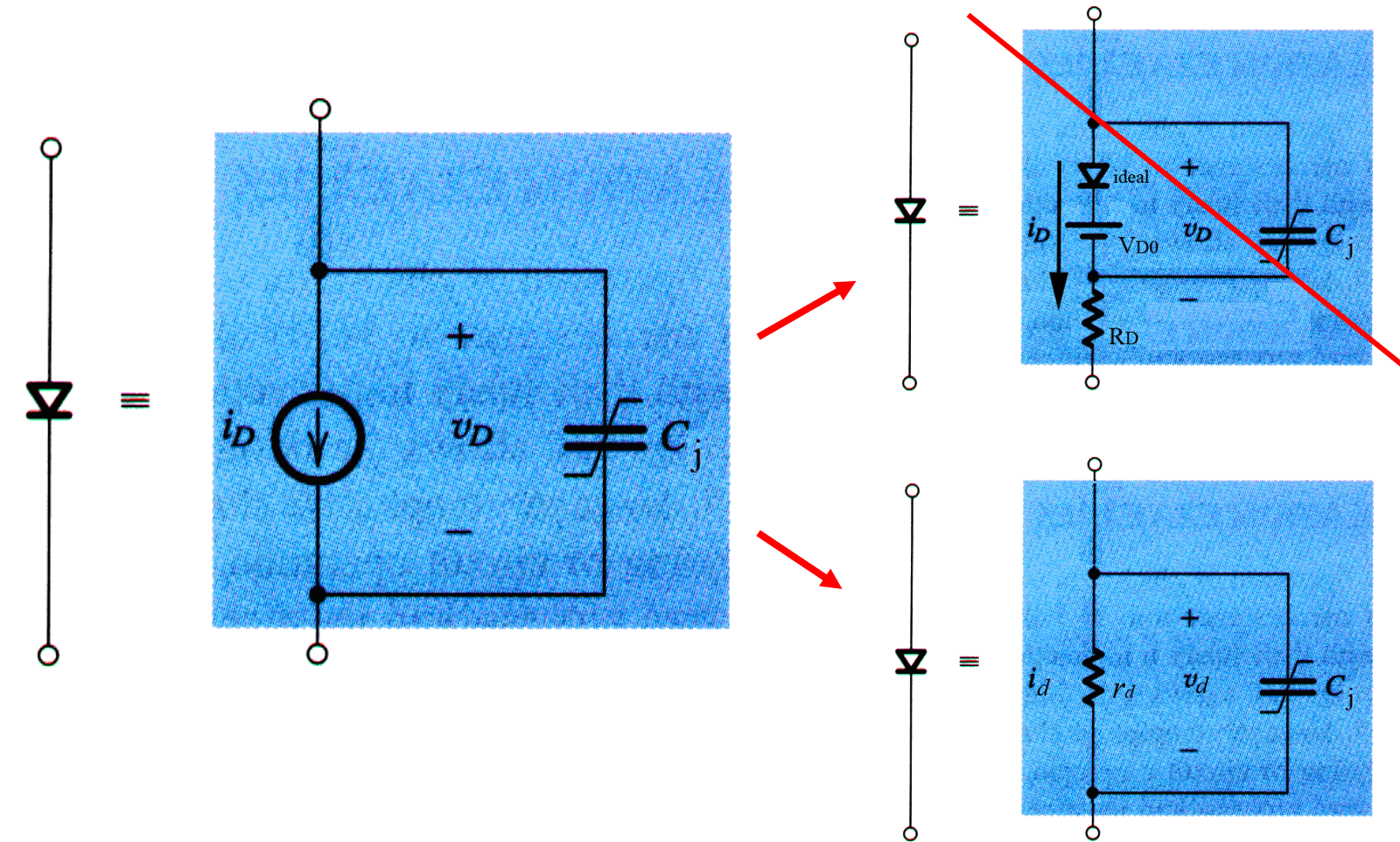
$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad C_j = \left. \frac{dq_j}{dV_R} \right|_{V_R=V_0}$$

