

ELETRÔNICA - I

- **Cap. 1** Introdução à Eletrônica
- **Cap. 2** Física Básica de Semicondutores
- **Cap. 3** Modelos e Circuitos com Diodos
- **Cap. 4** Física de Transistores Bipolares
- **Cap. 5** Amplificadores Bipolares
- **Cap. 6** Física de Transistores MOS

Cap. 2 Física Básica de Semicondutores

- **2.1 Materiais Semicondutores e suas propriedades**
- **2.2 Junção PN - Diodo**

2.1 Física de Semicondutores

Semiconductors

- Charge Carriers
- Doping
- Transport of Carriers

PN Junction

- Structure
- Reverse and Forward Bias Conditions
- I/V Characteristics
- Circuit Models

- Dispositivos semicondutores são o coração dos Circuitos Integrados (CI's).
- A Junção PN é a célula fundamental dos dispositivos semicondutores.

Portadores de Carga em Semicondutores



- Para entender as características das junções PN é importante estudar:
- o comportamento dos portadores de carga no estado sólido;
- a modificação da densidade dos portadores de carga; e
- os diferentes mecanismos de fluxo/transporte de carga.

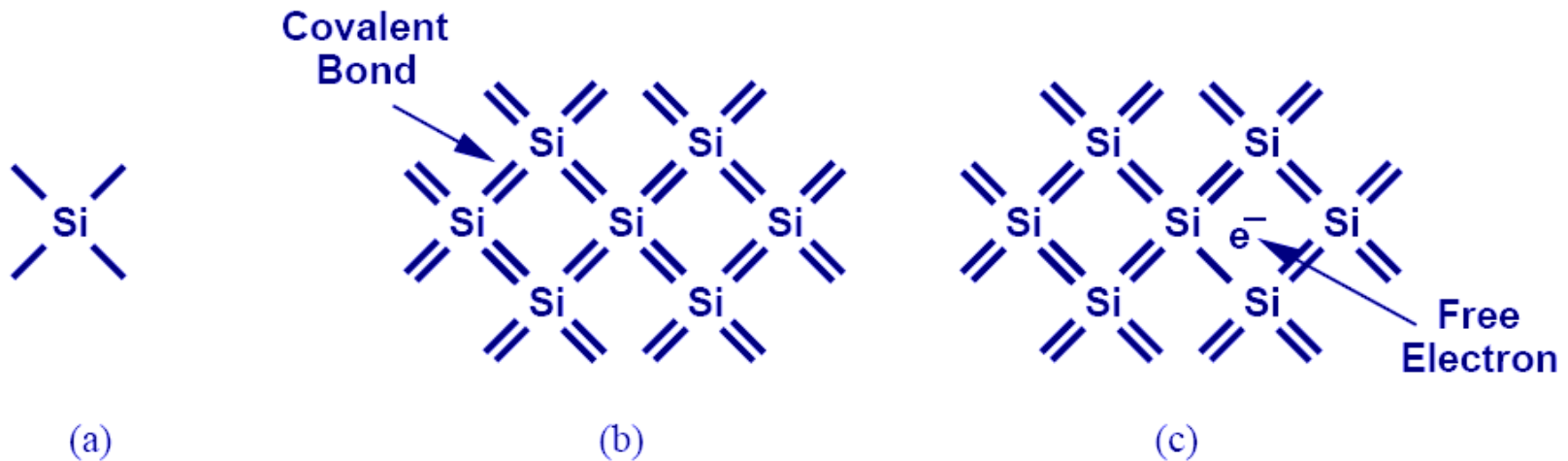
Tabela Periódica

	III	IV	V	
	Boron (B)	Carbon (C)		
• • •	Aluminum (Al)	Silicon (Si)	Phosphorous (P)	• • •
	Galium (Ga)	Germanium (Ge)	Arsenic (As)	
		• • •		

O extrato da Tabela Periódica acima contém Elementos Químicos pertencentes aos Grupos 3A, 4A e 5A:

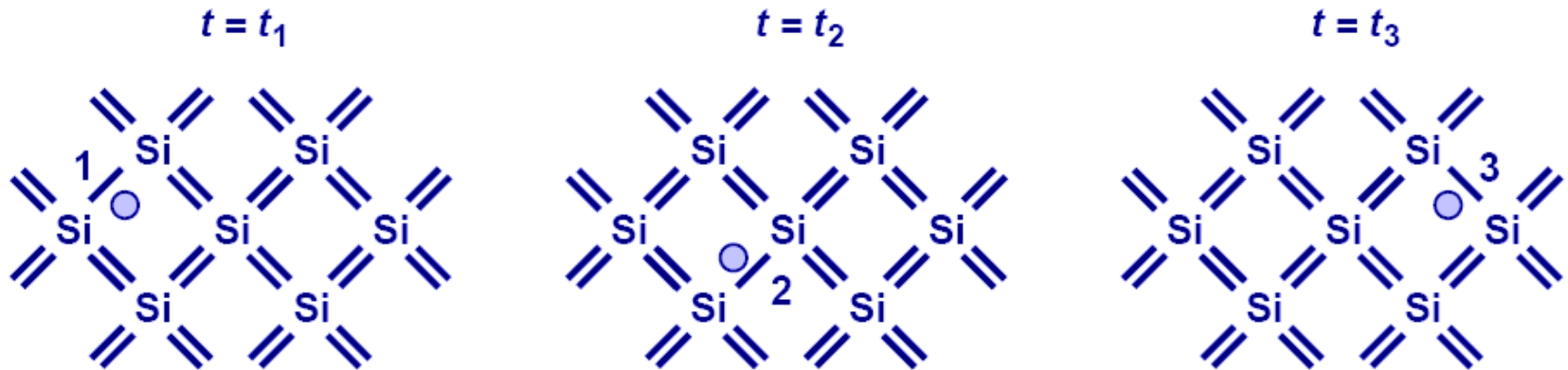
- Grupo 3A: 3 elétrons de valência. Ex: B, Al e Ga;
- Grupo 4A: 4 elétrons de valência. Ex: C, Si e Ge; e
- Grupo 5A: 5 elétrons de valência. Ex: P e As.

Silício - Si



- O Silício (Si) tem 4 (quatro) elétrons de valência, que podem formar ligações covalentes com quatro átomos vizinhos.
- Quando a temperatura aumenta, os elétrons de valência aumentam seu nível de energia e podem se tornar livres com a quebra das ligações covalentes.
- Assim, ao receberem um Pacote de Energia maior que a Energia de Banda Proibida ou Energia de Gap - E_g , aqueles elétrons saltam da Banda de Ligação para a Banda de Condução, tornando-se livres para a condução da corrente elétrica.

Recombinação do Par Elétron - Lacuna



- As lacunas surgem com a quebra das ligações covalentes e a consequente geração de elétrons livres.
- As lacunas podem ser preenchidas pela absorção de outros elétrons livres, criando efetivamente um fluxo de carga/portadores.
- Este fenômeno é chamado Recombinação do par elétron – lacuna.

Densidade de Elétrons Livres (n_i) X Temperatura (T)

- A Energia de Banda Proibida (E_g) determina o esforço necessário para liberação de um elétron de sua ligação covalente na Banda de Valência.
- Existe uma relação exponencial entre a densidade de elétrons livres no semiconductor puro ou intrínseco (n_i) e a Energia de Banda Proibida (E_g).
- $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ é a Constante de Boltzman.
- $E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV} = 1,12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,792 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

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

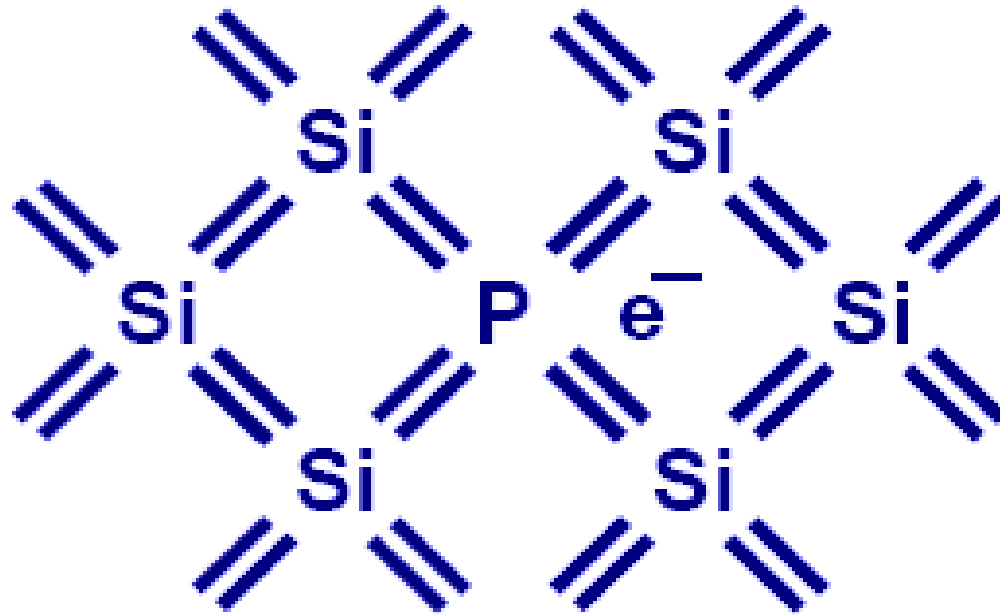
$$n_i(T = 300^\circ \text{K}) = 1.08 \times 10^{10} \text{ electrons/cm}^3$$

$$n_i(T = 600^\circ \text{K}) = 1.54 \times 10^{15} \text{ electrons/cm}^3$$

Condutor x Semicondutor x Isolante

- A Energia de Banda Proibida (E_g) depende do tipo de material.
- Os Isolantes exibem E_g mais elevada. Ex: $E_g = 2,5 \text{ eV}$ @ Diamante.
- Os Condutores possuem E_g menor, quando comparado aos isolantes e semicondutores.
- Os Semicondutores apresentam energia intermediária, isto é, $0,7 \text{ eV} < E_g < 1,5 \text{ eV}$.
- $E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$ @ 300K.
- $E_g(\text{Ge}) = 0,7 \text{ eV}$ @ 300K.

