Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

DATA / /

GRAUS 1 2 3 4 5

Aluno: Aula Teórica #2

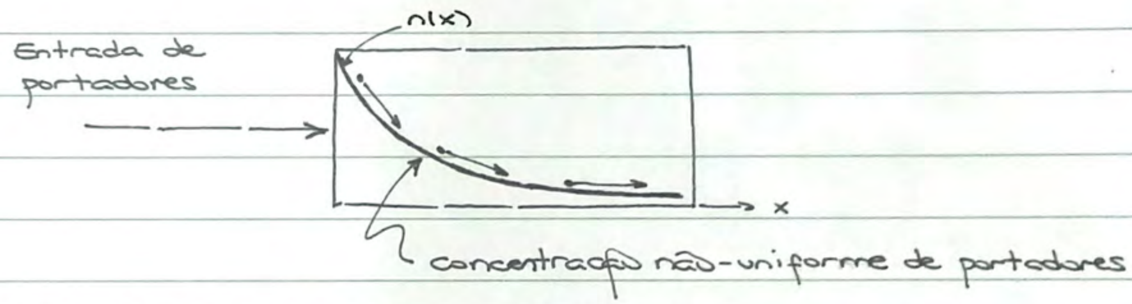
Disciplina: EEL315 — Eletrônica I

Turma:

Professor: José Gabriel

1.1.3 Transporte de Portadores (continuação)

Difusão: fluxo de corrente sem a aplicação (ou na ausência) de um campo elétrico. Os portadores criam uma corrente elétrica, desde que a não-uniformidade (da concentração de portadores) seja mantida.



A corrente de difusão é dada por $I = A q D_n \frac{dn}{dx}$

A: área da secção transversal do semicondutor ; $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C

D_n: constante de difusão (portadores n)

No silício intrínseco, temos $\boxed{\begin{array}{l} D_n = 34 \ cm^2/s \\ D_p = 12 \ cm^2/s \end{array}}$

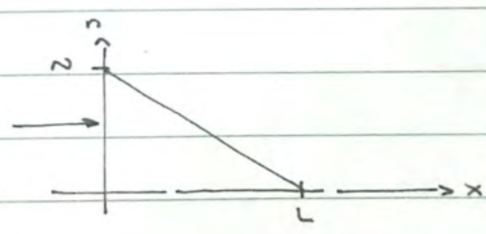
Densidades de corrente de difusão:

$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx} \quad e \quad J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

$\left(J_p = - q D_p \frac{dp}{dx} \right)$ note

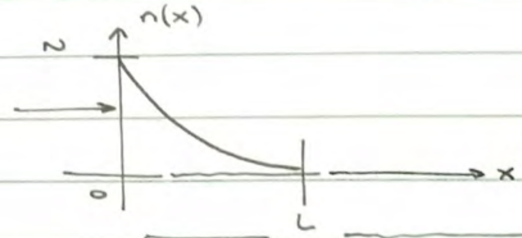
Então: $\boxed{J_{total} = q\left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right)}$

Exemplo:



Neste caso, $J_n = - q D_n \frac{N}{L}$

Exemplo:



$$n(x) = N e^{\frac{-x}{L_y}}$$

Então: $$\boxed{J_n = -q D_n \frac{N}{L_y} e^{-\frac{x}{L_y}}}$$ (!)

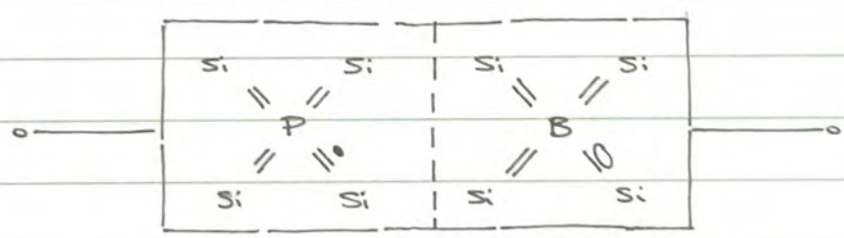
(!) Neste exemplo, a corrente diminui ao longo do eixo x. Os elétrons desaparecem ao viajar de $x=0$ para $x=L$!!