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

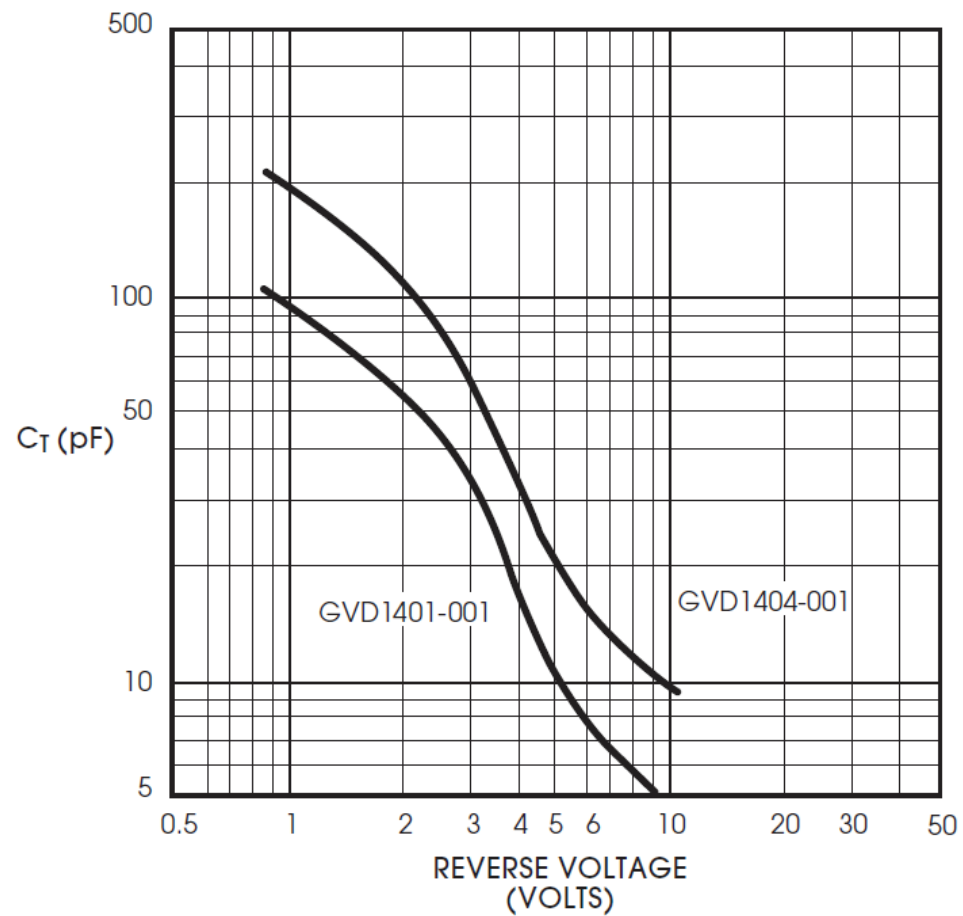
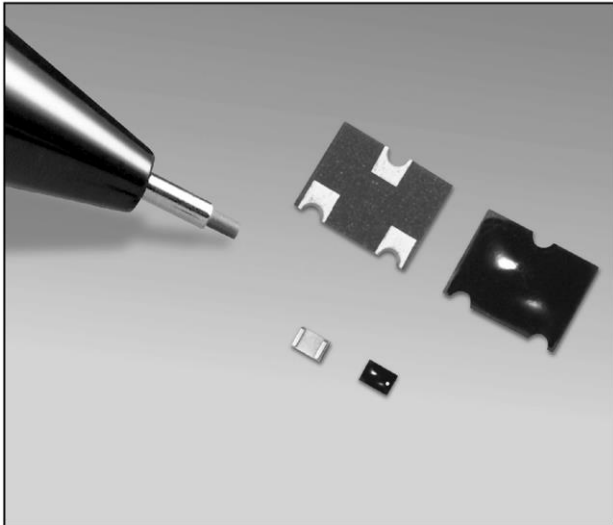
$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}} \quad \text{onde} \quad C_{j0} = A \sqrt{\left(\frac{\epsilon_s q}{2} \right) \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) \left(\frac{1}{V_0} \right)}$$

Na prática $C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_0} \right)^m}$ com $m = 1/3$ a $1/2$