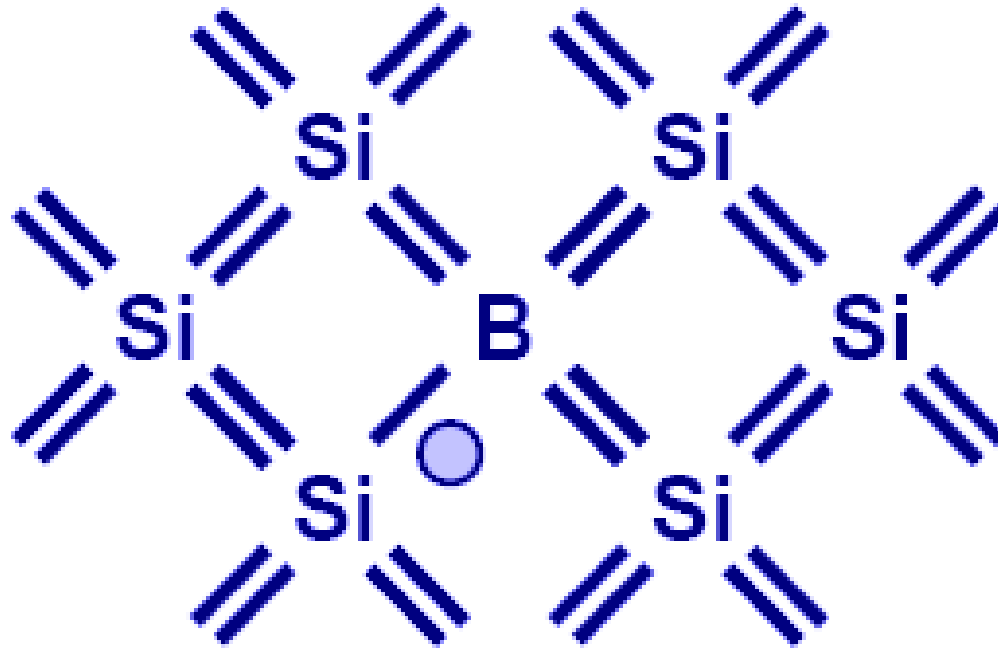
Dopagem - Tipo N



➤ O Silício (Si), que conta com 4 (quatro) elétrons de valência, pode ser dopado com outros elementos, também chamados impurezas, para alterar a concentração de portadores e, portanto, as suas propriedades eléctricas.

➤ Se o Si é dopado com Fósforo (P), que conta com 5 (cinco) elétrons de valência, terá **NATURALMENTE 1 (um)** elétron livre para cada átomo de Fósforo, tornando-se então um Semicondutor Tipo N.

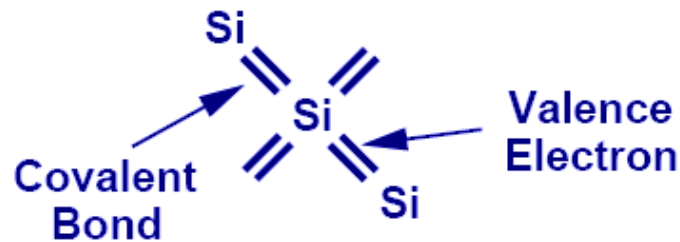
Dopagem - Tipo P



- Se o Si é dopado com B (Boro), que conta com 3 (três) elétrons de valência, terá **NATURALMENTE** uma lacuna “livre”, para cada átomo de Boro, tornando-se então um Semicondutor Tipo P.

