

Propriedades Gerais dos Semicondutores

Prof. Dr. João Antonio Martino

Metais SEMPRE conduzem eletricidade

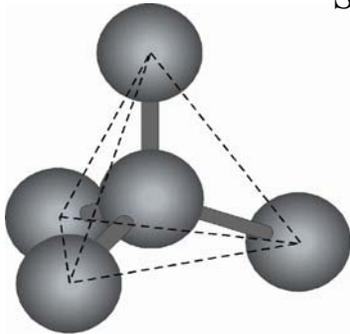
(na chuva e no sol, na riqueza e na pobreza, na saúde e na doença...)

Isolantes NUNCA conduzem eletricidade

(se houver corrente, algo definitivamente errado deve estar acontecendo...)

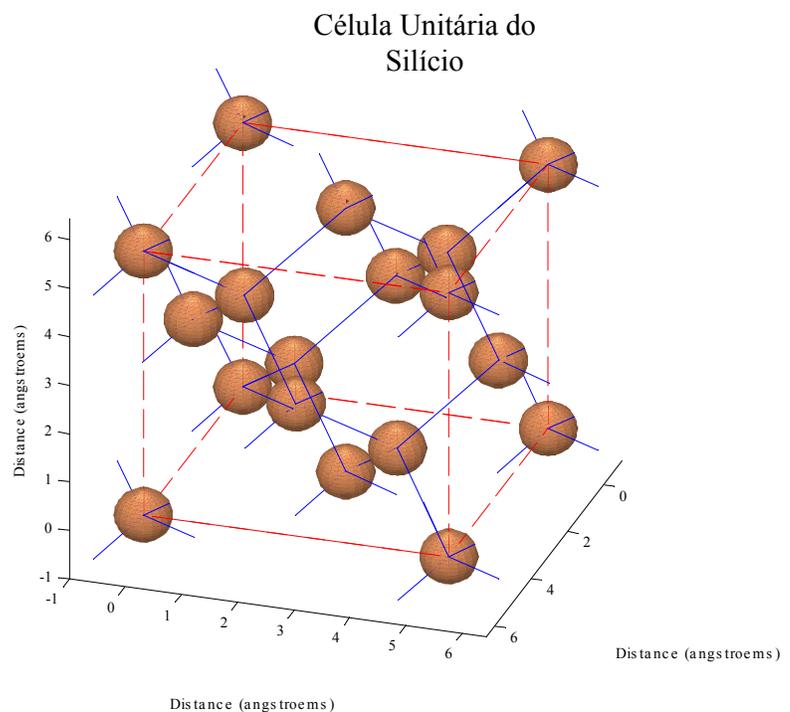
E os Semicondutores, dependem....

(Dependem da temperatura, pureza, campo elétrico, etc)



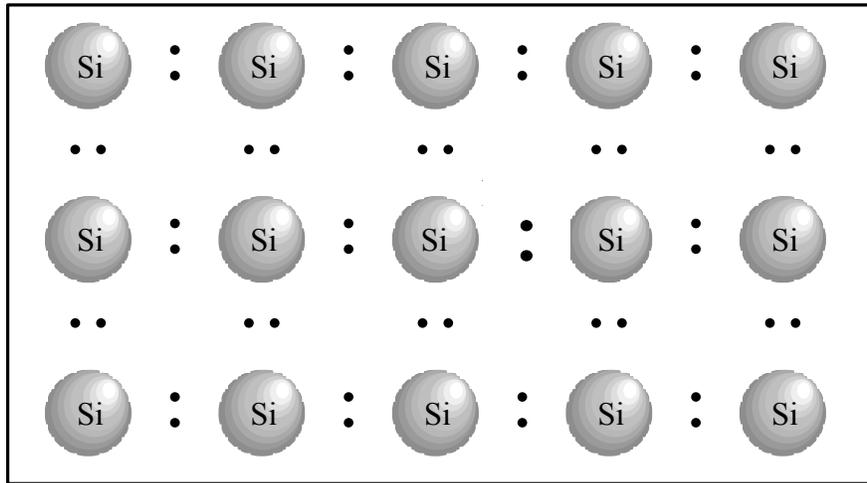
Átomos de semicondutores como o Silício e o Germânio pertencem a coluna IV da tabela periódica em têm 4 elétrons na última camada. Em uma estrutura cristalina estes átomos estão conectados através de ligações covalentes a mais 4 átomos de silício para completar os 8 necessários para sua estabilização. Cada átomo é como o centro de um tetraedro onde os cantos estão ocupados pelos 4 átomos de silício.

Silício: posição dos átomos no cristal



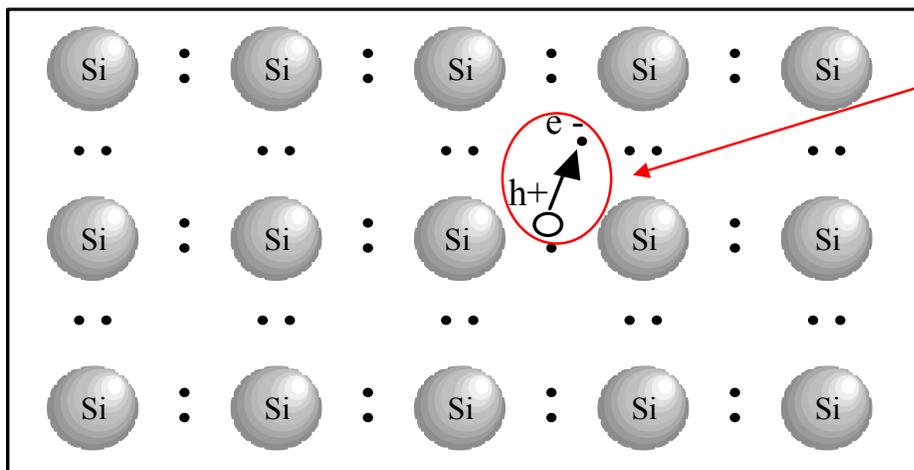
Um centímetro cúbico de silício contém 50,000,000,000,000,000,000 átomos

Utilizando uma representação bidimensional (simplificação), cada átomo de silício (4 elétrons na última camada) precisa de 4 ligações covalentes (4 átomos de Si) para atingir a estabilidade.



