



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Dispositivos e Circuitos Eletrônicos

AULA 04

Prof. Marcelino Andrade



Dispositivos e Circuitos Eletrônicos

CAPÍTULO 3


MAKRON
Books

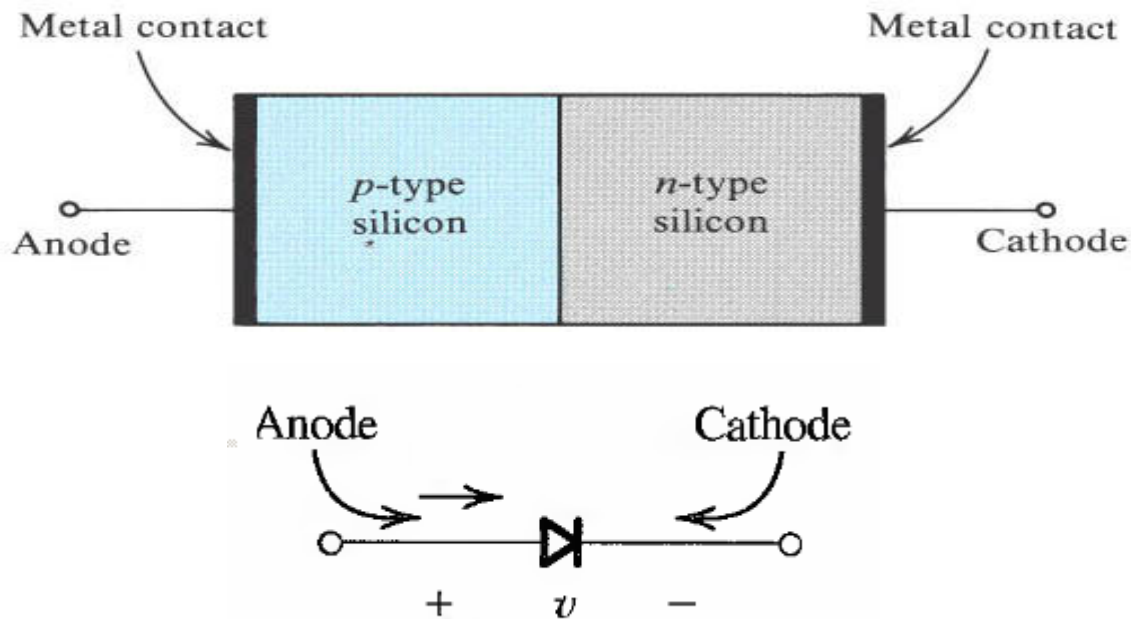
Diodos

-
- | | | | |
|-----|---|------|---|
| | Introdução | | Os Diodos Zener |
| 3.1 | O Diodo Ideal | 3.7 | Circuitos Retificadores |
| 3.2 | Características Elétricas dos Diodos de Junção | 3.8 | Circuitos Limitadores e Grampeadores |
| 3.3 | Operação Física dos Diodos | 3.9 | Tipos Especiais de Diodos |
| 3.4 | Análise de Circuitos com Diodos | 3.10 | O Modelo do SPICE para Diodos e Exemplos de Simulação |
| 3.5 | O Modelo para Pequenos Sinais e Suas Aplicações | | Resumo |
| 3.6 | Operação na Região de Ruptura Reversa – | | Bibliografia |
| | | | Problemas |
-



Semicondutores

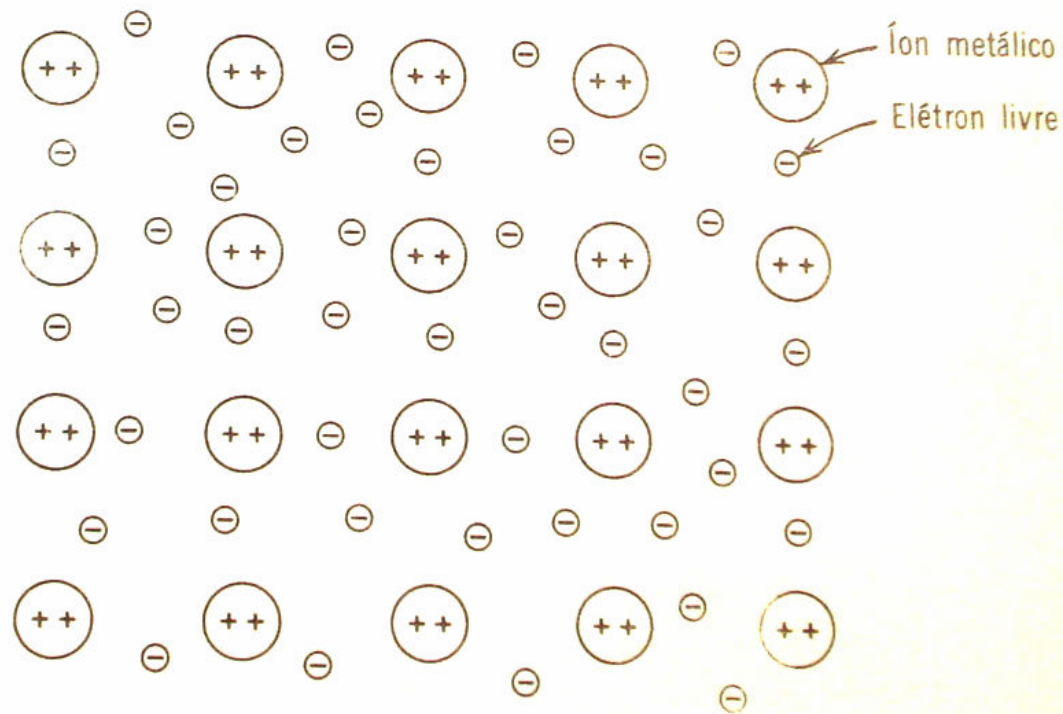
O diodo semicondutor é basicamente uma junção **pn**. Na prática atual, as regiões p e n são partes de um mesmo cristal com “dopagens” diferentes.