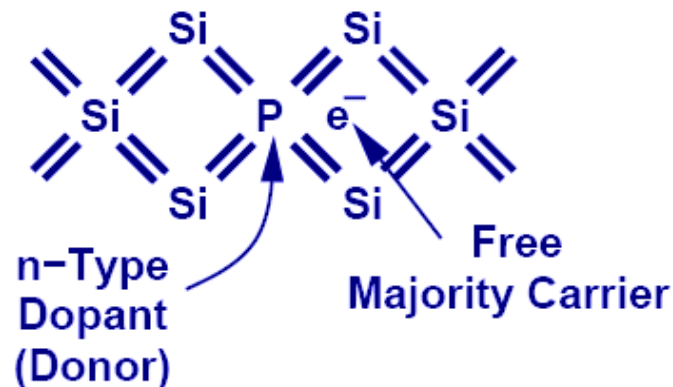
Sumário de Portadores de Carga

Intrinsic Semiconductor

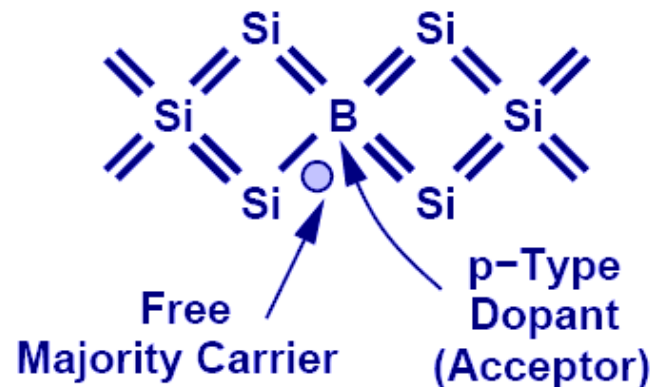


Extrinsic Semiconductor

Silicon Crystal
 N_D Donors/cm³



Silicon Crystal
 N_A Acceptors/cm³



Densidades de Elétrons e Lacunas

Independente do Tipo de Semicondutor (N ou P) e dos níveis de dopagem, o produto entre as densidades de elétrons (n) e lacunas (p) é constante e igual ao quadrado da densidade de elétrons livres no semicondutor puro ou intrínseco, representada por n_i .

Tipo P
 $p \approx N_A, n_i \ll N_A$

Tipo P

Portadores Majoritários:

$$p = N_A + n_i \approx N_A$$

Portadores Minoritários:

$$n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Tipo N

Portadores Majoritários:

$$n = N_D + n_i \approx N_D$$

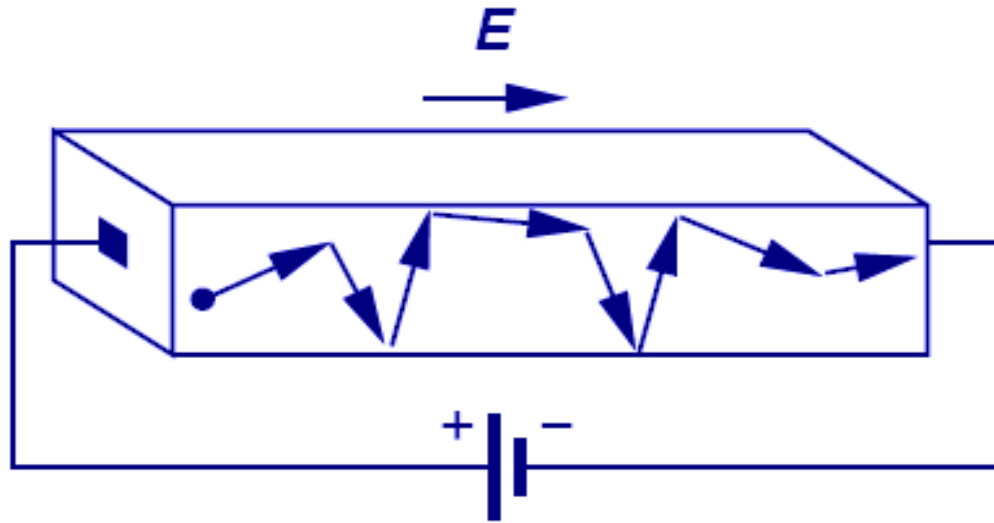
Portadores Minoritários:

$$p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Tipo N
 $n \approx N_D, n_i \ll N_D$