O Diodo Polarizado Reversamente



VARACTOR DIODES

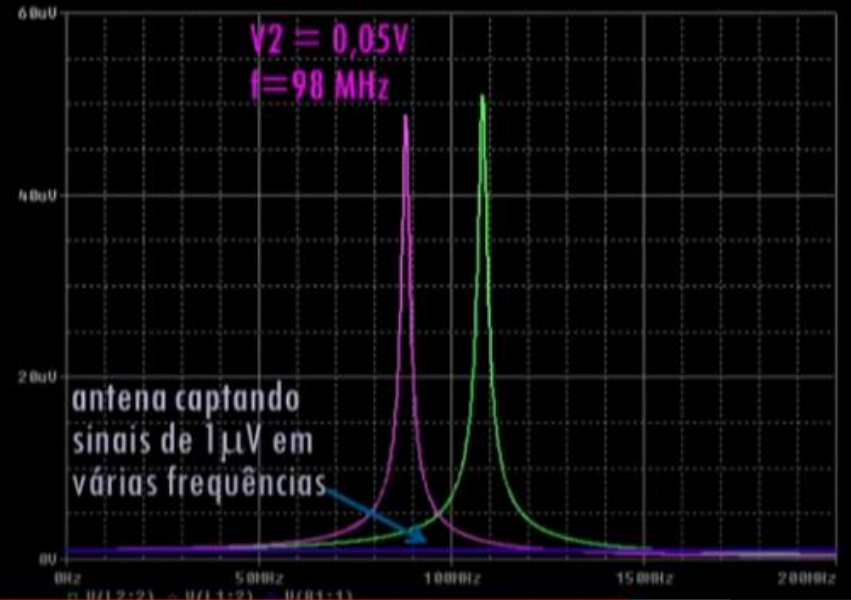
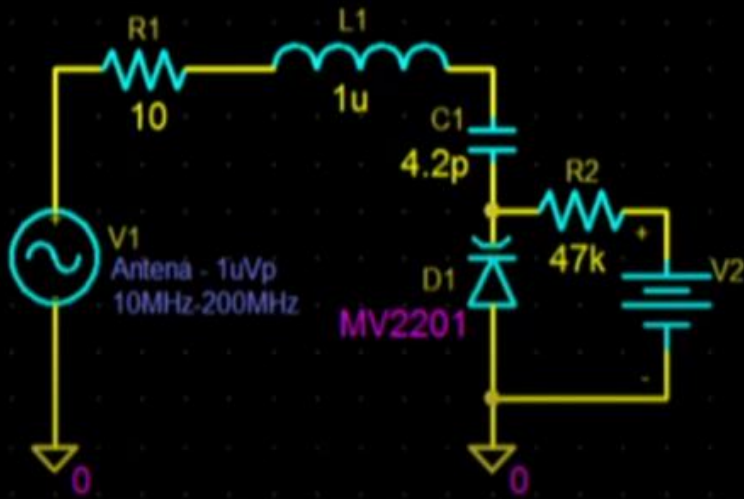