Relação de Einstein: $$\boxed{\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}}$$ ($\simeq 26$ mV @ $T = 300$ K)

1.2 Junção pn (Diodo)

Tem aplicação geral em (micro)eletrônica. Está entre os dispositivos semicondutores mais simples. É um bloco básico do transistor.

catodo  anodo



Junção pn em Equilíbrio

Região de ~~Depel~~ Depleção

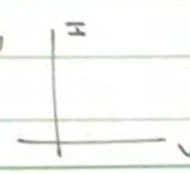
Barreira de Potencial Interna

Junção pn em Polarização Reversa

Capacitência de Junção

Junção pn em Polarização Direta

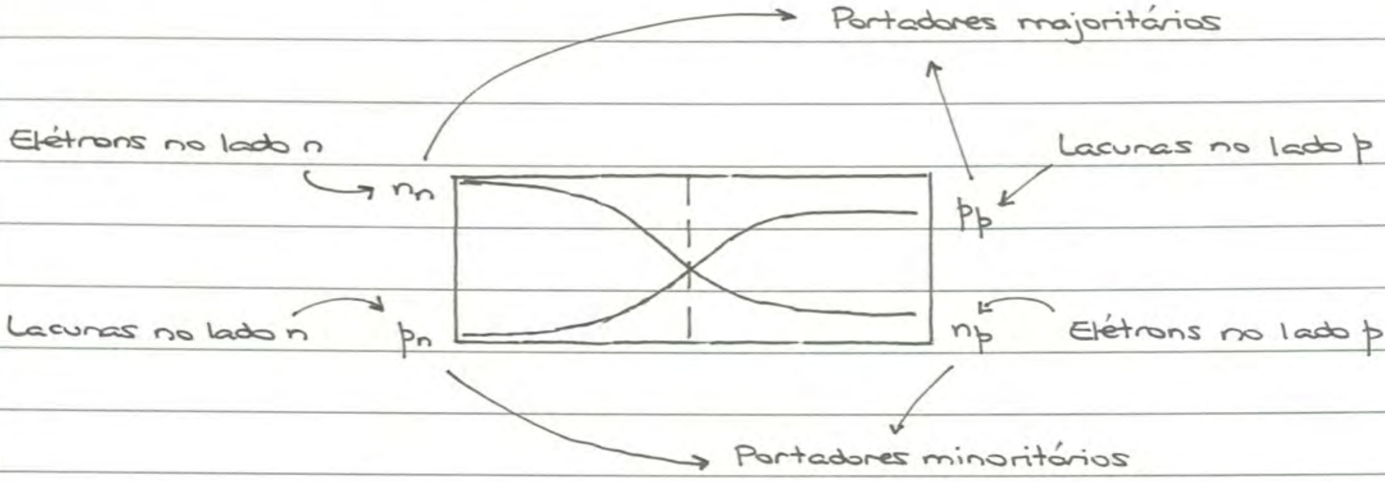
Características I vs. V



ATO2 - 02

1.2.1 Junção pn em Equilíbrio

É a junção pn sem voltagem aplicada externamente a ela.



<u>Exemplo:</u> $N_A = 10^{16}/cm^3$; $N_D = 5 \times 10^{15}/cm^3$

Então: $p_p \cong N_A = 10^{16}/cm^3$ e $n_p \cong n_i^2/N_A = 1.1 \times 10^4/cm^3$

$n_n \cong N_D = 5 \times 10^{15}/cm^3$ e $p_n \cong n_i^2/N_D = 2.3 \times 10^4/cm^3$