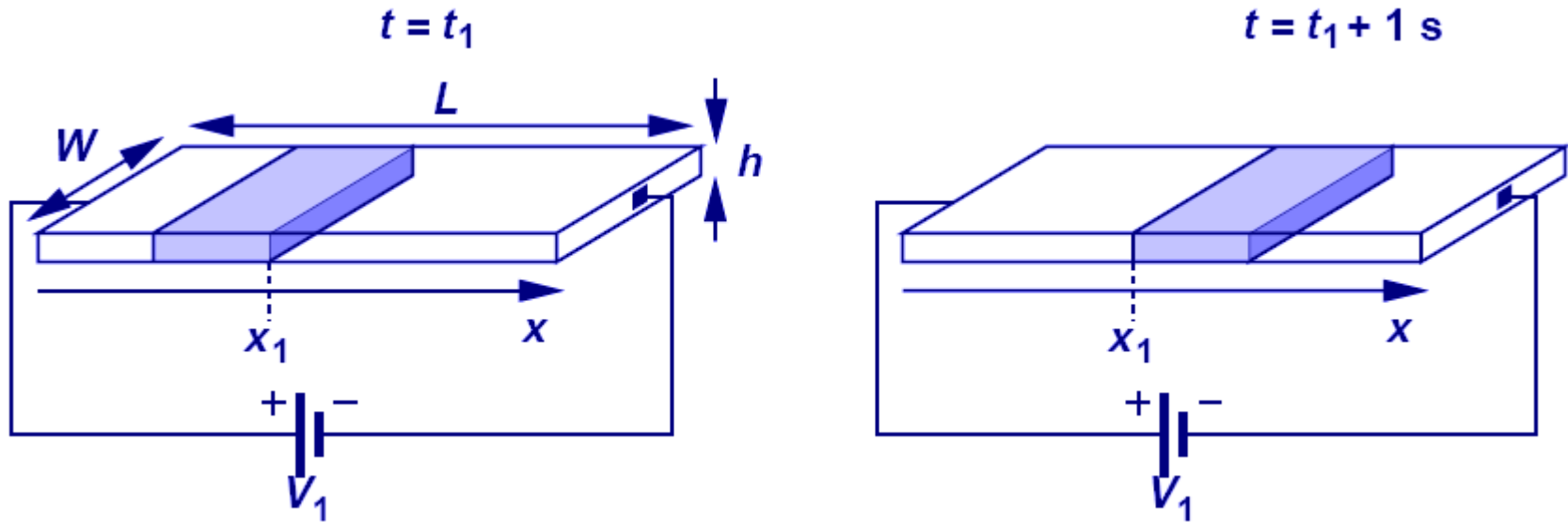
$$np = n_i^2$$

Mecanismo de Transporte de Carga - *Drift ou Deriva*



- O processo cujas partículas de carga se movem devido a um Campo Elétrico (E) é chamado *Drift/Deriva*.
- Partículas de carga se movem a uma velocidade proporcional ao campo elétrico.
- $v \sim E$ ou $v = \mu \cdot E$, onde a constante de proporcionalidade μ é chamada mobilidade e expressa em ($\text{cm}^2/\text{V.s}$).
- No Si a mobilidade dos elétrons é $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ e das lacunas, $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V.s}$.
- Como os elétrons se movem na direção oposta ao Campo Elétrico E , devemos ajustar as expressões das velocidades de elétrons v_e e lacunas v_h , como se segue.
- Assim, $v_e = - \mu_n \cdot E$ e $v_h = + \mu_p \cdot E$.

Fluxo de Corrente : Caso Geral



$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$



$$I = -v \cdot W \cdot h \cdot n \cdot q$$

- A corrente elétrica é calculada como a quantidade de carga em Coulomb por unidade de volume ($n \cdot q$) que passa através de uma secção reta ($W \cdot h$), com uma velocidade de v .

