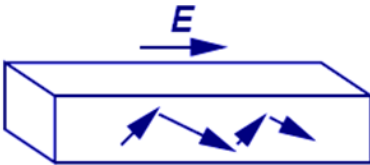


EE 530 Eletrônica Básica I

Junção PN (Diodos)

Prof. Pedro Xavier

Drift Current



$$J_n = q \mu_n E$$

$$\vec{J}_{nder} = -qn\vec{v}_n = q\mu_n n\vec{E}$$


$$\vec{J}_{pder} = qp\vec{v}_p = q\mu_p p\vec{E}$$

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

v_{nder} : a vel. tem o sinal negativo pois o e⁻ caminha contra o sentido de E
 J_{nder} : é positiva pois o sentido da corrente é igual ao do E, ou seja, o contrário do sentido dos e⁻

Resumo

Diffusion Current



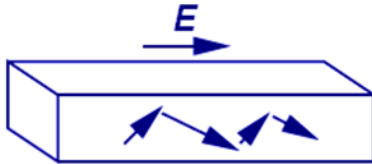
$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

Prof. Pedro Xavier

Resumo

Drift Current



$$J_n = q \mu_n E$$

$$\vec{J}_{nder} = -qn\vec{v}_n = q\mu_n n\vec{E}$$

$$\vec{J}_{pder} = qp\vec{v}_p = q\mu_p p\vec{E}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

J_{pdif} : Tem sinal negativo pois o gradiente de concentração é negativo, fazendo J_p positivo.

Diffusion Current

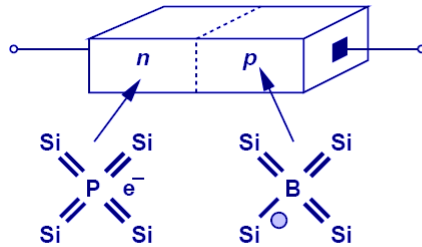


$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

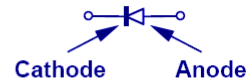
$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

Prof. Pedro Xavier

Junção PN

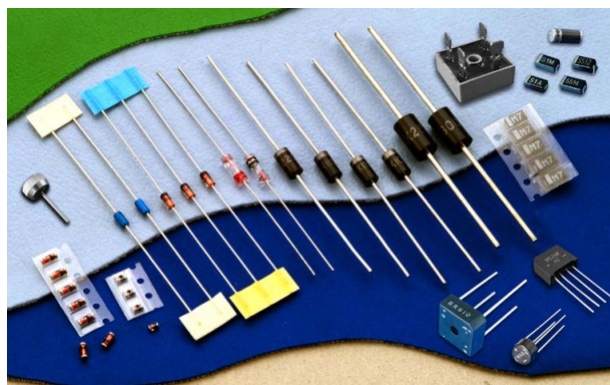


(a)



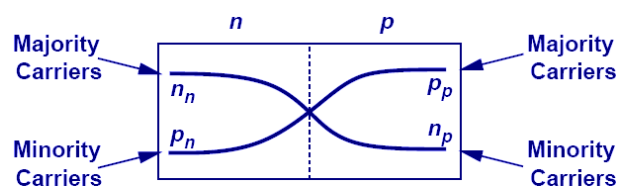
(b)

Junção PN



Junção PN

- No instante após a formação de uma junção PN, "justapondo" um bloco de material tipo P em um bloco de material tipo N, temos a seguinte distribuição de portadores