Em 0 Kelvin todos os elétrons estão presos em suas ligações covalentes

Em temperatura maior que 0 K (temperatura ambiente, por exemplo, $T = 300\text{ K}$), elétrons podem adquirir energia suficiente (ionização térmica) para escapar da ligação covalente.



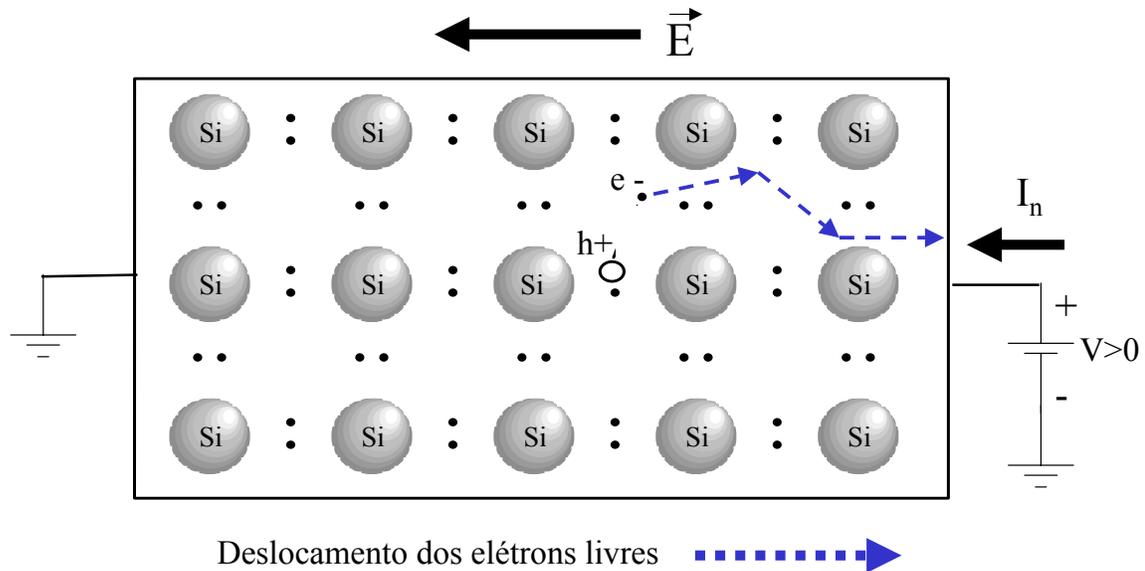
Geração do par
Elétron(e^-)-lacuna(h^+)

n = conc. de elétrons
 p = conc. de lacunas

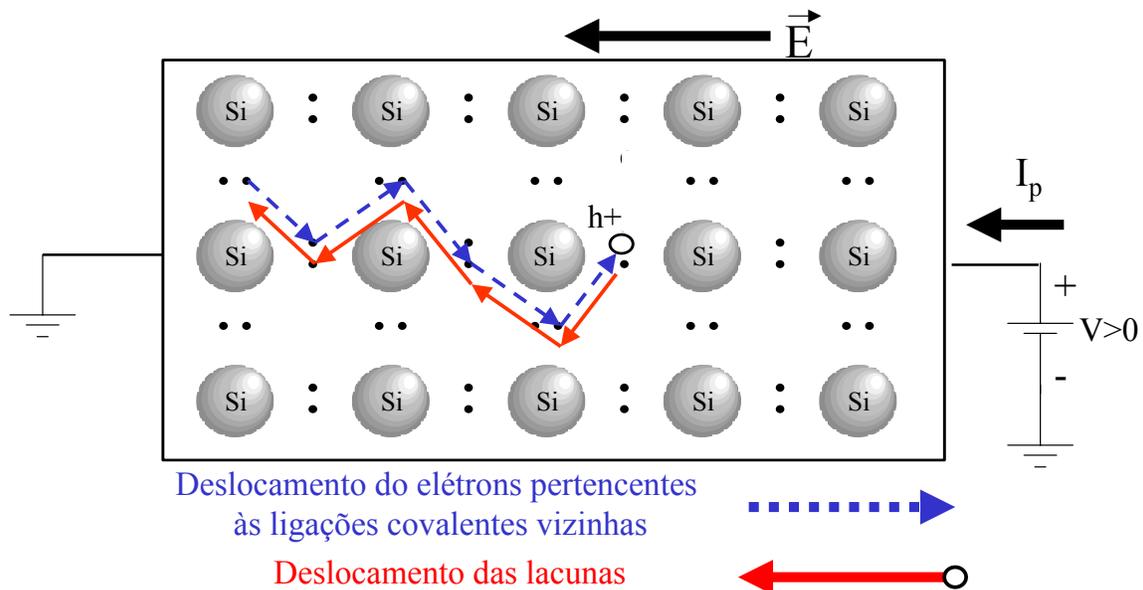
n_i = conc. intrínseca
 $n = p = n_i$

Neste processo, chamado de Geração de portadores, o elétron torna-se livre e deixa no seu lugar um buraco (lacuna) que também apresentará característica de portador de corrente.