Fluxo de Corrente: Drift/Deriva

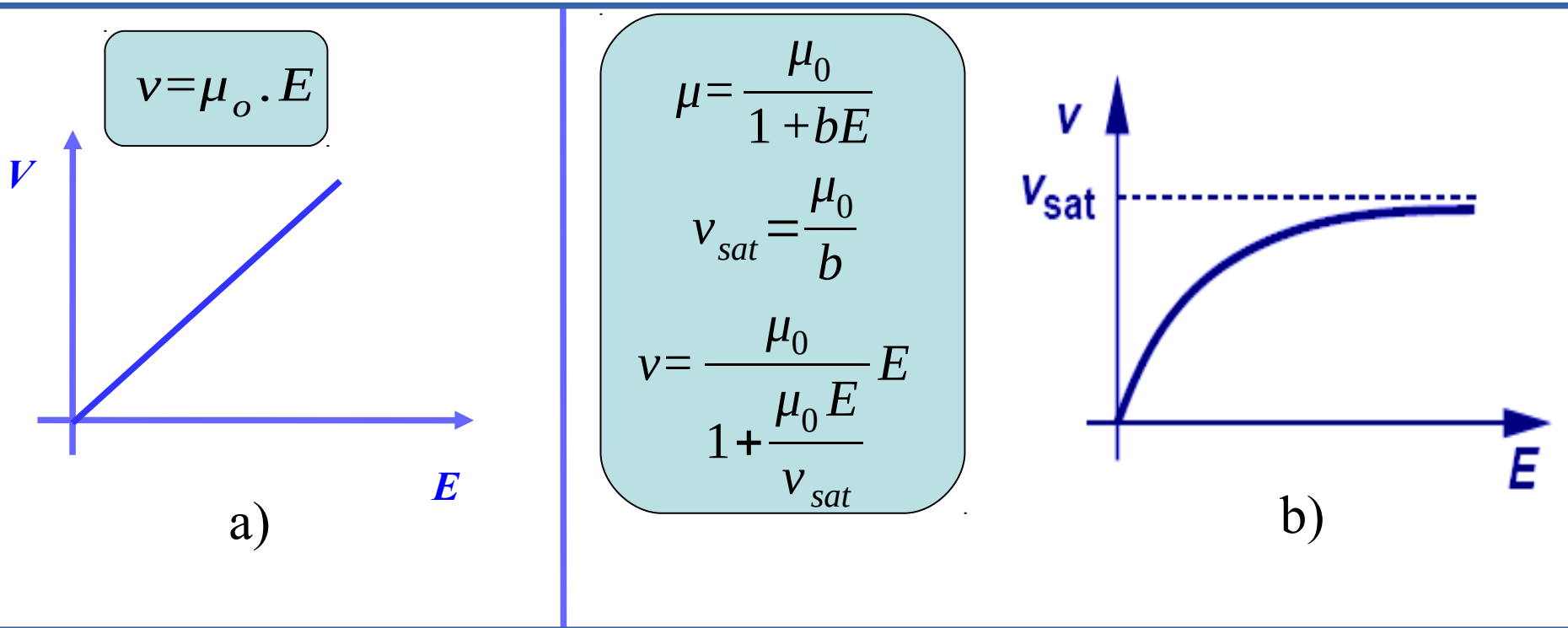
$$J_n = \mu_n E \cdot n \cdot q$$

$$J_{tot} = \mu_n E \cdot n \cdot q + \mu_p E \cdot p \cdot q$$

$$q(\mu_n n + \mu_p p) E$$

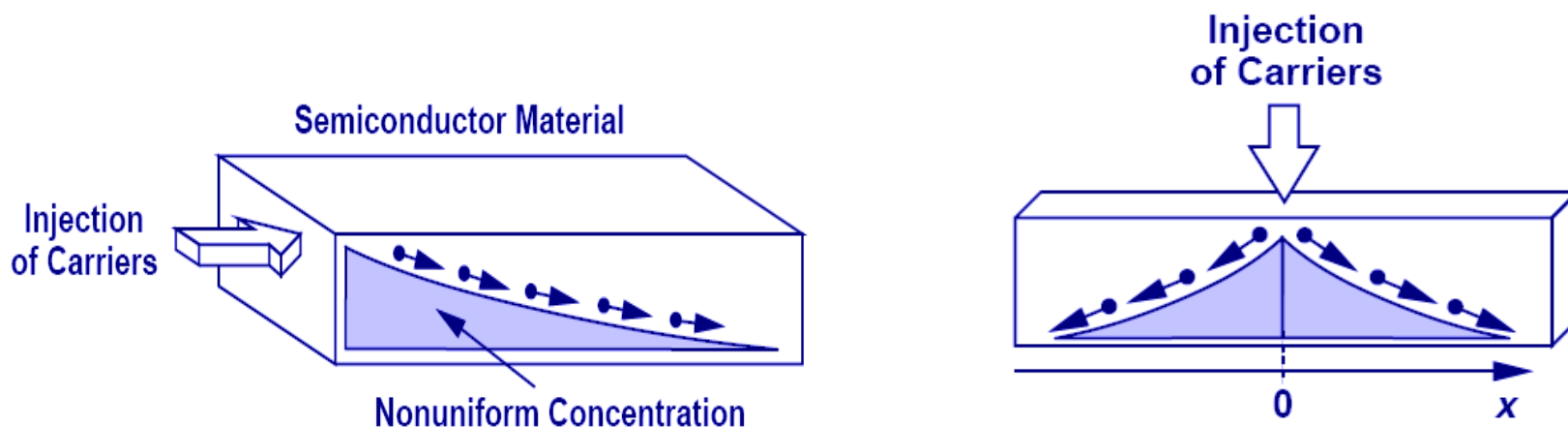
- Sendo a velocidade (v) proporcional ao Campo Elétrico (E), a corrente de Drift é obtida pela substituição de $v_e = -\mu_n \cdot E$ e de $v_h = +\mu_p \cdot E$ na equação geral da corrente.
- A Densidade de Corrente Total (J_{tot}), correspondente à corrente I por unidade de área da secção (cm^2), cuja a unidade é (A/cm^2), consiste de ambas as densidades, de elétrons e de lacunas.
- Assim, elétrons e lacunas deslocando-se em sentidos contrários tem Densidades de Corrente (J) que se reforçam, ie, $J_{tot} = J_n + J_p$.

Velocidade de Saturação



- A velocidade de saturação é um tópico tratado em cursos mais avançados.
- Percebe-se que a velocidade não cresce linearmente em função da intensidade do Campo Elétrico, como sugerido na letra a).
- Na realidade, para intensidade elevada de Campo Elétrico, a velocidade eventualmente satura em um valor crítico, V_{sat} , como proposto em b).

Mecanismo de Transporte de Carga - Difusão



- Conforme o Perfil de Distribuição acima, percebe-se que as partículas se movem de uma região de maior para outra de menor concentração.
- O Fenômeno da Difusão de Cargas é análogo ao de uma gota de tinta que pinga na superfície da água e, a partir daí, desloca-se radialmente para as extremidades.
- Outra analogia interessante é feita com relação ao fenômeno da Osmose estudado na Biologia, quando uma membrana separa dois meios contendo concentrações diferentes. Assim, o fluxo de partículas ocorre do meio mais concentrado para o menos concentrado, obtendo-se o equilíbrio ou ausência de fluxo quando as concentrações se igualam.