Os metais

Teoria do Gás Eletrônico: em um metal os elétrons estão em movimento contínuo, sendo sua direção mudada após cada colisão com os íons pesados. A distância média entre colisões é chamada de *livre caminho médio*.

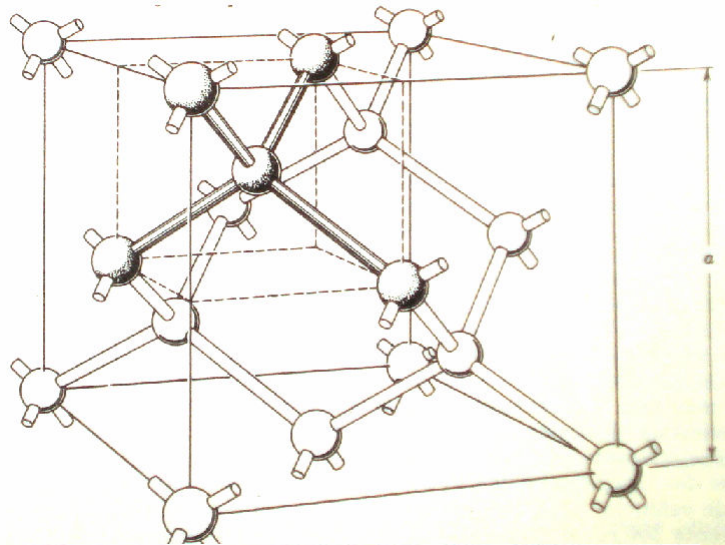


O modelo de um "gás eletrônico"

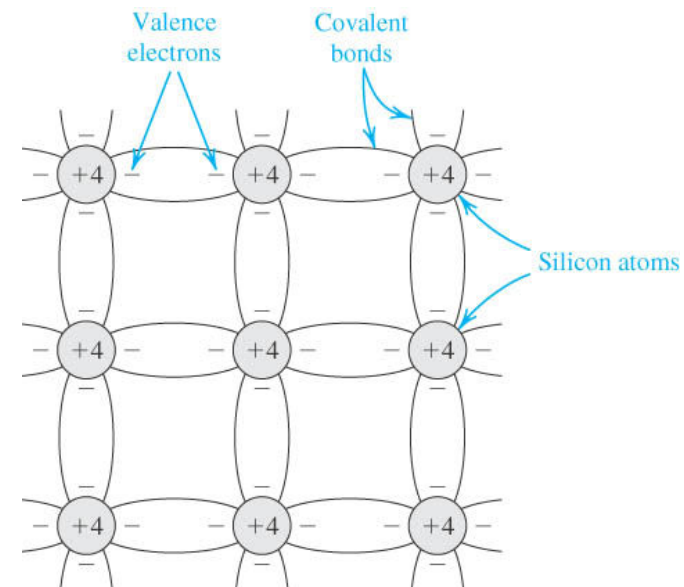


O Silício Intrínseco

- “Um cristal de silício puro ou intrínseco tem uma estrutura com organização atômica regular em que os átomos são mantidos em suas posições por ligações chamadas de ligações covalentes”
Sedra/Smith



Estrutura cristalina do diamante.