O elétron gerado encontra-se livre para se deslocar dentro do silício. Por exemplo, se for aplicada uma tensão como indicada abaixo, o campo elétrico induzirá o deslocamento dos elétrons no sentido inverso ao do campo elétrico. A corrente convencional associada (I_n), porém, terá o mesmo sentido do campo elétrico, como de praxe.



A lacuna gerada pode ser ocupada por um outro elétron vizinho (também pertencente a uma ligação covalente), que por sua vez deixará uma lacuna no seu lugar e assim sucessivamente. Por exemplo, se for aplicada uma tensão como indicada abaixo, o campo elétrico induzirá o deslocamento dos elétrons pertencentes às ligações covalentes no sentido inverso ao do campo elétrico. O processo também pode ser visto como o deslocamento de lacunas no mesmo sentido do campo elétrico, com carga positiva de carga equivalente a do elétron em módulo. A corrente convencional associada (I_p) terá neste caso o mesmo sentido do deslocamento das lacunas.



Concentração Intrínseca

$$n_i (T) = [B \cdot T^3 \cdot e^{-E_G/kT}]^{1/2}$$

- B = parâmetro que depende do material
($B = 5,4 \times 10^{31} /K^3 \cdot cm^3$ para o silício)
- T = temperatura em Kelvin
- E_G = Energia mínima para quebrar uma ligação covalente (1,12 eV para o silício)
- $K = 8,62 \cdot 10^{-5} eV/K$

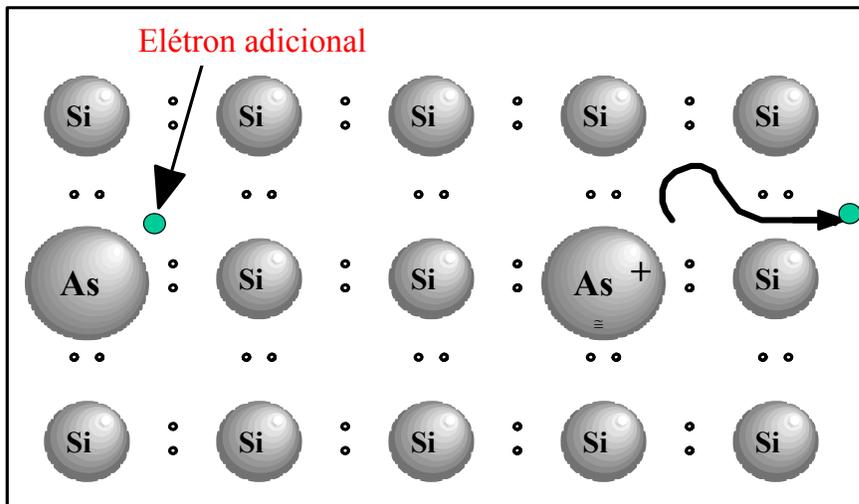
Exemplo: Para $T = 300 K \rightarrow n_i = 1,45 \cdot 10^{10}$ portadores/cm³, ou seja, $1,45 \cdot 10^{10}$ elétrons/cm³ e $1,45 \cdot 10^{10}$ lacunas/cm³, já que no silício intrínseco $n = p = n_i$

Lembrar que o silício tem $5 \cdot 10^{22}$ átomos de silício/cm³

Dopagem do Silício

| I | II | III | IV | V | VI | VII | 0 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| H • | | | | | | | He •• |
| Li • • | Be • • | B • • | C • • | N • • | O • • | F • • | Ne • • |
| Na • • | Mg • • | Al • • | Si • • | P • • | S • • | Cl • • | Ar • • |
| K • • | Ca • • | Ga • • | Ge • • | As • • | Se • • | Br • • | Kr • • |
| Rb • • | Sr • • | In • • | Sn • • | Sb • • | Te • • | I • • | Xe • • |
| Cs • • | Ba • • | Tl • • | Pb • • | Bi • • | Po • • | At • • | Rn • • |

Silício Tipo N (elétrons adicionais)



Elétron livre se deslocando

Em equilíbrio térmico :