SIMULADORES

O Diodo fornecendo uma capacitância controlada

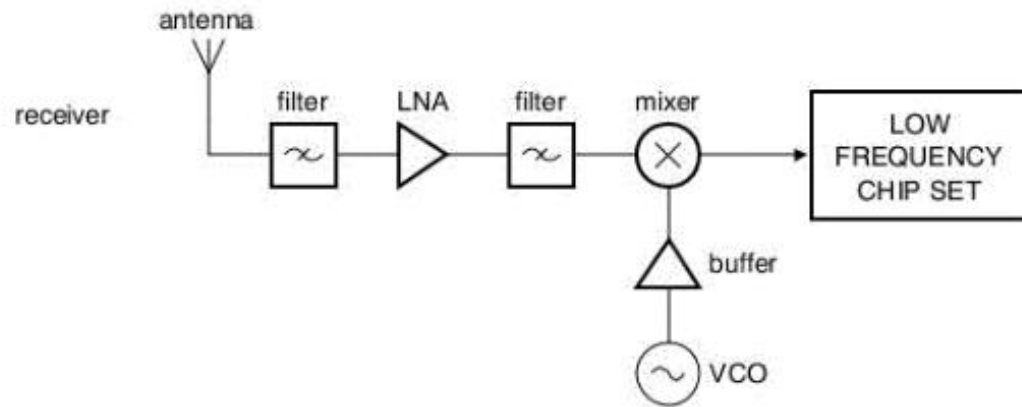
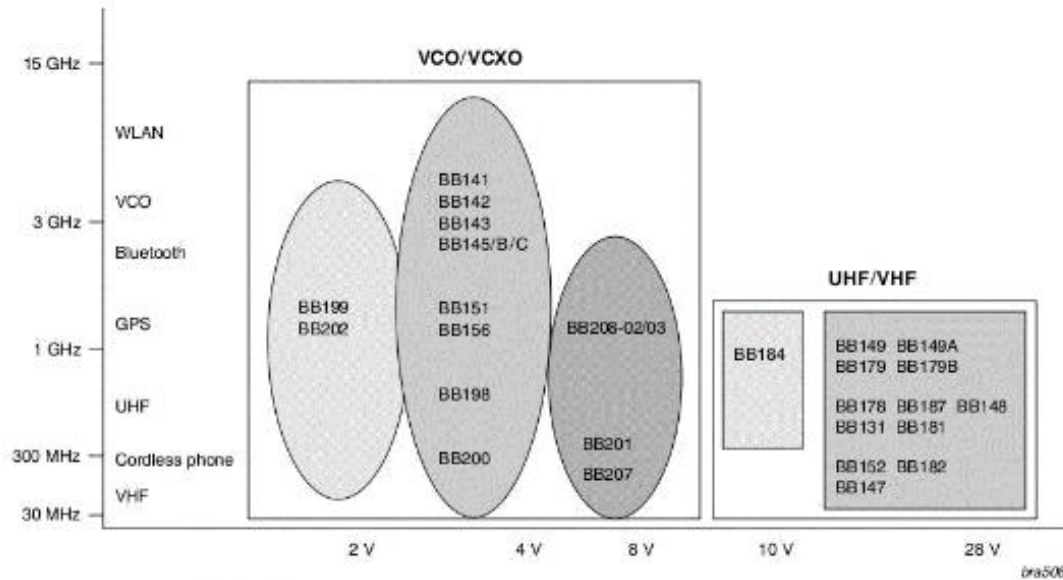
Nem sempre o que é inesperado é ruim. Essa capacitância que varia com a tensão é utilizada nos **diodos varactores** em vários tipos de circuitos, como osciladores controlados por tensão (voltage controlled oscillators – VCOs).

O circuito RLC série abaixo é capaz de sintonizar em uma frequência $\omega = 1/\sqrt{LC}$ onde o C pode ser controlado por V2:



<https://www.youtube.com/watch?v=mQnsDMMwcok&t=3s>

Diodos Varactores



Target Applications

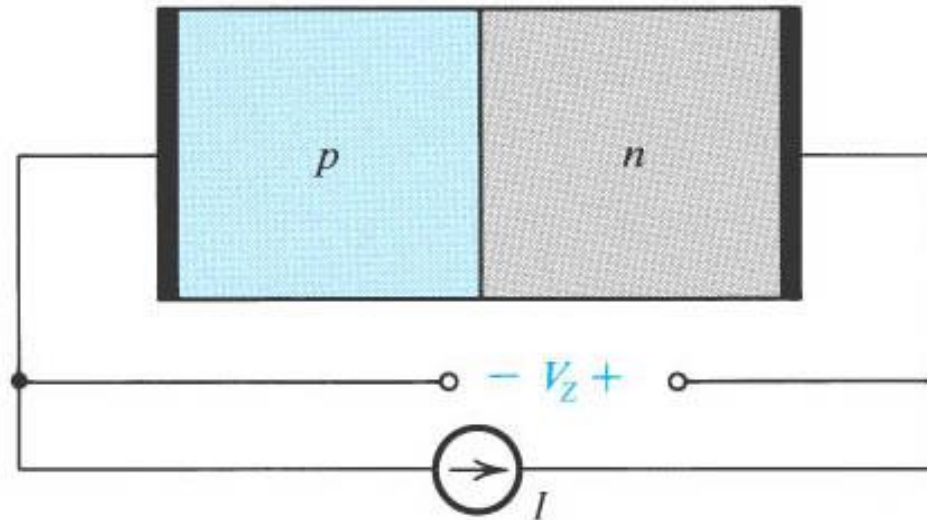
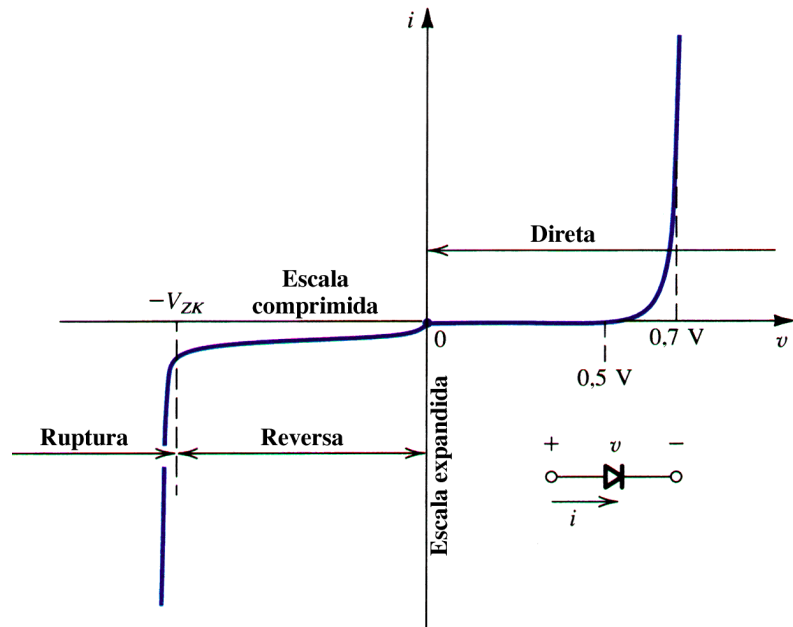
- Voltage Controlled Crystal Oscillators / Temperature Controlled Crystal Oscillators (VCXO/TCXO)
- Voltage Controlled Oscillators (VCO)
- Electronic TV tuning * Satellite and terrestrial Television tuners * DVD recorders
- CDMA Cellular VCO with the BFG425W, BFG410W and Varactor BB142
- FM radio tuning * Car radio * Mobile phones