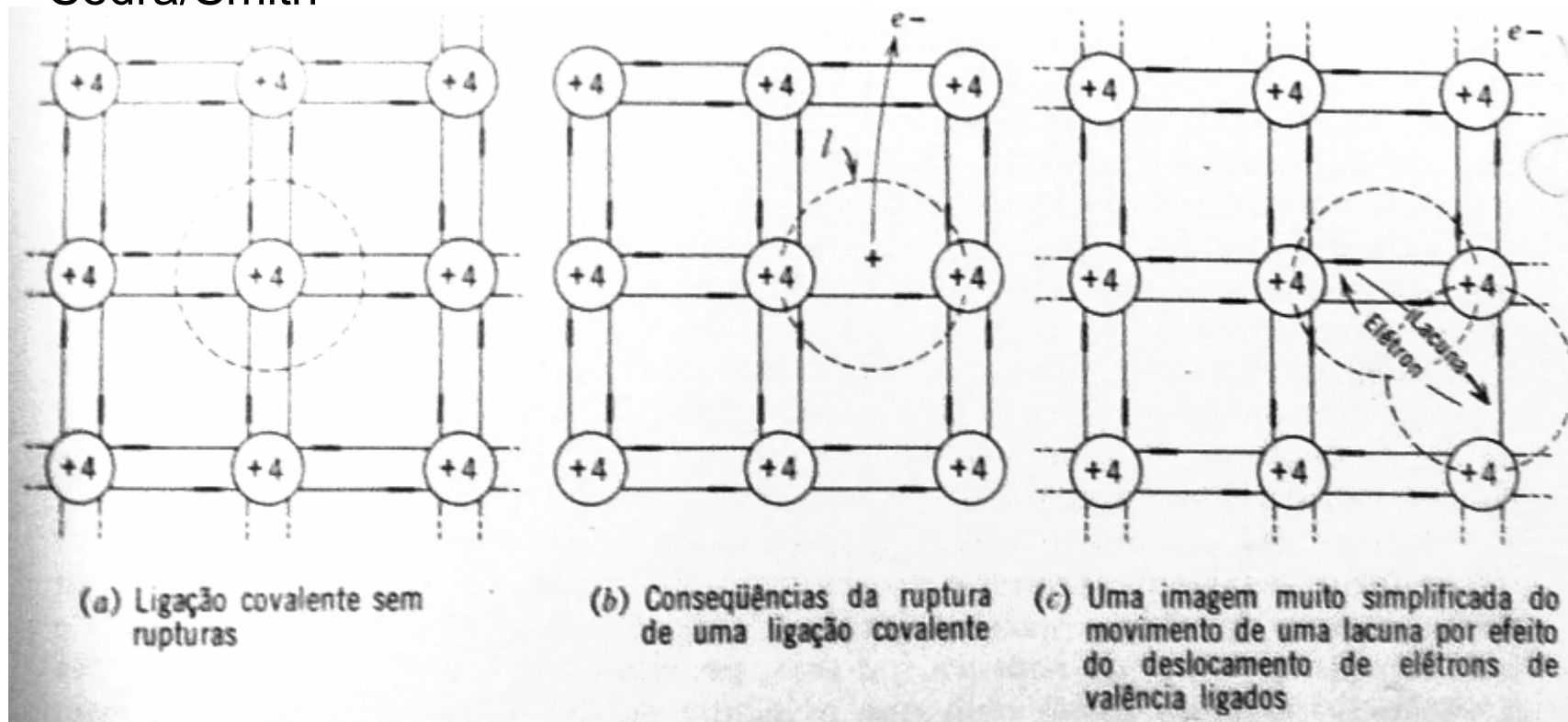


- A temperatura ambiente algumas ligações são rompidas pela ionização térmica e alguns elétrons são libertados, produzindo “elétrons livre” e as chamadas “lacunas”.



O Silício Intrínseco

- **Condução de Corrente Elétrica de Lacunas:** “Um elétron de átomo vizinho pode ser atraído por essa carga positiva (lacuna), deixando a órbita original de seu átomo. Essa ação preenche a “lacuna” que havia no átomo ionizado, mas cria uma nova lacuna no outro átomo”
Sedra/Smith





O Silício Intrínseco

- **Taxa de Recombinação de Elétrons/Lacunas:** a taxa de recombinação é proporcional ao número de elétrons livres e de lacunas, que por sua vez é determinado pela taxa de ionização;
- **A Taxa de Ionização:** função muito dependente da temperatura;
- **No Equilíbrio Térmico?** a taxa de recombinação é igual à de ionização, sendo a concentração de elétrons livres n , igual a de lacunas p .

$$n = p = n_i$$

- Da Física dos Semicondutores, considerando uma temperatura absoluta T

$$n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$$

B - é um parâmetro dependente do material = 5.4×10^{31} for silicon,

E_G - Largura de energia da faixa proibida (energia mínima para romper a ligação covalente) = 1.12 electron volts (eV) for silicon,

K - constante de Boltzmann = 8.62×10^{-5} eV/K.



Mobilidade dos portadores em semicondutores

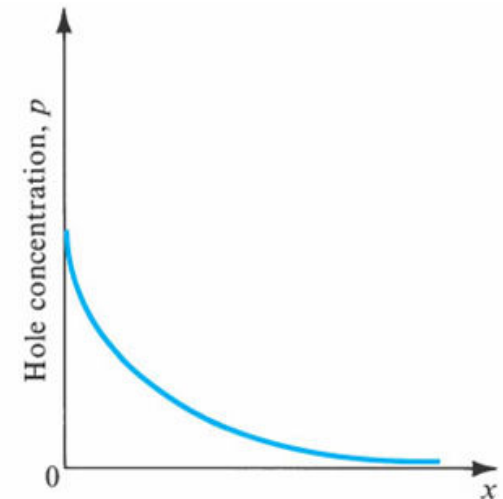
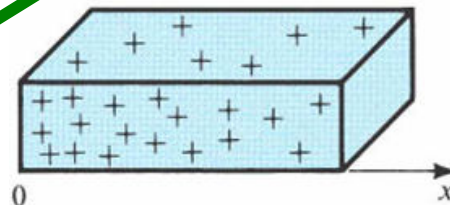
- **Difusão e Deriva:** mecanismos pelos quais as lacunas e os elétrons se movem através de um cristal de silício (Difusão e Deriva).
- **A Difusão:** Esta associada ao movimento aleatório devido a agitação térmica, sendo seu valor proporcional à inclinação da curva de concentração, ou ao gradiente da concentração, naquele ponto

Densidade de Corrente de Lacunas e Elétrons [A/cm^2]

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

Constante de Difusão

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





Mobilidade dos portadores em semicondutores

- **Deriva:** ocorre quando um campo elétrico é aplicado em um pedaço de silício. Elétrons e lacunas livres são acelerados pelo campo elétrico...
- **Velocidade de Deriva de Lacunas [cm/s]:** $v_{drift} = \mu_p E$
 - μ_n é constantes de mobilidade de lacunas, μ_p is typically 480 cm²/V
- **AGORA!** Aplicando em um cristal de silício com densidade de lacunas p e de elétrons livres n sujeito um campo elétrico E , *as lacunas derivarão na mesma direção de E (direção x) e os elétrons no sentido contrário a E .* Assim, temos em 1 segundo atravessará o plano de área A (cm²) a carga $G_p = qp\mu_p EA$ (coulomb) , e dividindo G_p pela Área A , tem-se a densidade de corrente de deriva das lacunas:

$$J_{p-drift} = qp\mu_p E \quad \mu_p E \text{ cm} \longleftrightarrow 1 \text{ second}$$