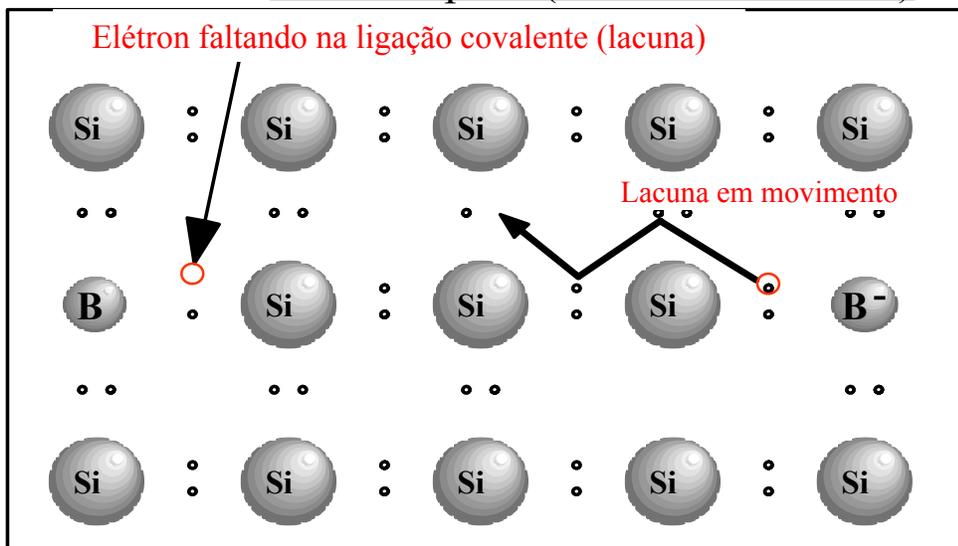
$$n.p = ni^2$$

$$n = N_D + ni \cong N_D$$

$$p = \frac{ni^2}{n} = \frac{ni^2}{N_D}$$

No processo de dopagem do silício com elementos PENTAVALENTES (Arsênio por exemplo), cada átomo de arsênio que ocupa a posição de um átomo de silício doa um elétron livre para a estrutura cristalina (DOADORA), já que os 4 outros estarão fazendo parte das ligações covalentes. Quando este elétron se distancia das proximidades do arsênio, diz-se que o átomo ficou “ionizado” com carga positiva igual em módulo à carga do elétron perdido.

Silício Tipo P (lacunas adicionais)



Elétron faltando na ligação covalente (lacuna)

Lacuna em movimento

Em equilíbrio térmico :

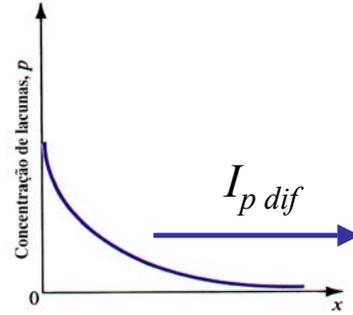
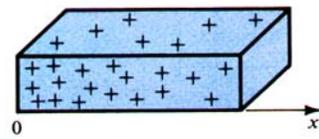
$$n.p = ni^2$$

$$p = N_A + ni \cong N_A$$

$$n = \frac{ni^2}{p} = \frac{ni^2}{N_A}$$

No processo de dopagem do silício com elementos TRIVALENTES (BORO por exemplo), cada átomo de boro que ocupa a posição de um átomo de silício dá origem a uma lacuna para a estrutura cristalina (ACEITADORA), já que uma das ligações covalentes não se concretiza. Quando esta lacuna se desloca das proximidades do boro, diz-se que o átomo ficou “ionizado” com carga negativa igual à carga do elétron que ocupou a lacuna.

Mecanismos de Condução de Corrente em Semicondutores : Difusão



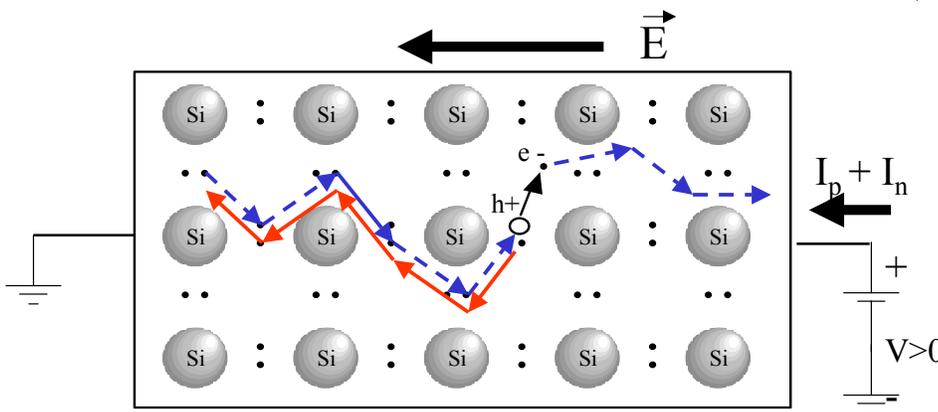
$$J_p = -qD_p |\text{grad}(p)| = -qD_p \frac{dp}{dx} \longrightarrow I_{p\text{ dif}} = -q \cdot A \cdot D_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = -qD_n |\text{grad}(n)| = -qD_n \frac{dn}{dx} \longrightarrow I_{n\text{ dif}} = q \cdot A \cdot D_n \frac{dn}{dx}$$

$$I_{T\text{ dif}} = I_{p\text{ dif}} + I_{n\text{ dif}}$$

D_p e D_n = coeficientes de difusão de lacunas e elétrons respect.
 ($D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$)

Mecanismos de Condução de Corrente em Semicondutores : Deriva (Drift)



Resistividade:

$$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$$

μ_p e μ_n = mobilidade das lacunas e elétrons respectivamente.

$$(\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V.s}, \mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V.s})$$