n_n : Concentration of electrons on n side

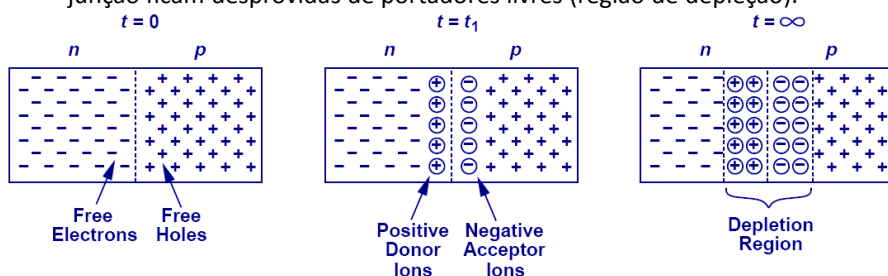
p_n : Concentration of holes on n side

p_p : Concentration of holes on p side

n_p : Concentration of electrons on p side

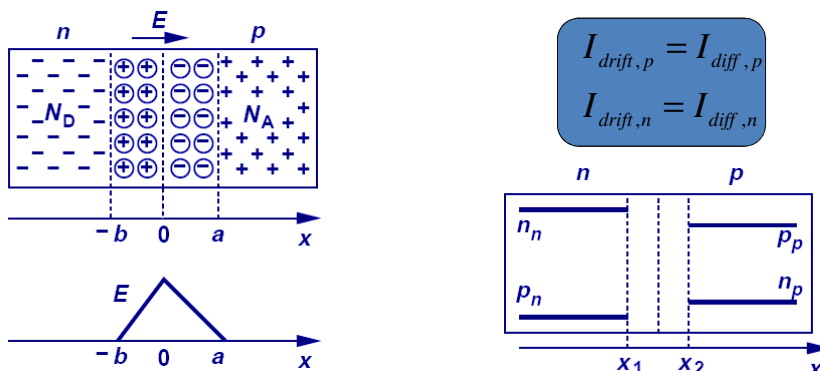
Junção PN

- Em $t=0$ todo o material tipo N e todo material tipo P estão eletroneutros. O excesso de portadores livres não significa que o material esteja carregado, por exemplo, uma barra de cobre tem muitos elétrons livres, mas está eletroneutra.
- As correntes de difusão transportam elétrons e lacunas de um lado para outro, de acordo com o gradiente de concentração.
- Para cada elétron livre que sai do lado N e passa para o lado P, um íon positivo é deixado em seu lugar. Em consequência, as vizinhanças da junção ficam desprovidas de portadores livres (região de depleção).



Junção PN

- Os íons da camada de depleção geram um campo elétrico, resultando em uma corrente de deriva contrária à corrente de difusão
- A junção atinge o equilíbrio quando o campo elétrico tiver intensidade suficiente de forma que a corrente de deriva anule a corrente de difusão.



Junção PN

- Potencial Interno (V_0)

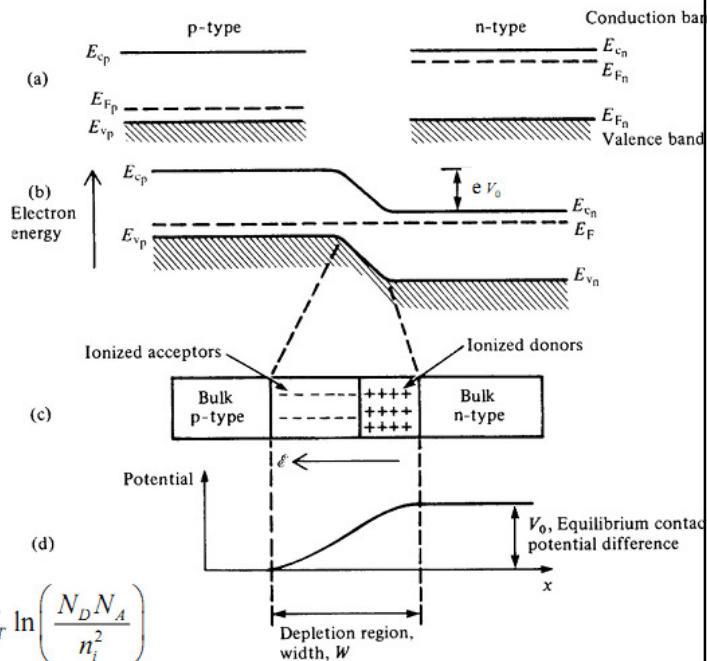
$$E = -dV/dx$$

$$|I_{\text{drift},p}| = |I_{\text{diff},p}| \Rightarrow q\mu_p p E = qD_p \frac{dp}{dx} \Rightarrow -\mu_p p \frac{dV}{dx} = D_p \frac{dp}{dx}$$

$$\Rightarrow -\mu_p \int_{x_1}^{x_2} dV = D_p \int_{p_n}^{p_p} \frac{dp}{p} \Rightarrow V(x_2) - V(x_1) = -\frac{D_p}{\mu_p} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad \begin{matrix} p_p \approx N_A \\ p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D} \end{matrix} \quad \Rightarrow \quad V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Junção p-n em aberto:



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

Para saber mais

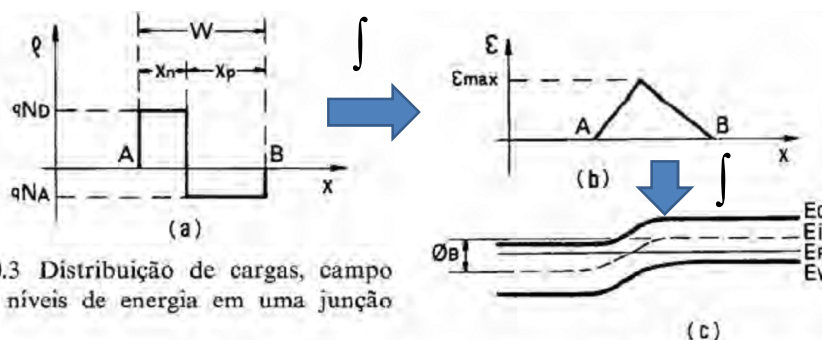


Figura 10.3 Distribuição de cargas, campo elétrico e níveis de energia em uma junção abrupta

Exercício

- Determine o potencial interno de uma junção PN. Dados:
- $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e $n_i(300 \text{ K}) = 1,08 \times 10^{10}$
- $T = 300 \text{ K}$, $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ e $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

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

$$n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT}$$

$$E_g = 1.12 \text{ eV}$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$V_0 \approx (26 \text{ mV}) \ln \frac{(2 \times 10^{16}) \times (4 \times 10^{16})}{(1.08 \times 10^{10})^2}$$

$$\approx 768 \text{ mV.}$$

Exercício

- De quanto varia o potencial interno de uma junção PN se multiplicarmos N_A por 10? Dados:
- $T=300\text{K}$, $k=1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ e $q=1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

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

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$\Delta V_0 = V_T \ln \frac{10 N_A \cdot N_D}{n_i^2} - V_T \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

$$= V_T \ln 10$$

$$\approx 60 \text{ mV (at } T = 300 \text{ K).}$$

Largura da região de depleção

- As cargas do lado p e n são iguais:

$$q x_p A N_A = q x_n A N_D$$

$$x_p / x_n = N_D / N_A$$

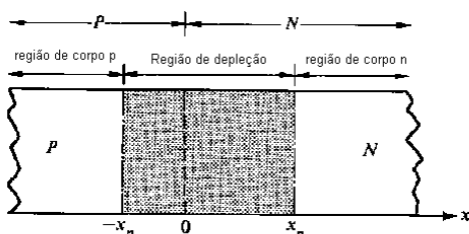
- Da física de dispositivos:

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{Si} V_0}{q} \frac{N_A}{N_D (N_A + N_D)}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{Si} V_0}{q} \frac{N_D}{N_A (N_A + N_D)}}$$

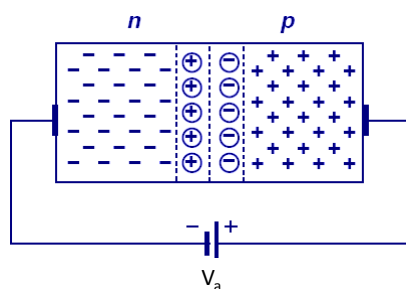
$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{Si} V_0}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

Sendo que $\epsilon_{Si} = \epsilon_r \epsilon_0$ corresponde a constante dielétrica do silício ($11,7 \times 8,85 \times 10^{-14} = 1,04 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$) e V_0 é o potencial da junção



Efeito da polarização sobre a largura da região de depleção

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si} V_0}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} \quad \Rightarrow \quad W = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{q} (V_0 - V_a) \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$