Mobilidade dos portadores em semicondutores

- Os Elétrons Livres derivarão na direção oposta a de E . Assim, temos uma carga de densidade $(-qn)$ movendo na direção contrária a x , com uma velocidade negativa $(-\mu_n E)$. O resultado de corrente é uma componente de corrente positiva, com sua densidade sendo dada por:

$$J_{n-drift} = qn \mu_n E$$

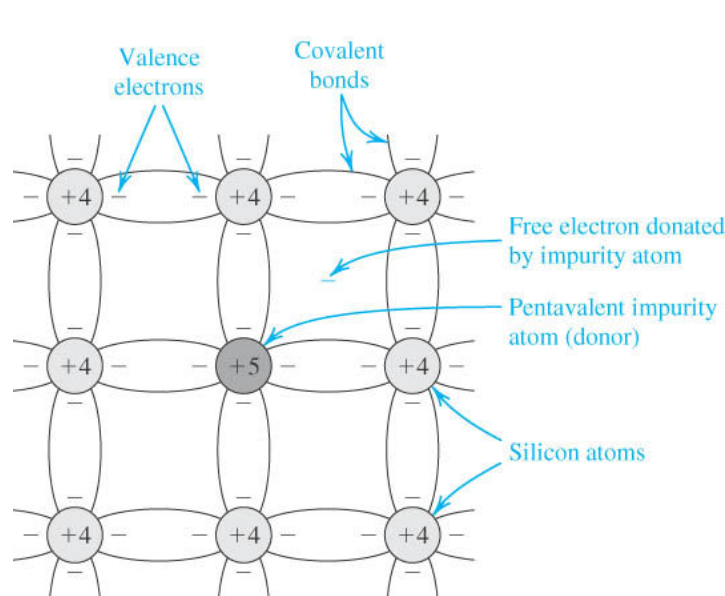
- Densidade total de corrente de deriva: $J_{drift} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$
- Lei de Ohm com resistividade $\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$
- Por fim, a relação de Einstein:

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

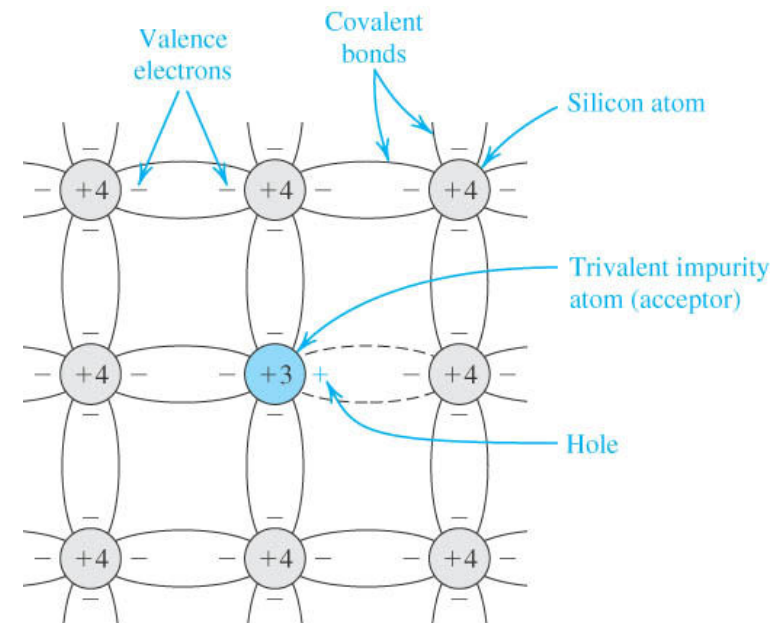


Semicondutor Dopado

- A dopagem de um cristal de silício é obtida pela introdução de um pequeno número de átomos de impureza, tornando o cristal denominado do tipo n ou p.



Impureza pentavalente (ex. fósforo)



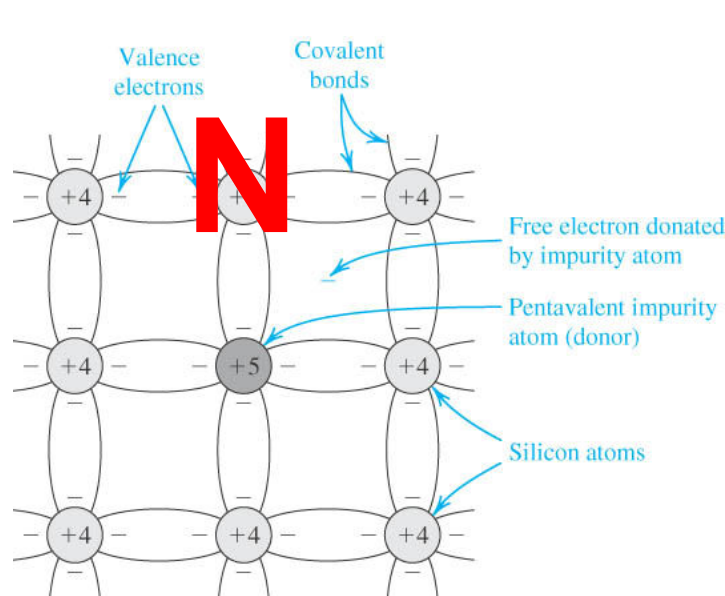
Impureza trivalente (ex. boro)

Quem é do tipo n e do tipo p????

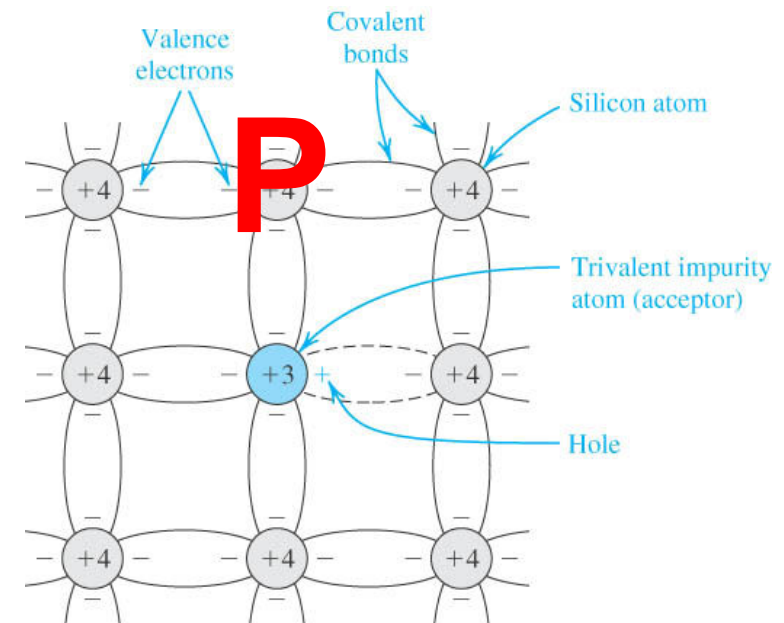


Semicondutor Dopado

- A dopagem de um cristal de silício é obtida pela introdução de um pequeno número de átomos de impureza (doadores ou aceptores), tornando o cristal do tipo n ou p.