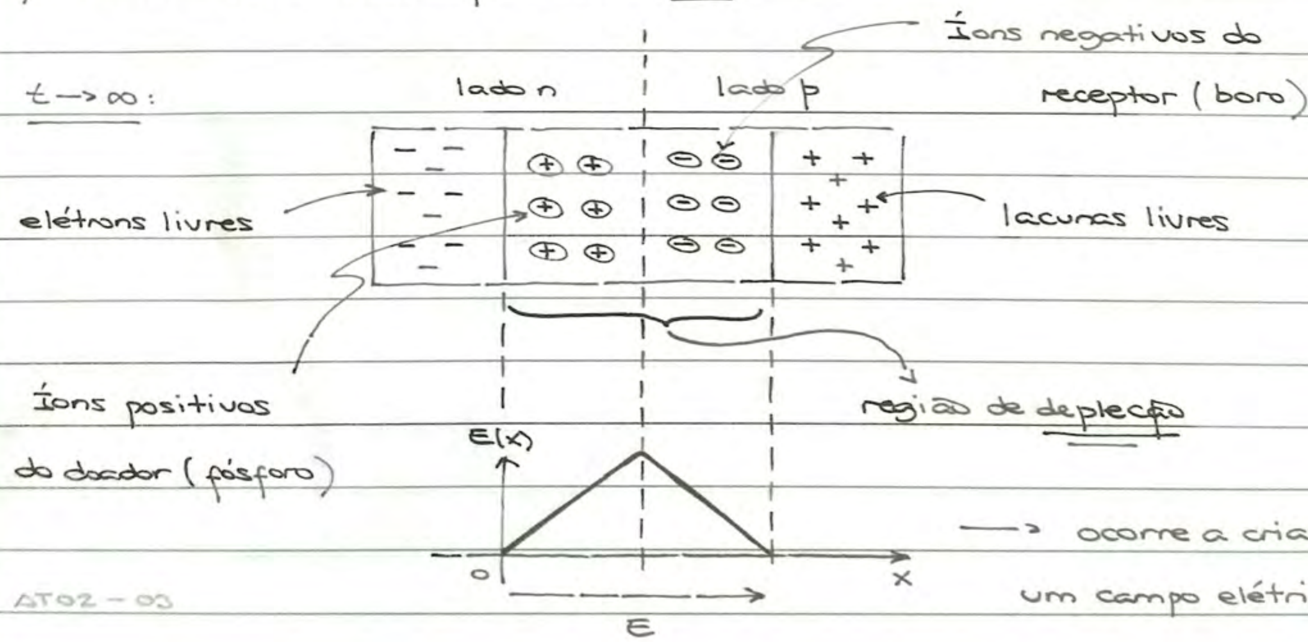
<u>Exemplo:</u> $N_A = 10^{16}/cm^3$; $N_D = 1.25 \times 10^{15}/cm^3$

Então: p_p e n_p são iguais aos do exemplo anterior.

$n_n \cong N_D = 1.25 \times 10^{15}/cm^3$ e $p_n \cong n_i^2/N_D = 9.2 \times 10^4/cm^3$

Primeiramente (na formação da junção), as correntes de difusão são elevadas. Logo em seguida, as correntes de difusão páram. Por quê? Concentrações iguais de portadores? Não. Formação de íons? <u>Sim</u>.

<u>$t \to \infty$:</u>



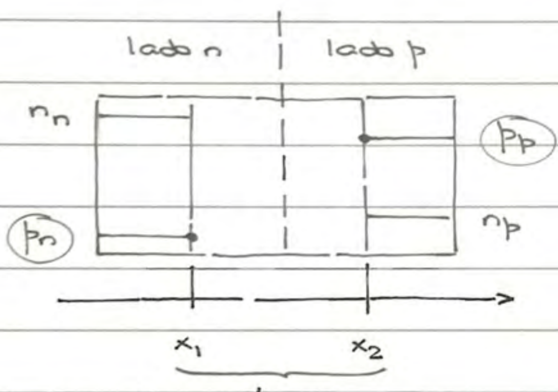
→ ocorre a criação de um campo elétrico!!

O campo elétrico é devido à presença de partículas com carga "líquida" diferente de zero, que são justamente os íons. Na junção pn em equilíbrio, o campo elétrico é forte o suficiente para interromper completamente as correntes de difusão. A condição de equilíbrio entre as correntes de deriva e de difusão, para cada tipo de portador, é a seguinte:

$$|I_{drift,p}| = |I_{diff,p}| \quad e \quad |I_{drift,n}| = |I_{diff,n}|$$

— Potencial "Built-In" (Barreira de Potencial):

Cálculo do valor (voltagem) da barreira de potencial:



V_0: diferença de voltagem entre as extremidades da região de depleção:

$$q\mu_p p E = q D_p \frac{dp}{dx}$$

$$-\mu_p p \frac{dV}{dx} = D_p \frac{dp}{dx}$$

$$-\mu_p \, dV = D_p \frac{dp}{p}$$

$$-\mu_p \int_{x_1}^{x_2} dV = D_p \int_{p_n}^{p_p} \frac{dp}{p}$$

$$V(x_2) - V(x_1) = -\frac{D_p}{\mu_p} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

$$\boxed{V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)} \quad \Longleftarrow \quad |V_0| = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

Exemplo: $N_A = 2 \times 10^{16} / cm^3$; $N_D = 4 \times 10^{16} / cm^3$; $T = 300\ K$.