Polarização direta

$V_a > 0 \Rightarrow W$ diminui

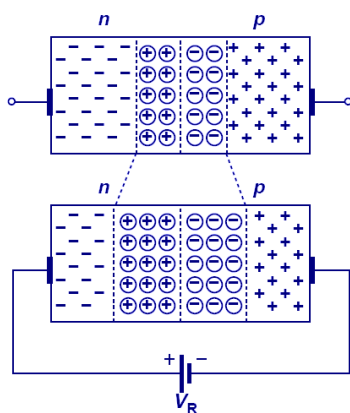
Polarização reversa

$V_a < 0 \Rightarrow W$ aumenta

Sendo que $\epsilon_{Si} = \epsilon_r \epsilon_0$ corresponde a constante dielétrica do silício ($11,7 \times 8,85 \times 10^{-14} = 1,04 \times 10^{-12}$ F/cm) e V_0 é o potencial da junção

Polarização reversa

- Por quê a largura da região de depleção aumenta?



- A polarização aumenta o E da região de depleção.
- Ocorre um deslocamento de elétrons livres da região N no sentido do polo +.
- Ocorre um deslocamento de lacunas livres da região P no sentido do polo -.
- Aumentando a região de depleção

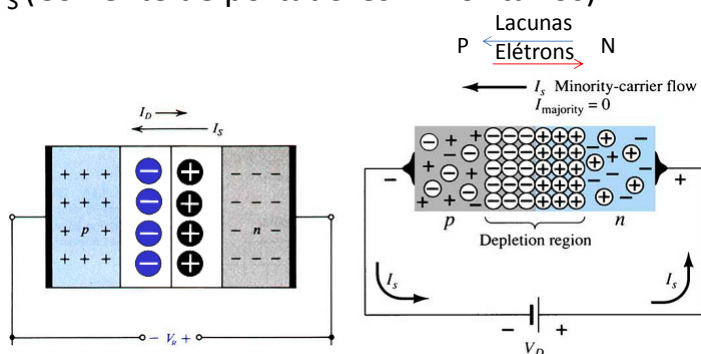
Polarização reversa

- Corrente:

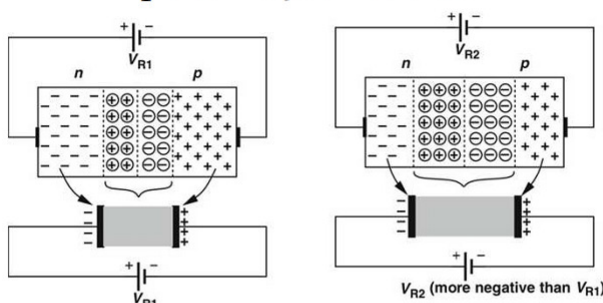
☐ $I = I_S - I_D$

☐ Em regime $I_D \rightarrow 0$

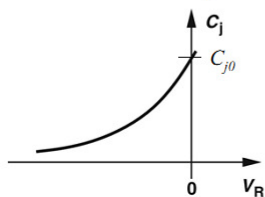
☐ $I \sim I_S$ (Corrente de portadores minoritários)



Redução da capacitância de junção sob polarização reversa



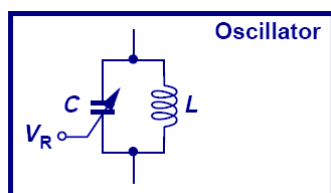
Capacitor controlado por tensão:



$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}} \quad \text{F/cm}^2$$

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\epsilon_{si} q}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_0}} \quad \text{F/cm}^2$$

Oscilador controlado por tensão



$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Exercício

- Uma junção PN é dopada com
- $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ e $n_i(300 \text{ K}) = 1,08 \times 10^{10}$
- Determine a capacitância do dispositivo para $V_R = 0$ e 1 V
- $T = 300 \text{ K}$, $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ e $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$V_0 = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.73 \text{ V.}$$

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}} \text{ F/cm}^2$$

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\epsilon_{si} q}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot \frac{1}{V_0}} = 2.65 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2.$$