Impureza pentavalente (ex. fósforo)



Impureza trivalente (ex. boro)

Quem é do tipo n e do tipo p????



Semicondutor Dopado

- No cristal de silício do tipo **n**, os portadores de cargas majoritárias são os elétrons. Na verdade, se a concentração de átomos doadores (fósforo) for N_D (carga positiva), no equilíbrio térmico a concentração de elétrons livres no silício tipo **n**, n_{n0} , será:

$$n_{n0} \approx N_D$$

OBS.: na verdade $N_D + p = N_A + n$, como $N_A = 0$ e $n \gg p$, temos $n \approx N_D$

- Da física de semicondutores decorre que, em equilíbrio térmico, o produto da concentração de elétrons pela concentração de lacunas permanece constante, isto é:

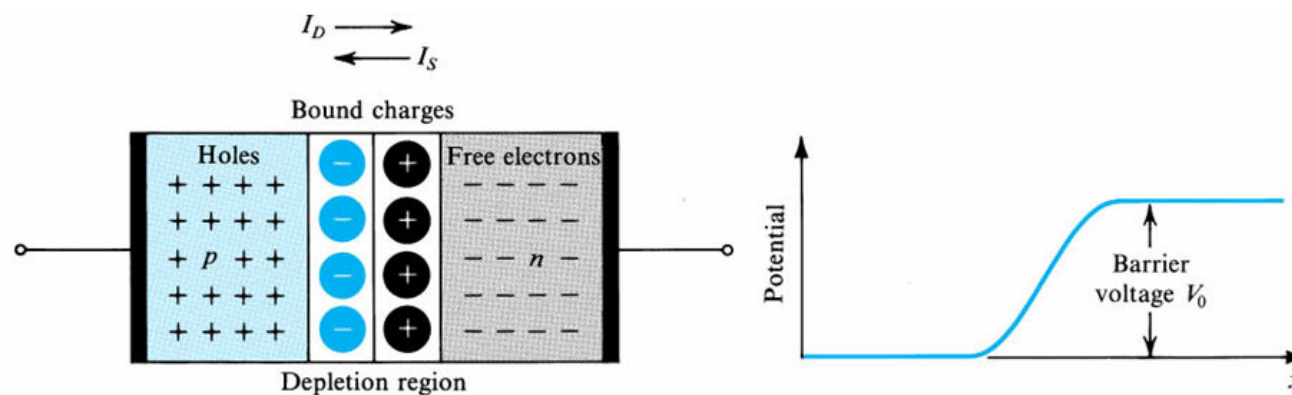
$$n_{n0} p_{n0} = n_i^2 \quad p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

SIMILAR PARA ELÉTRONS!!!



A Junção pn em Circuito Aberto

- **Corrente de Difusão I_D :** pelo fato da concentração de lacunas ser alta na região **p** e baixa na região **n**, as lacunas se difundem através da junção do lado **p** para o lado **n**. De modo similar, os elétrons se difundem através da junção do lado **n** para o lado **p**.

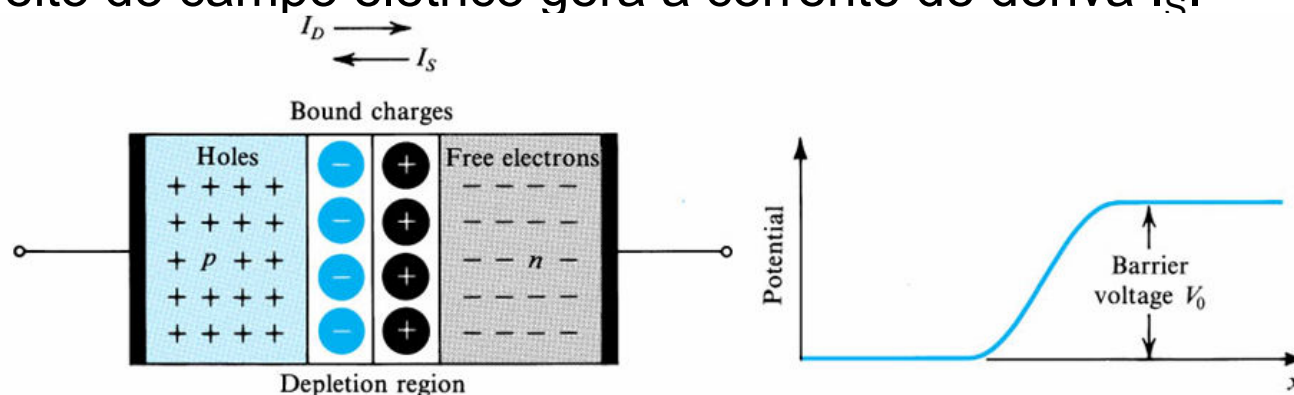


- **Região de Depleção:** lacunas se difundem na região **n** e desaparecem (se recombinam), elétrons se difundem na região **p** e desaparecem (se recombinam). Assim, ocorrerá a formação de uma região de cargas descobertas próxima a junção é o surgimento de um Campo Elétrico **E** que se opõe à difusão de lacunas na região **n** e elétrons na região **p**.