Fluxo de Corrente: Difusão

$$I = AqD_n \frac{dn}{dx}$$

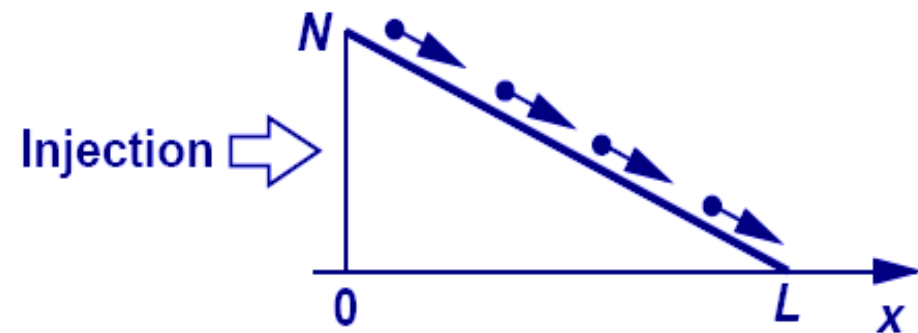
$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

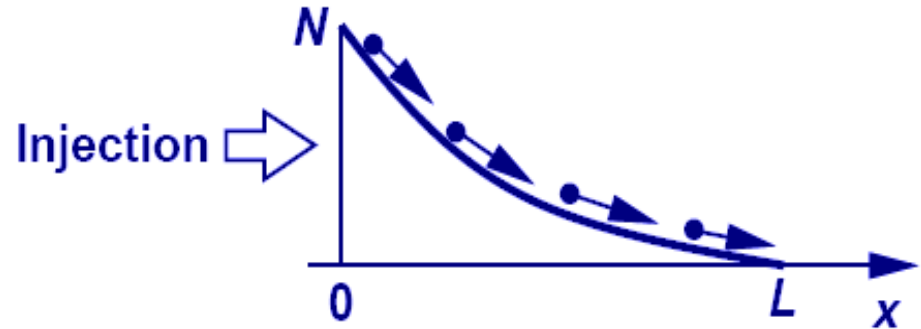
$$J_{tot} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right)$$

- A Difusão de Corrente é proporcional ao gradiente de carga (dn / dx) ao longo da direção do fluxo.
- A corrente total resulta das densidade dos elétrons e das lacunas e D_n é chamada Constante de Difusão.
- Supondo a taxa de injeção e densidade de portadores idênticas para elétrons e lacunas, conforme o perfil anterior, essas partículas se deslocaram no mesmo sentido. Assim, fazendo $J_{tot} = J_p + J_n$, percebe-se que as Densidades de Corrente de Elétrons J_n e de Lacunas J_p se opõem, como pode ser observado na expressão J_{tot} , sinalizada acima.

Exemplo: Perfil de Densidade Carga Linear x Não-linear



$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} = -qD_n \cdot \frac{N}{L}$$

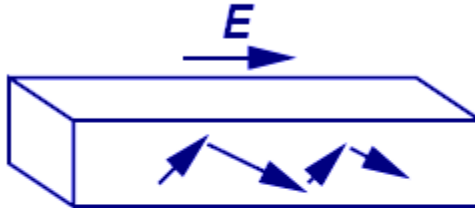


$$J_n = qD \frac{dn}{dx} = \frac{-qD_n N}{L_d} \exp \frac{-x}{L_d}$$

- Perfil de densidade de carga linear, $n(x) = (-N/L) \cdot x + N$, significa que a Corrente de Difusão (J) é constante ao longo do semiconductor.
- Perfil de densidade de carga não-linear, $n(x) = N \cdot \exp(-x/L_d)$, significa variação da Corrente de Difusão (J) ao longo do semiconductor.
- Se L_d é o Comprimento de Difusão e L é o Comprimento Físico do semiconductor, podemos supor que $L_d \ll L$.
- As Constantes de Difusão Elétrons e Lacunas para o Si intrínseco são respectivamente, $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Relação de Einstein