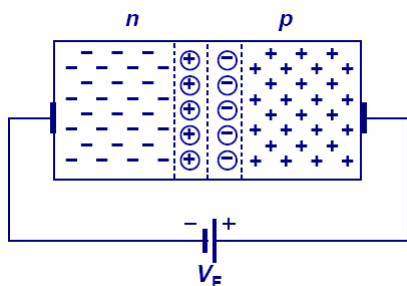
$$C_{j0} = 0.265 \text{ fF}/\mu\text{m}^2,$$

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\epsilon_{si} q}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_0}},$$

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}} = 0.172 \text{ fF}/\mu\text{m}^2.$$

Polarização direta

- $I_D > I_S$



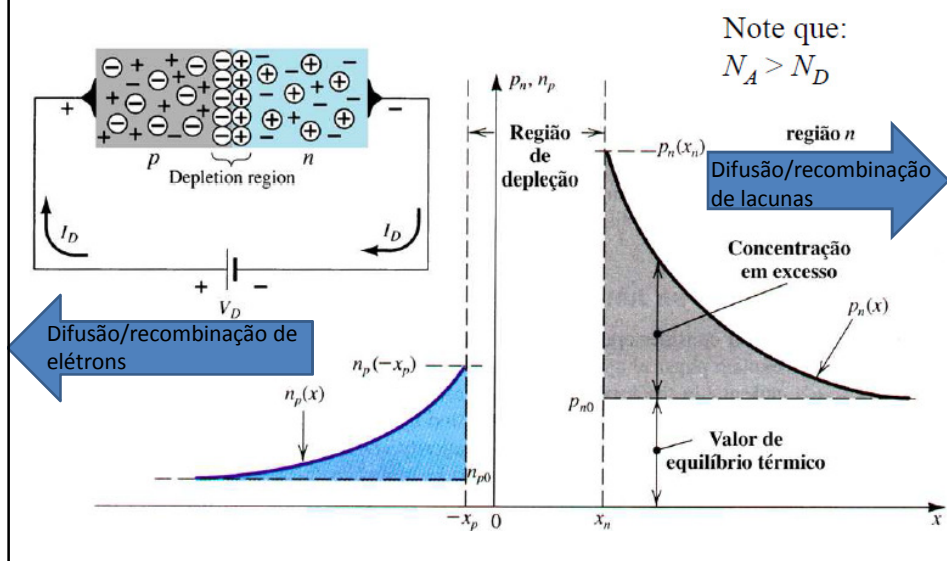
- A polarização diminui o E da região de depleção.

- A fonte fornece elétrons e lacunas para as regiões N e P, respectivamente, diminuindo o número de íons na camada de depleção.

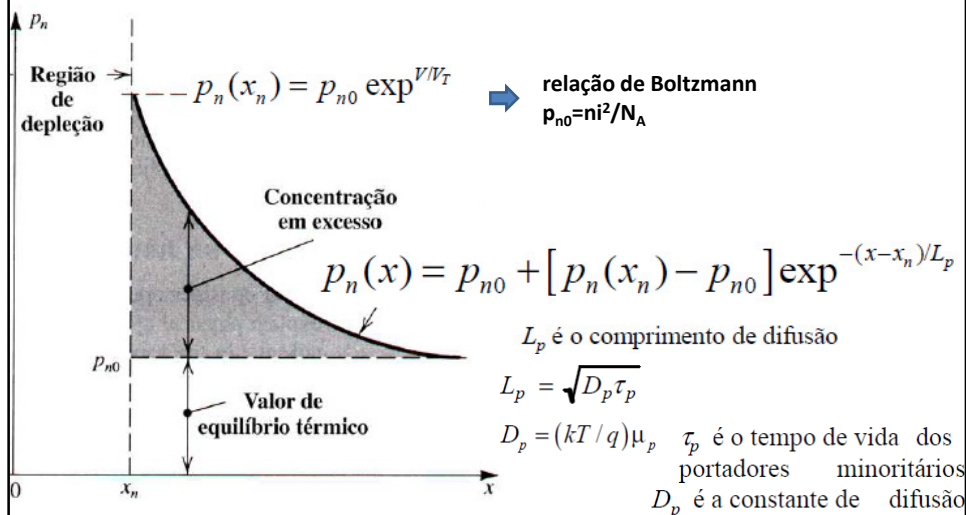
- As lacunas da região P são injetadas através da junção na região N, provocando um aumento de portadores minoritários, p_n