Relação de Einstein:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$$

$$v_{p\text{-der}} = \mu_p E$$

$$v_{n\text{-der}} = \mu_n E$$

$$J_{p\text{-der}} = qp\mu_p E$$

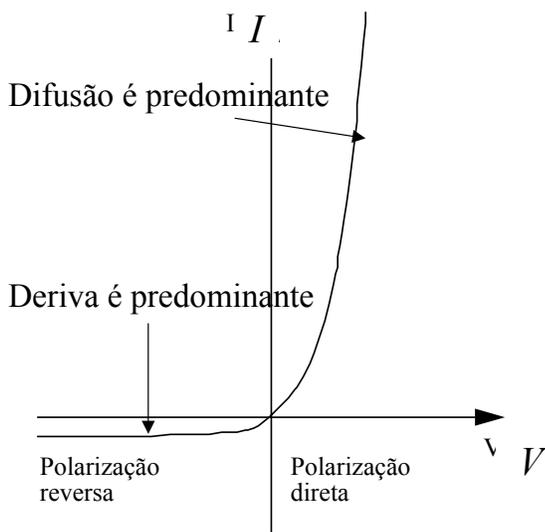
$$J_{n\text{-der}} = qn\mu_n E$$

$$I_{p\text{-der}} = q \cdot A \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

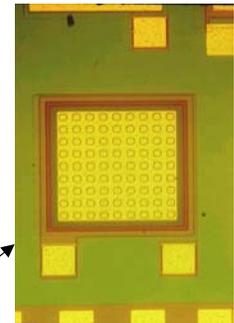
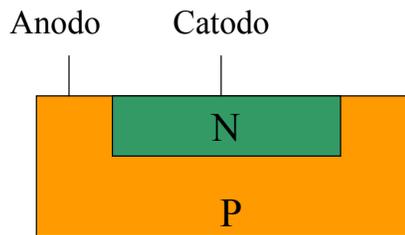
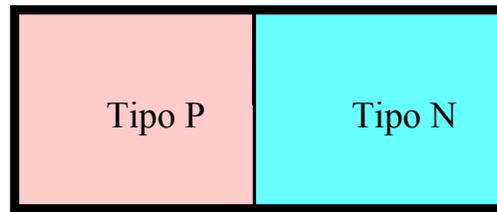
$$I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

$$I_{T\text{-der}} = I_{p\text{-der}} + I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot E \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$

Diodo Semicondutor (Junção PN)



Anodo  Catodo



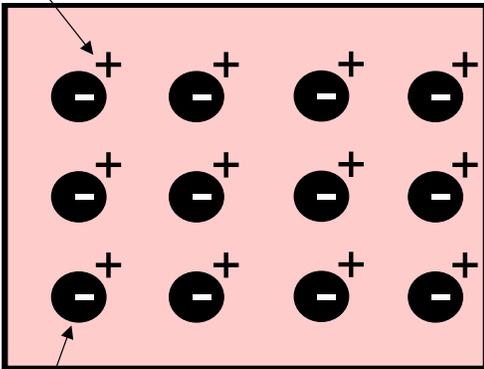
$$I = I_S (e^{V/nV_T} - 1)$$

Foto de um diodo construído na EPUSP

JUNÇÃO PN antes do contato (Modelo de cargas)

Lacunas
(majoritárias)

Si : Tipo P



Si - Tipo P :

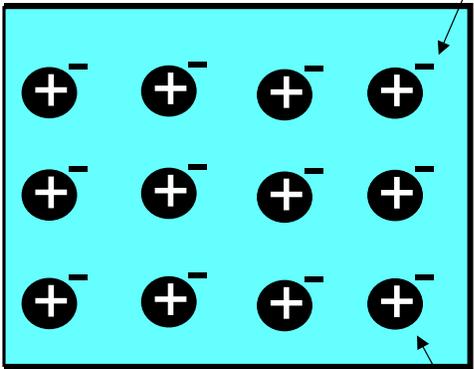
Íons negativos presos a rede cristalina

$$p_{p0} = N_A + n_i \cong N_A$$

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Elétrons livres
(majoritários)

Si : Tipo N



Si - Tipo N :

Íons positivos presos a rede cristalina

$$n_{n0} = N_D + n_i \cong N_D$$

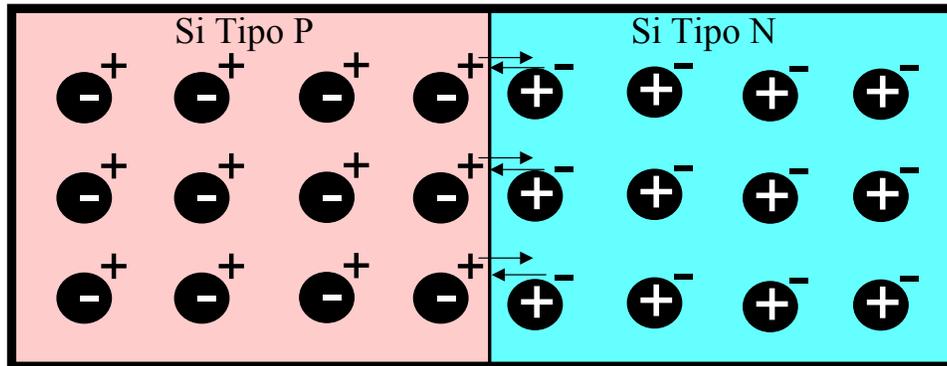
$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

JUNÇÃO PN após o contato (Modelo de cargas)

Logo após o contato ocorrerá o deslocamento de portadores (elétrons e lacunas) por difusão devido a diferença de concentração destes portadores no Si-P e no Si-N.