Então: $V_0 \cong 26\ mV \times \ln(6.84 \times 10^{12}) = 768\ mV$

Exemplo: se multiplicarmos N_A ou N_D por 10, a variação de V_0 é de somente 60 mV:

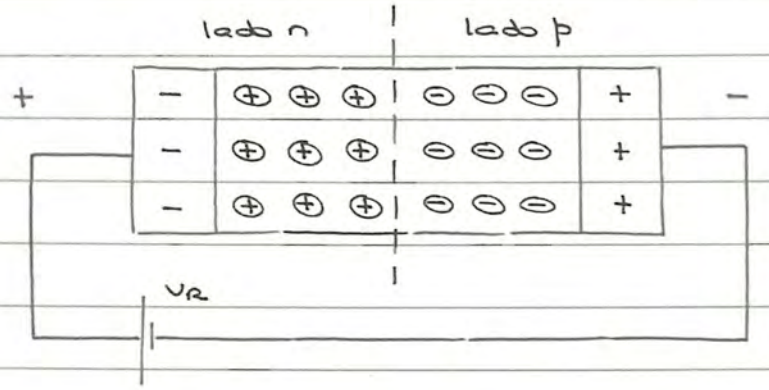
$$\Delta V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{10 N_A N_D}{n_i^2}\right) - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

$$\Delta V_0 = \frac{kT}{q} \ln 10 \cong 60\ mV$$

"voltagem térmica"

Obs.: $\boxed{V_T \triangleq \frac{kT}{q}}$

1.2.2 Junção pn em Polarização Reversa



A voltagem reversa torna o lado n mais positivo do que o lado p.

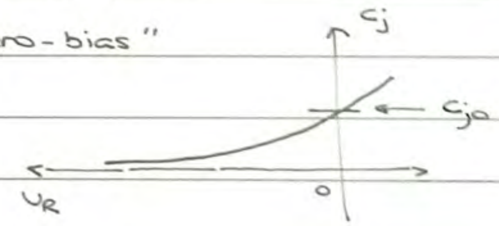
A voltagem de polarização reversa (V_R) reforça o campo elétrico interno ("built-in electric field"). A barreira de potencial se torna mais forte do que em equilíbrio. Mais íons (aceitador (boro) ou doador (fósforo)) ficam expostos. A região de depleção se torna mais larga. Podemos pensar nas partes onde ainda há portadores (n ou p) como sendo as placas de um capacitor. À medida em que as placas se afastam entre si, a capacitância da junção diminui. A junção pn possui, portanto, capacitância dependente de V_R (a capacitância é função não-linear de V_R, neste caso):

$$\boxed{C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}}}$$

, onde $C_{j0} = C_j \Big|_{V_R = 0}$

"zero-bias"

$$\boxed{C_{j0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{Si} \cdot q}{2} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot \frac{1}{V_0}}}$$



Constante dielétrica do silício: $\boxed{\varepsilon_{Si} = 11.7 \times 8.85 \times 10^{-14}\ F/cm}$

Exemplo: $N_A = 2 \times 10^{16}/cm^3$; $N_D = 9 \times 10^{15}/cm^3$; $V_R = 0$

Então: $V_0 = V_T \ln\left(N_A N_D / n_i^2\right) = 0.73\ V$

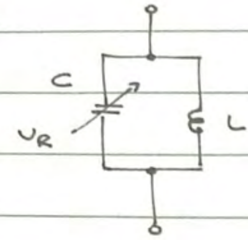
$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{Si} q}{2} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot \frac{1}{V_0}} = 2.65 \times 10^{-8}\ F/cm^2$$

(ou $C_{j0} = 0.265\ fF/\mu m^2$) (femtofarad / μm^2)

Se $N_A = 2 \times 10^{16}/cm^3$; $N_D = 9 \times 10^{15}/cm^3$ e $V_R = 1V$,

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

Exemplo:



A área da seção transversal da junção é 2000 μm^2. Considere que o circuito tem "frequência de ressonância" $f_0 = 1/\sqrt{LC} \times 1/(2\pi) = 2$ GHz, se $V_R = 0$ V. Vamos ver qual é a variação de f_0 obtida ao variarmos V_R de 0 V até 2 V. A junção pn é a mesma do exemplo anterior.

Resolvendo: $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 2$ GHz $\longrightarrow$ Então, $L = 11.9$ nH

$C = 0.265 \times 2000 = 530$ fF (nanohenry)

Se $V_R = 2$ V, então $C = \dfrac{530}{\sqrt{1+\dfrac{2}{0.73}}} = 274$ fF

E portanto $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \Longrightarrow f_0 = 2.79$ GHz