- Do mesmo modo ocorre o aumento de portadores minoritários na região P, n_p

Polarização direta: Perfil dos portadores minoritários difundidos em cada região



Lacunas difundidas através da junção para dentro da região n



Densidade da corrente de difusão de lacunas

$$J_p = -qD_p \frac{dp_n(x)}{dx}$$

Concentração de portadores minoritários em x_n

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

Concentração em qualquer posição x , sendo que $x > x_n$

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

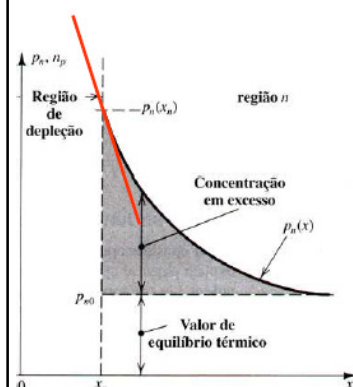
Densidade da corrente de difusão em função do decaimento da concentração

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

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

O decaimento é devido à recombinação com os elétrons majoritários

O máximo na densidade de corrente de lacunas ocorre em $x=x_n$, e vale:



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

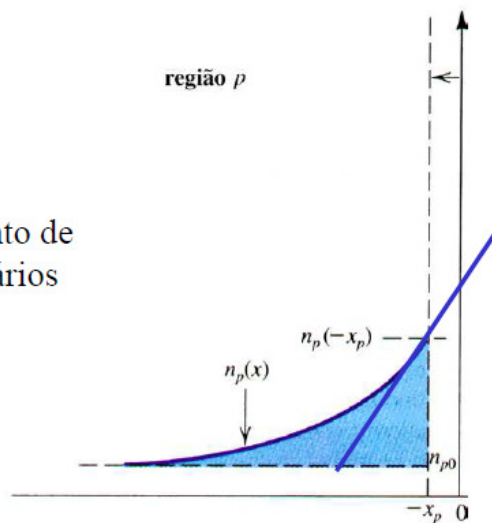
Para o lado p tem-se:

Máximo na densidade de elétrons:

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

região p

Sendo que L_n é o comprimento de difusão dos elétrons minoritários



Corrente total

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (\exp^{V/V_T} - 1) \quad J_n = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (\exp^{V/V_T} - 1)$$

$$I = A \left(q \frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{q D_n n_{p0}}{L_n} \right) (\exp^{V/V_T} - 1)$$

Substituindo $p_{n0} = n_i^2/N_D$ e $n_{p0} = n_i^2/N_A$

$$I = A q n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) (\exp^{V/V_T} - 1)$$

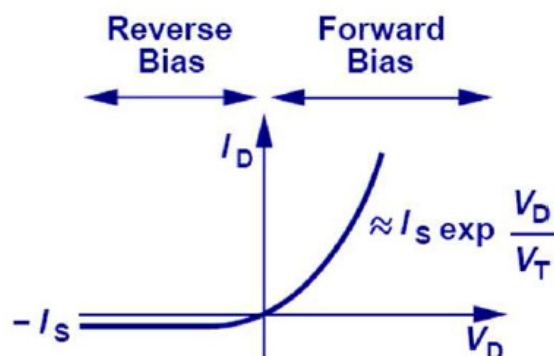
Corrente de saturação reversa:

(|| para $V \rightarrow -\infty$)

$$I_S = A q n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \quad I_{tot} = I_S (\exp \frac{V_F}{V_T} - 1)$$

Equação da junção ou característica I versus V

$$I_D = I_S (\exp \frac{V_D}{V_T} - 1)$$



Exercício

- Determine I_S . Dados:
- $N_A=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e $n_i(300 \text{ K})=1,08 \times 10^{10}$
- $T=300 \text{ K}$, $k=1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ e $q=1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