Desta forma as lacunas se deslocarão do lado P para o lado N ($I_{p\ dif}$) enquanto os elétrons se deslocarão do lado N para o lado P ($I_{n\ dif}$). Note que a corrente total de difusão será a soma das duas componentes.

$$\longrightarrow I_{T\ dif} = I_D = I_{p\ dif} + I_{n\ dif}$$



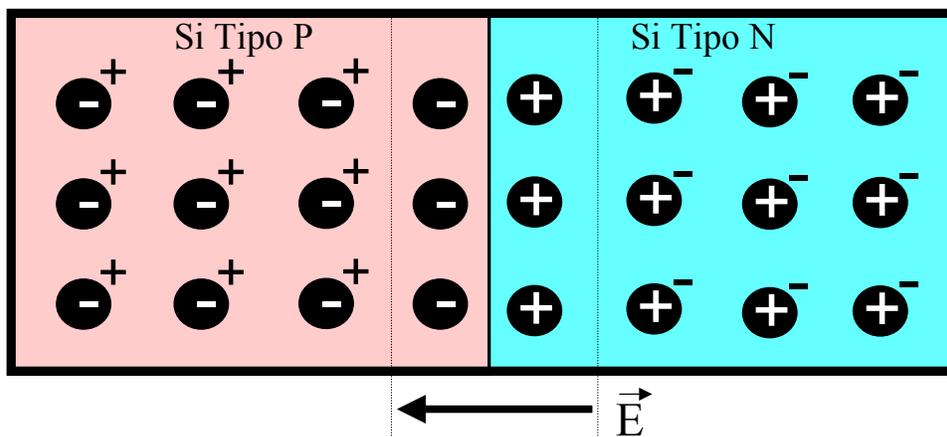
Ao atravessar a junção as lacunas vão se recombinar com os elétrons (desaparece ambos os portadores) formando uma região de carga espacial (região de depleção). Idem para os elétrons que atravessam a junção e se recombinam com as lacunas.

JUNÇÃO PN a caminho do equilíbrio térmico (Modelo de cargas)

A região de carga espacial (região de depleção) criada dará origem a um campo elétrico interno do lado N para o lado P, que dificultará a passagem dos portadores e dará origem a componente de corrente de deriva no sentido inverso ao deslocamento por difusão. Desta

forma as lacunas se deslocarão por deriva do lado N para o lado P ($I_{p\ der}$) enquanto os elétrons se deslocarão por deriva do lado P para o lado N ($I_{n\ der}$). Note que a corrente total de deriva será a soma das duas componentes.

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

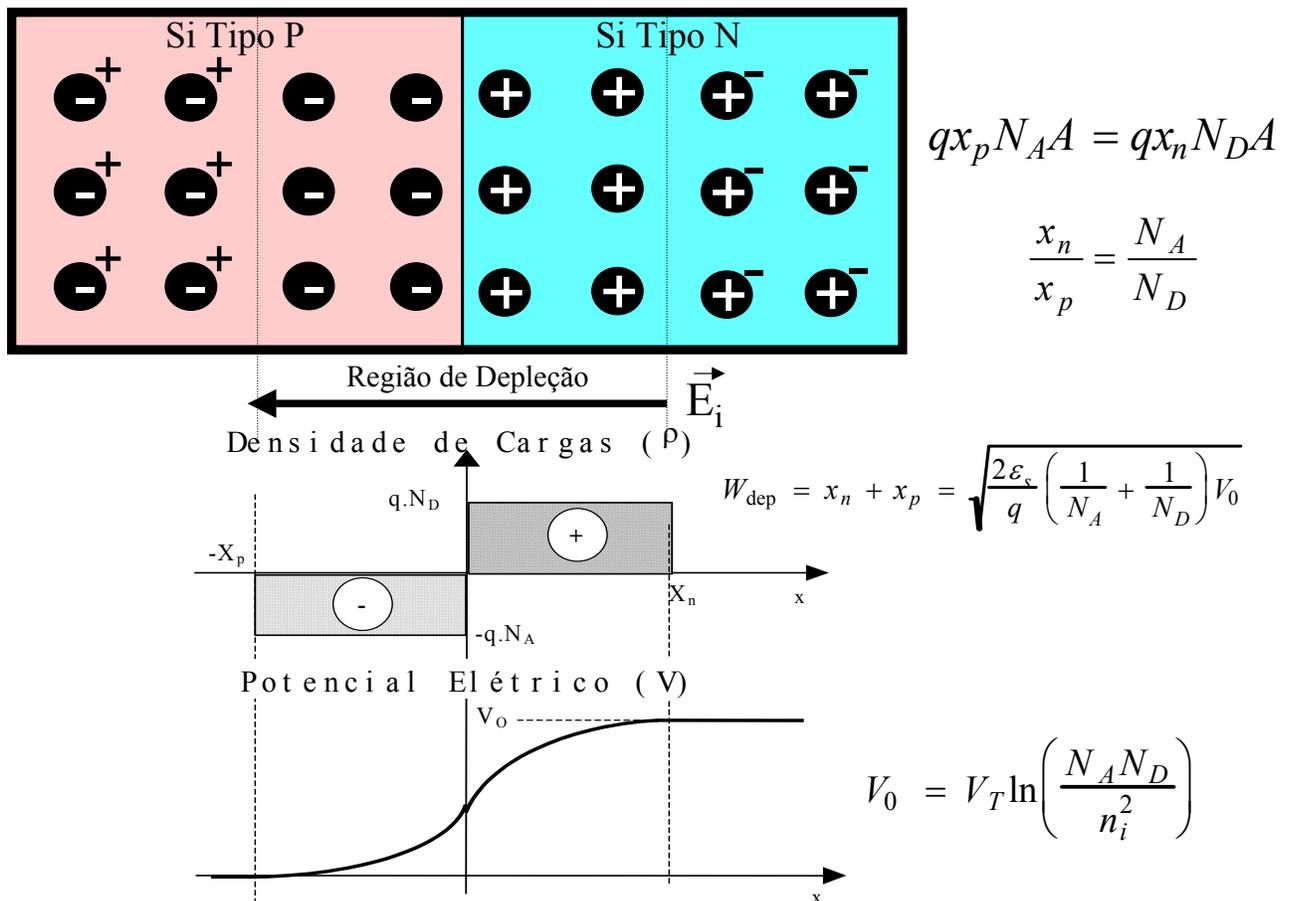
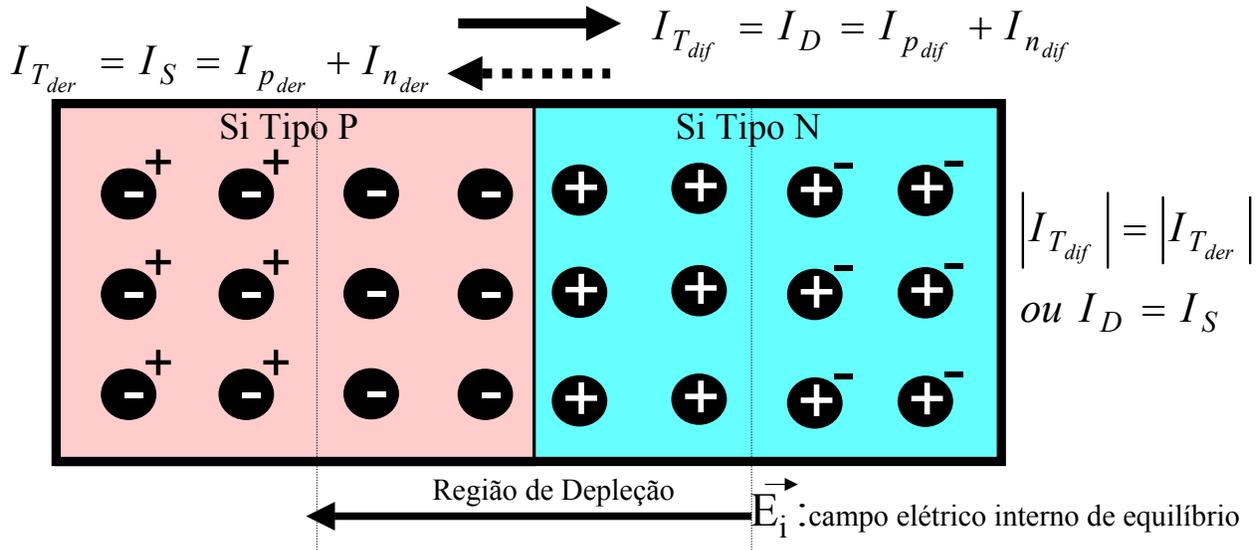