Exercício

3.33 Para uma junção pn com $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$ e $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$ operando em $T = 300$ K, determine:

- (a) o valor de C_{j0} por unidade de área da junção (μm^2 é uma unidade conveniente) e
- (b) a capacitância C_j para uma tensão de polarização reversa de 2 V assumindo uma área de junção de $2500 \mu\text{m}^2$. Considere $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3$, $m = 1/2$ e o valor de V_0 determinado no Exercício 3.13 ($V_0 = 0,728$ V).

O Diodo na Região de Ruptura



Quando $I > I_s$ a junção se rompe:

Ruptura por Efeito Zener ($< 5\text{V}$): ocorre quando o campo elétrico na camada de depleção aumenta até quebrar ligações covalentes (pares n-p)

Ruptura por Efeito Avalanche ($> 7\text{V}$): ocorre quando os portadores minoritários que cruzam a região de depleção quebram as ligações covalentes, e podem em seguida quebrar outras ligações

O Modelo para o Diodo

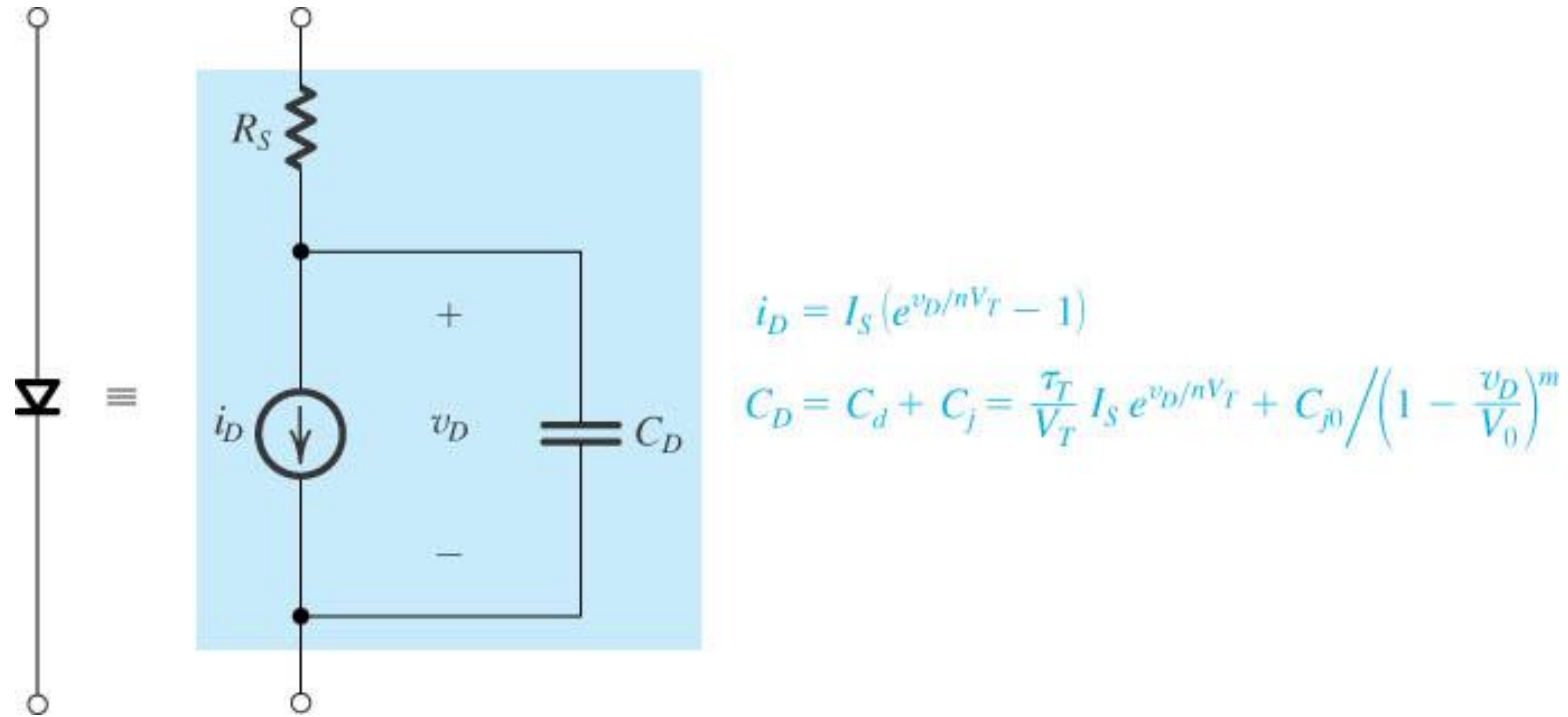
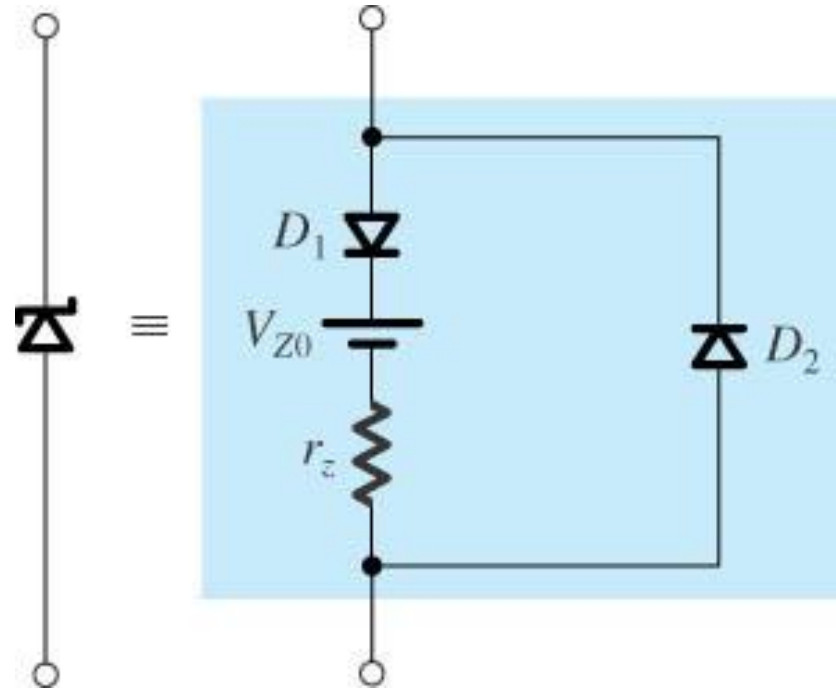


Figura 3.51 The SPICE diode model.

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:

- (a) I_S
- (b) A tensão de polarização direta V
- (c) A componente da corrente devida à injeção de lacunas e aquela devida à injeção de elétrons através da junção
- (d) τ_p e τ_n
- (e) 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 τ_T .
- (f) 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 ns , $55,6 \text{ ns}$;
(e) $2,29 \text{ pC}$, $0,46 \text{ pC}$, $2,75 \text{ pC}$, $27,5 \text{ pC}$; (f) 110 pF