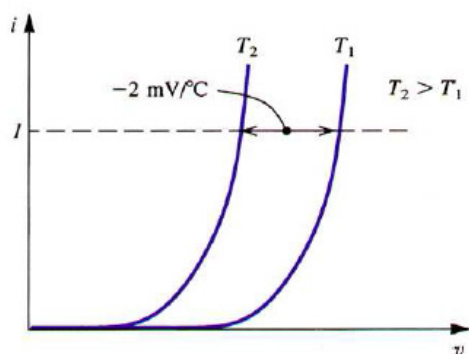
$$D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s} \quad D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$A = 100 \text{ } \mu\text{m}^2, L_n = 20 \text{ } \mu\text{m}, L_p = 30 \text{ } \mu\text{m}$$

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

$$I_S = 1,77 \times 10^{-17} \text{ A}.$$

Dependência da relação V versus I com a temperatura



$$I_D = I_S \left(\exp \frac{V_D}{V_T} \right)$$

$$V_D = V_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right)$$

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{q} = V_T = \text{Tensão Termodinâmica}$$

Efeito da temperatura em I_S

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

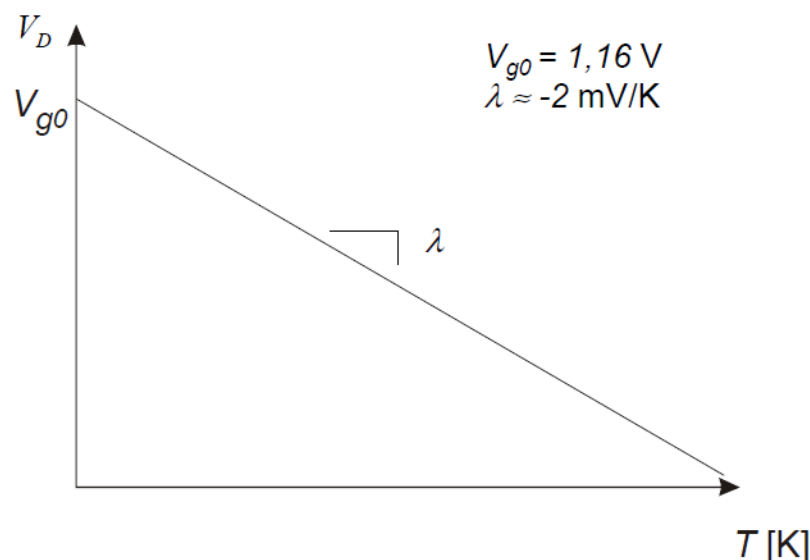
$$n_i^2 \propto T^3 \exp(-qV_g / kT) \quad D = (kT / q) \mu$$

$$n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT} \text{ electrons / cm}^3$$

$$\mu \propto T^{-n}$$

$$L = \sqrt{D \tau}$$

Efeito da temperatura em um diodo operando em polarização direta com corrente (I_D) constante



Capacitância de Difusão

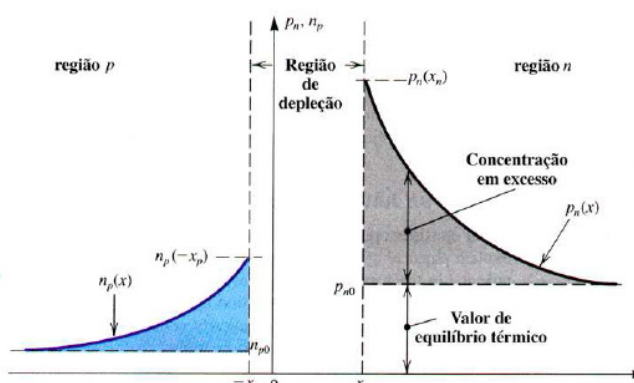
Carga de portadores minoritários armazenada em excesso

$$Q = Aq \times \text{área embaixo da exponencial } p_n(x) \\ = Aq \times [p_n(x_n) - p_{n0}]L_p$$

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

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

τ_T é chamado tempo médio de trânsito do diodo



Capacitâncias em um diodo

Capacitância de Difusão

- Predominante na polarização direta
- Acúmulo de portadores minoritários nas regiões quase neutras