$$\left| I_{T\ dif} \right| > \left| I_{T\ der} \right|$$

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: $I_T = I_T$

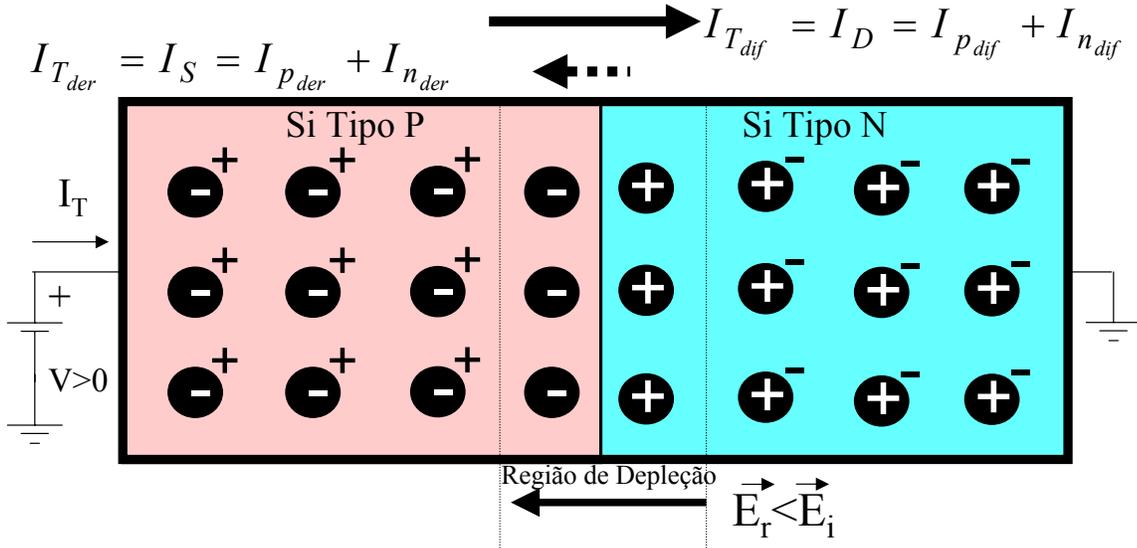
$$I_{dif} + I_{Tder} = 0 \quad (\text{ou } I_D = I_S)$$



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:

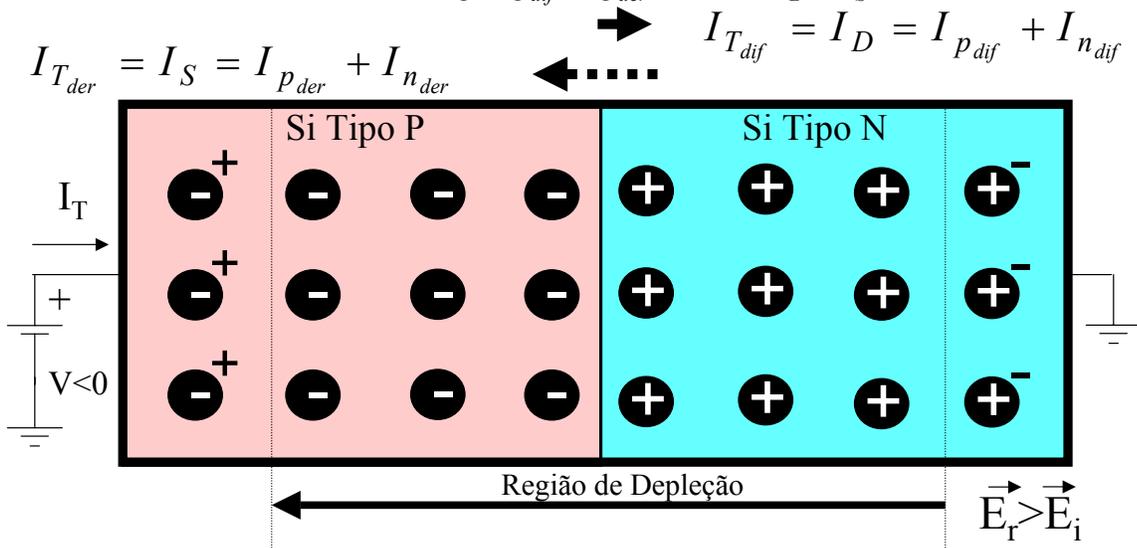
$$I_{T\ dif} + I_{T\ der} > 0 \text{ (ou } I_D > I_S)$$



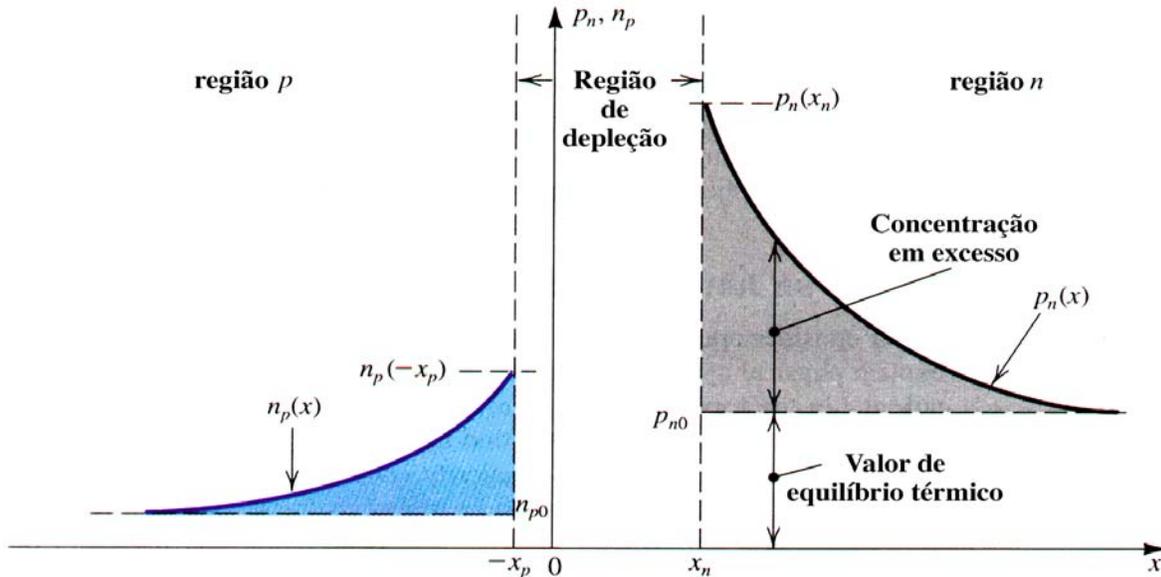
JUNÇÃO PN polarizada reversamente (Modelo de cargas)

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

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



Distribuição de Portadores Minoritários na Junção PN Diretamente Polarizada



Dedução da Equação de Corrente no Diodo

- Concentração de Lacunas no lado N, na borda da região de depleção:

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{V/V_T} \quad (1)$$

onde V é a tensão externa aplicada à junção e $p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$

- Concentração de Lacunas no lado N em EXCESSO:

$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2)$$

L_p é o comprimento de difusão para lacunas: $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

τ_p é o tempo de vida das lacunas em excesso no lado N

Substituindo (1) em (2):

$$p_n(x) = p_{n0} + \left[p_{n0} e^{V/V_T} - p_{n0} \right] e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0} \cdot \left[e^{V/V_T} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$$I_{p\ dif}(x) = -q \cdot A \cdot D_p \frac{dp_n(x)}{dx}$$

$$I_{p\ dif}(x) = q \cdot A \cdot \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$$I_{p\ dif}(x_n) = q \cdot A \cdot \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1)$$

•Analogamente para a difusão de elétrons no lado P:

$$I_{n\ dif}(x_p) = q \cdot A \cdot \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (e^{V/V_T} - 1)$$

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

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

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

O parâmetro n=1 neste caso. Atribui-se valores no intervalo de 1 a 2 devido a efeitos não ideais

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

Onde observa-se que I_S depende principalmente de A, Temperatura(ni) e dopagens.