A Junção pn em Circuito Aberto

- **Corrente de Deriva I_S :** Lacunas geradas termicamente no material **n** se difundem pela borda da região de depleção e sofrem o efeito do campo elétrico e são orientadas para o lado **p**. Elétrons minoritários gerados termicamente no material tipo **p** se difundem pela borda da região de depleção e são acelerados pelo campo elétrico nessa região para o lado **n**. A soma dos movimentos gerados pelas lacunas e elétrons sobre o efeito do campo elétrico gera a corrente de deriva I_S .



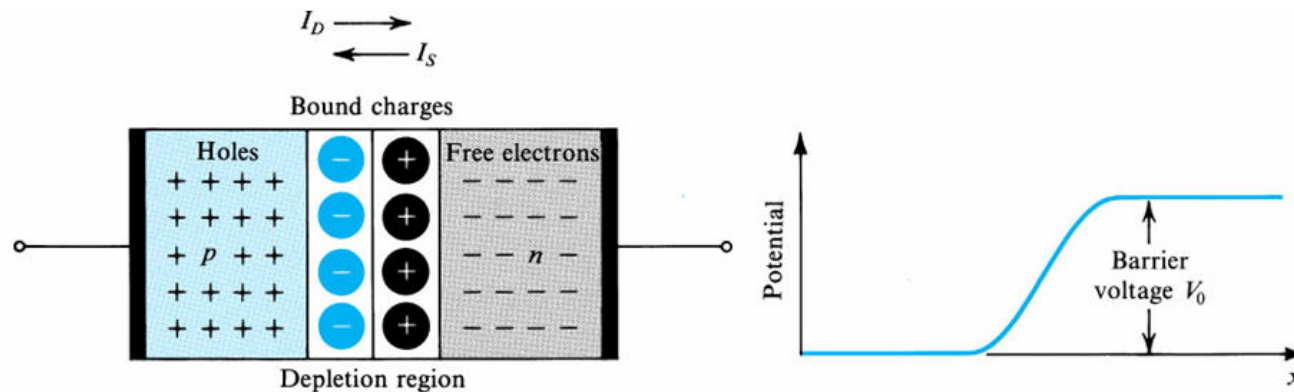
- Nas condições de circuito aberto não há corrente externa, logo:

$$I_D = I_S$$



A Junção pn em Circuito Aberto

- **Equilíbrio e Tensão da Barreira:** se $I_D > I_S$, mais cargas fixas estarão descobertas de ambos os lados da junção, a camada de depleção se tornará mais larga e o valor de tensão sobre ela aumentará. Isso, por sua vez, fará com que I_D diminua até que seja atingido o equilíbrio com $I_D = I_S$. por outro lado. Se $I_S > I_D$, então a quantidade de carga fixas em descoberto diminuirá, a camada de depleção se tornará mais estreita e a tensão nela diminuirá. Isso faz com que I_D aumente até que o equilíbrio $I_D = I_S$ seja atingido.



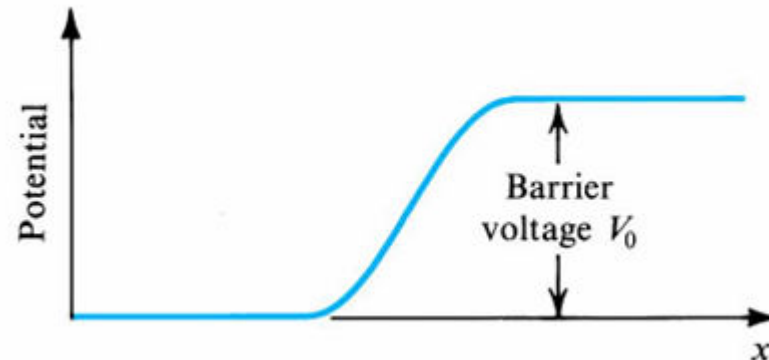
$$I_D = I_S$$



A Junção pn em Circuito Aberto

- **A tensão Interna:** Sem a aplicação de uma tensão externa, a tensão V_0 da junção pn pode se deduzida como sendo dada por:

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



- Obs.: quando os terminais da junção são deixados em aberto, a tensão medida entre eles é zero. Ou seja, a tensão V_0 da junção não aparece nos terminais do diodo. Isso se deve à tensões de contato metal-semicondutor que possuem valores contrários. **Lei da Conservação da energia!!!!**



A Junção pn em Circuito Aberto

- **Largura da Camada de Depleção:** se denotarmos a largura da região de depleção no lado p por x_p e no lado n por x_n , a condição de igualdade de cargas pode ser expressa por:

$$qx_pAN_A = qx_nAN_D \quad \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

- **Da física de dispositivos:** a largura da região de depleção de uma junção em circuito aberto é dada por:

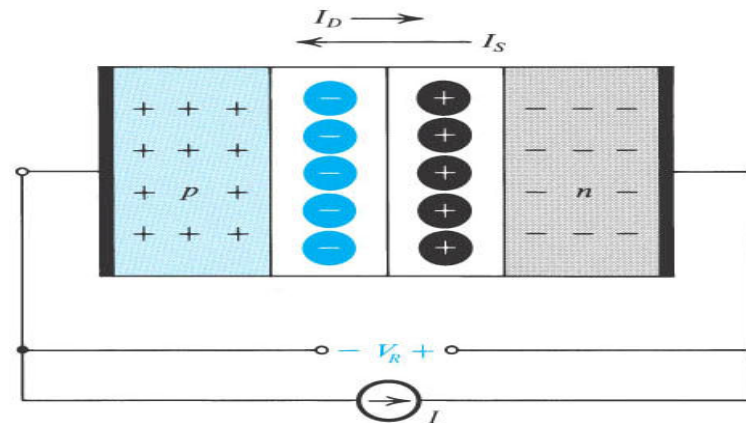
$$W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0}$$

where ϵ_s is the electrical permittivity of silicon = $11.7\epsilon_0 = 1.04 \times 10^{-12}$ F/cm. Typically, W_{dep} is in the range of $0.1 \mu\text{m}$ to $1 \mu\text{m}$.