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

Capacitância de Depleção

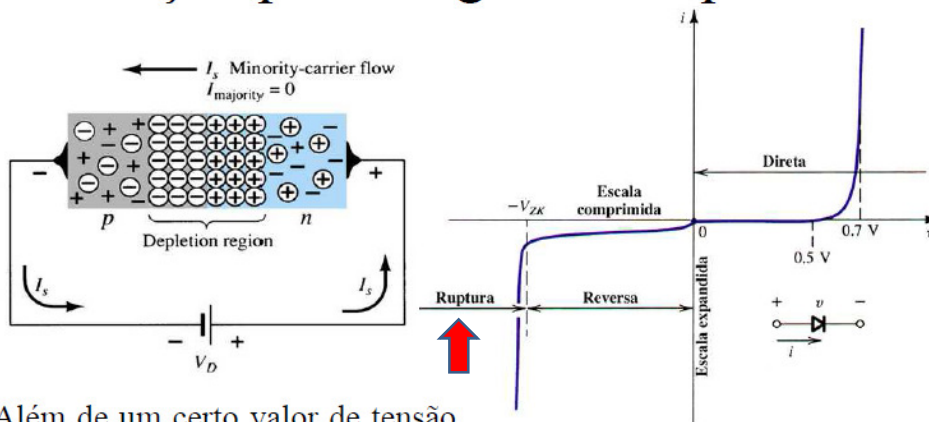
- Predominante na polarização reversa
- Acúmulo de cargas na camada de depleção

$$C_j = \frac{\epsilon_{si} A}{W_{dep}} = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_0} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Aproximação na polarização direta:

$$C_j = 2C_{j0}$$

Junção pn na região de ruptura



Além de um certo valor de tensão reversa (que depende do diodo) ocorre a ruptura, e a corrente aumenta rapidamente com um pequeno aumento correspondente da tensão.

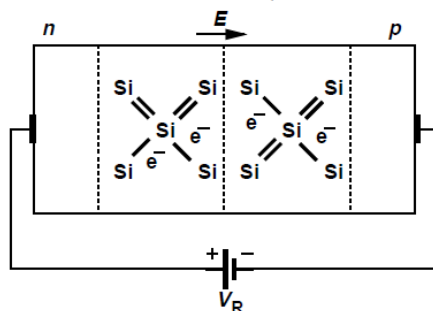
- Efeito Zener
- Efeito Avalanche

Efeito Zener

- O campo elétrico da camada de depleção pode aumentar até um ponto capaz de quebrar ligações covalentes gerando pares elétron-lacuna

$$W_T = W_{dep} = W_N + W_P = \left(\frac{2\epsilon_{Si} V_0}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$3 \text{ V} \leq V_Z \leq 8 \text{ V}$$



Junções com alta dopagem

Região de depleção reduzida

Campos elétricos intensos

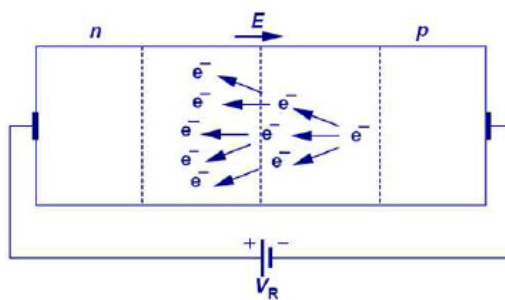
$$10^6 \text{ V/cm} = 1 \text{ V}/\mu\text{m}$$

Avalanche

- Portadores minoritários cruzam a região de depleção e ganham energia cinética suficiente que podem quebrar ligações covalentes

$$V \geq 7 \text{ V}$$

Ionização por impacto



Fontes de figuras da aula

- Aula do prof. Fabiano Fruett
- Introdução à física dos semicondutores (H.A. Mello)
- Fundamentos da microeletrônica (Razavi)
- Microeletrônica (Sedra)

Sugestão de estudo

- Sedra/Smith Cap. 3 até seção 3.3.6
- Razavi Cap. 2 seções 2.2 e 2.3
 - Exercícios e problemas correspondentes