A Junção pn na polarização Reversa

- **A fonte de corrente I no sentido reverso e com $I < I_S$:** pelo circuito externo, elétrons deixam o material **n** e lacunas deixam o material **p**.



- **Resultado:** aumento das cargas fixas positivas descobertas em **n** e das cargas fixas negativas descobertas em **p**, e conseqüente aumento da região de depleção, na tensão **V_o** e diminuição da corrente de difusão I_D . Como I_S não depende da tensão V_o (ionização térmica), temos no equilíbrio:

$$I_S - I_D = I$$



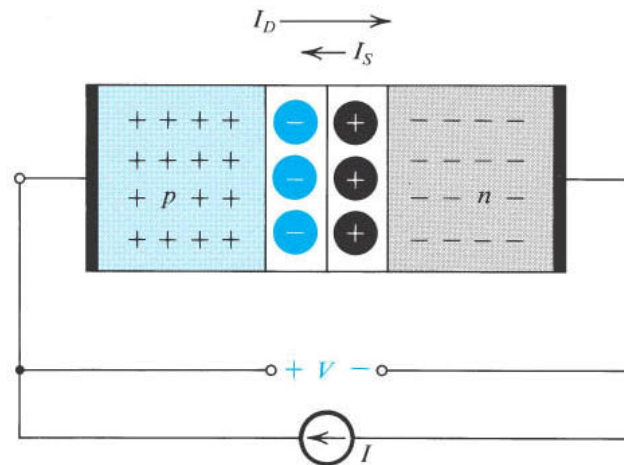
A Junção pn na ruptura

- **A fonte de corrente I no sentido reverso e com $I > I_S$:** dois mecanismos possíveis de ruptura são possíveis, o efeito zener e o efeito avalanche. Esses efeitos são provocados pelo aumento da camada de depleção e conseqüente elevação do campo elétrico.
- **Ruptura Zener:** o campo elétrico na camada de depleção aumenta até o ponto capaz de quebrar uma ligação covalente e gerar um par elétron-lacuna. Os elétrons gerados serão acelerados pelo campo elétrico para o lado n e as lacunas para o lado p, constituindo um corrente reversa que sustenta I .
- **Ruptura Avalanche:** os portadores de minoritários que cruzam a região de depleção sob a influencia do campo elétrico ganham energia cinética suficiente para quebrar as ligações covalentes dos átomos que eles colidem, gerando um efeito avalanche onde a tensão permanece quase constante e a corrente reversa sustenta I .



A Junção pn na polarização Direta

- **A fonte de corrente I no sentido direto:** pelo circuito externo, elétrons deixam o material **p** e lacunas deixam o material **n**.



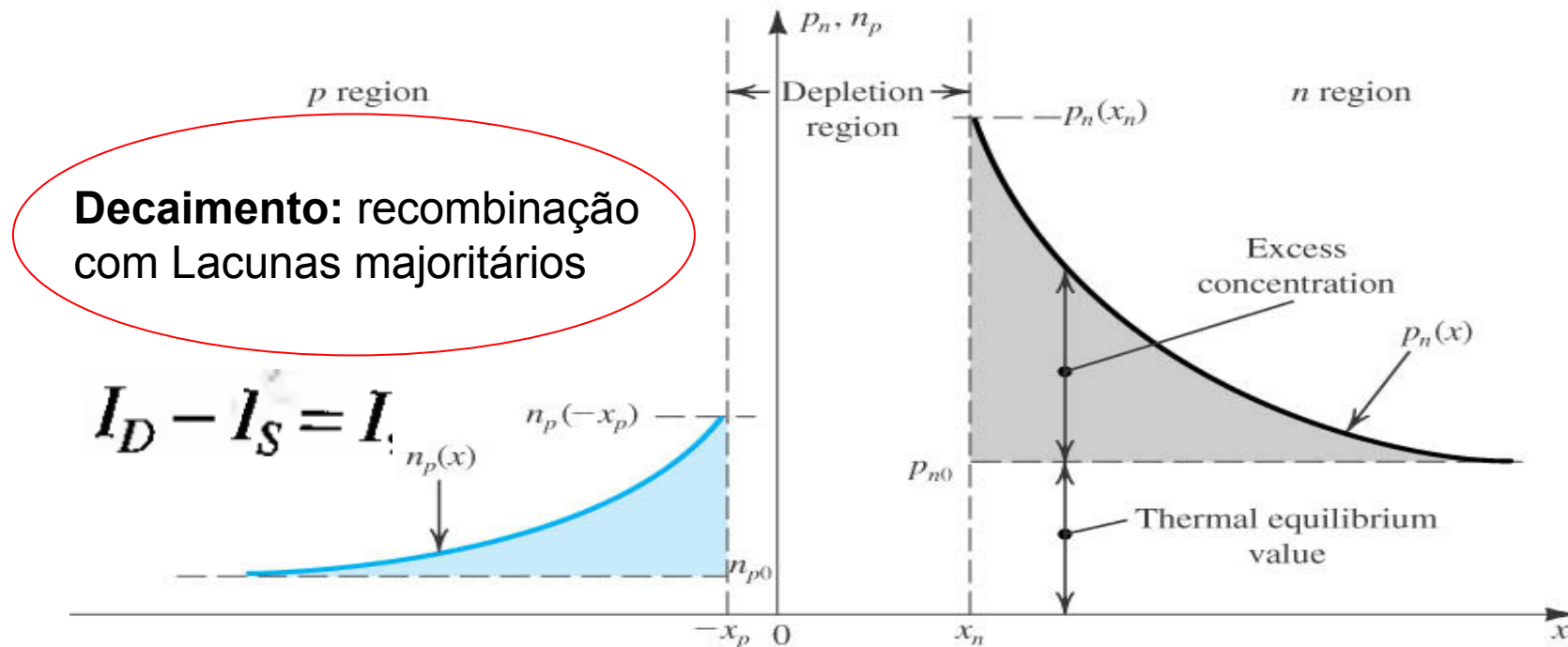
- **Resultado:** fornecimento de portadores majoritários em ambos os lados da junção pelo circuito externo, na diminuição da camada de depleção e da tensão da barreira (V_0) e no aumento do transporte de lacunas para o material **n** e elétrons para o material **p** (Difusão). Portanto, a corrente de difusão I_D aumenta até que o equilíbrio seguinte seja atingido, por:

$$I_D - I_S = I$$



A Junção pn na polarização Direta

- A menor região de depleção e a alta concentração de portadores majoritários promove a injeção de portadores minoritários pela **junção pn**, provocando uma concentração desses portadores nas proximidades da barreira. A distribuição do excesso de portadores minoritários da origem ao aumento na corrente $I_D > I_S$.





A Junção pn na polarização Direta

- Lei da Junção: $p_n(x_n) = p_{n0} e^{V/V_T}$
- A distribuição de lacunas: $p_n(x) = p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}] e^{-(x-x_n)/L_p}$

Obs.: L_p determina a taxa de decaimento exponencial e associa-se ao tempo de vida dos portadores minoritários (material!!)

- Como: $J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$ Logo: $J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}$
- Os portadores majoritários terão de ser repostos e, portanto, elétrons serão fornecidos pelo circuitos externo para a região **n** a uma taxa que mantenha a corrente constante em seu valor no ponto $x=x_n$. Então, a densidade de corrente total será:

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



A Junção pn na polarização Direta

- Continuação... Uma análise similar pode ser feita para os elétrons, e como a corrente de elétrons e lacunas possuem a mesma orientação promove-se uma soma. Multiplicando esse resultado pela área transversal da junção, temos:

$$I = A \left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right) (e^{V/V_T} - 1)$$

- Como: $p_{n0} = n_i^2 / N_D$ e $n_{p0} = n_i^2 / N_A$

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

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



A Junção pn

- RESUMO:

Quantity	Relationship	Values of Constants and Parameters (for Intrinsic Si at $T = 300$ K)
Carrier concentration in intrinsic silicon ($/\text{cm}^3$)	$n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$	$B = 5.4 \times 10^{31} / (\text{K}^3 \text{cm}^6)$ $E_G = 1.12$ eV $k = 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K $n_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$
Diffusion current density (A/cm^2)	$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$ $J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$	$q = 1.60 \times 10^{-19}$ coulomb $D_p = 12$ cm^2/s $D_n = 34$ cm^2/s
Drift current density (A/cm^2)	$J_{drift} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$	$\mu_p = 480$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ $\mu_n = 1350$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$	μ_p and μ_n decrease with the increase in doping concentration
Relationship between mobility and diffusivity	$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$	$V_T = kT/q$ ≈ 25.8 mV
Carrier concentration in n -type silicon ($/\text{cm}^3$)	$n_{n0} \approx N_D$ $p_{n0} = n_i^2 / N_D$	



A Junção pn

Quantity	Relationship	Values of Constants and Parameters (for Intrinsic Si at $T = 300$ K)
Carrier concentration in p -type silicon ($/\text{cm}^3$)	$p_{p0} = N_A$ $n_{p0} = n_i^2 / N_A$	
Junction built-in voltage (V)	$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$	
Width of depletion region (cm)	$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$ $W_{dep} = x_n + x_p$ $= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V_R)}$	$\epsilon_s = 11.7\epsilon_0$ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$
Charge stored in depletion layer (coulomb)	$q_J = q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A W_{dep}$	
Depletion capacitance (F)	$C_J = \frac{\epsilon_s A}{W_{dep}}, C_{j0} = \frac{\epsilon_s A}{W_{dep} _{V_R=0}}$ $C_J = C_{j0} \left/ \left(1 + \frac{V_R}{V_0} \right)^m \right.$ $C_J \approx 2C_{j0} \text{ (for forward bias)}$	$m = \frac{1}{3} \text{ to } \frac{1}{2}$
Forward current (A)	$I = I_p + I_n$ $I_p = Aq n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} (e^{V/V_T} - 1)$ $I_n = Aq n_i^2 \frac{D_n}{L_n N_A} (e^{V/V_T} - 1)$	



A Junção pn

Saturation current (A)

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

Minority-carrier
lifetime (s)

$$\tau_p = L_p^2 / D_p \quad \tau_n = L_n^2 / D_n$$

$$L_p, L_n = 1 \mu\text{m to } 100 \mu\text{m}$$

$$\tau_p, \tau_n = 1 \text{ ns to } 10^4 \text{ ns}$$

Minority-carrier
charge storage
(coulomb)

$$Q_p = \tau_p I_p \quad Q_n = \tau_n I_n$$

$$Q = Q_p + Q_n = \tau_T I$$

Diffusion
capacitance (F)

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



Dispositivos e Circuitos Eletrônicos

CAPÍTULO 3


MAKRON
Books

Diodos

	Introdução		Os Diodos Zener
3.1	O Diodo Ideal	3.7	Circuitos Retificadores
3.2	Características Elétricas dos Diodos de Junção	3.8	Circuitos Limitadores e Grampeadores
3.3	Operação Física dos Diodos	3.9	Tipos Especiais de Diodos
3.4	Análise de Circuitos com Diodos	3.10	O Modelo do SPICE para Diodos e Exemplos de Simulação
3.5	O Modelo para Pequenos Sinais e Suas Aplicações		Resumo
3.6	Operação na Região de Ruptura Reversa –		Bibliografia
			Problemas

Próxima Aula