Drift Current



$$J_n = q \mu_n E$$

$$J_p = q \mu_p E$$

Diffusion Current



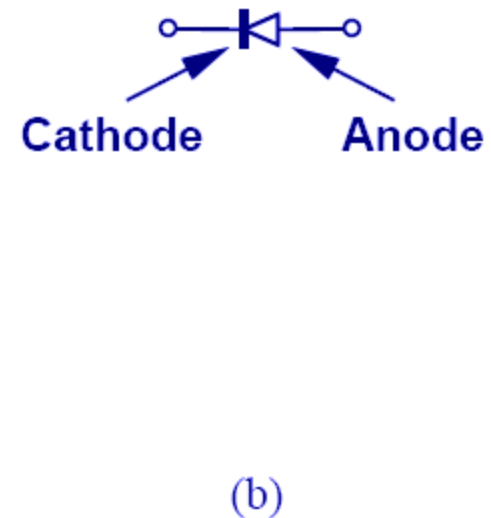
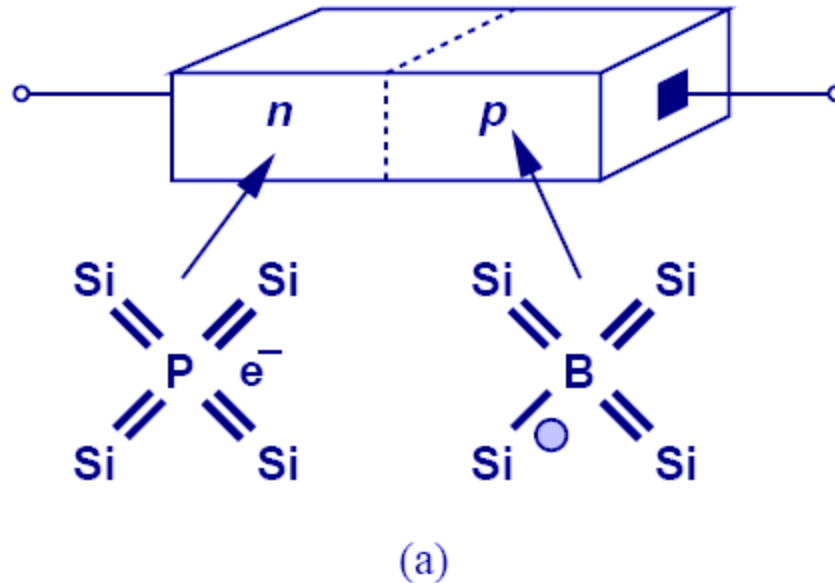
$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

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

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} = V_T$$

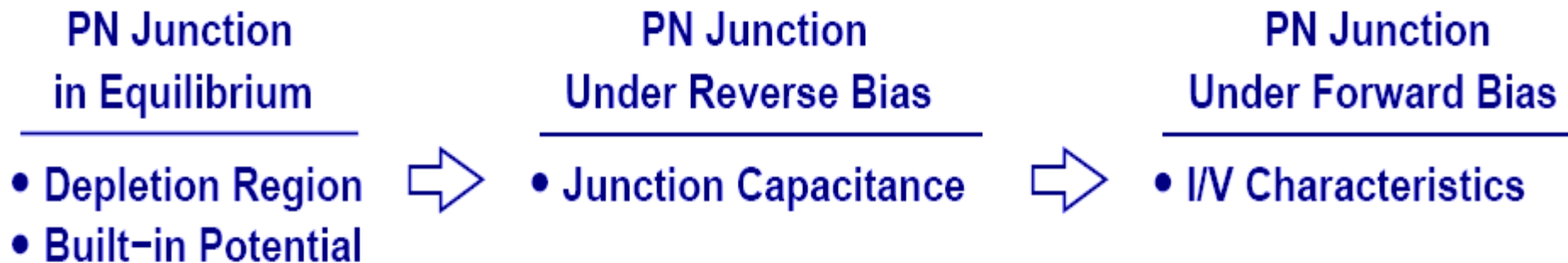
- Enquanto a física considerava as correntes de Drift e de Difusão totalmente independentes, a relação de Einstein oferece uma misteriosa ligação entre as duas.
- V_T é chamada Tensão Termal, cujo valor à temperatura ambiente é aproximadamente 26 mV @ 300 K.

Junção PN - Diodo



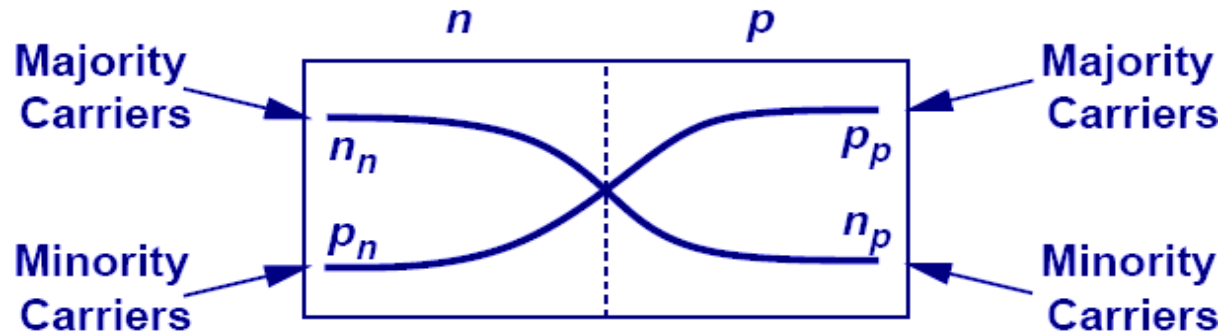
➤ Quando Dopantes Doadores (Fósforo – P) e Aceitadores (Boro - B) são introduzidos lado a lado em um semiconductor, uma junção PN ou um Diodo é formado.

Três Regiões de Operação do Diodo



- Para compreender o funcionamento de um diodo, é necessário estudar as suas três regiões de operação:
- Equilíbrio ou sem polarização;
- Polarização Reversa ou Inversa - V_R ; e
- Polarização Direta - V_F .

Fluxo de Corrente através da Junção: Difusão



n_n : Concentration of electrons on n side

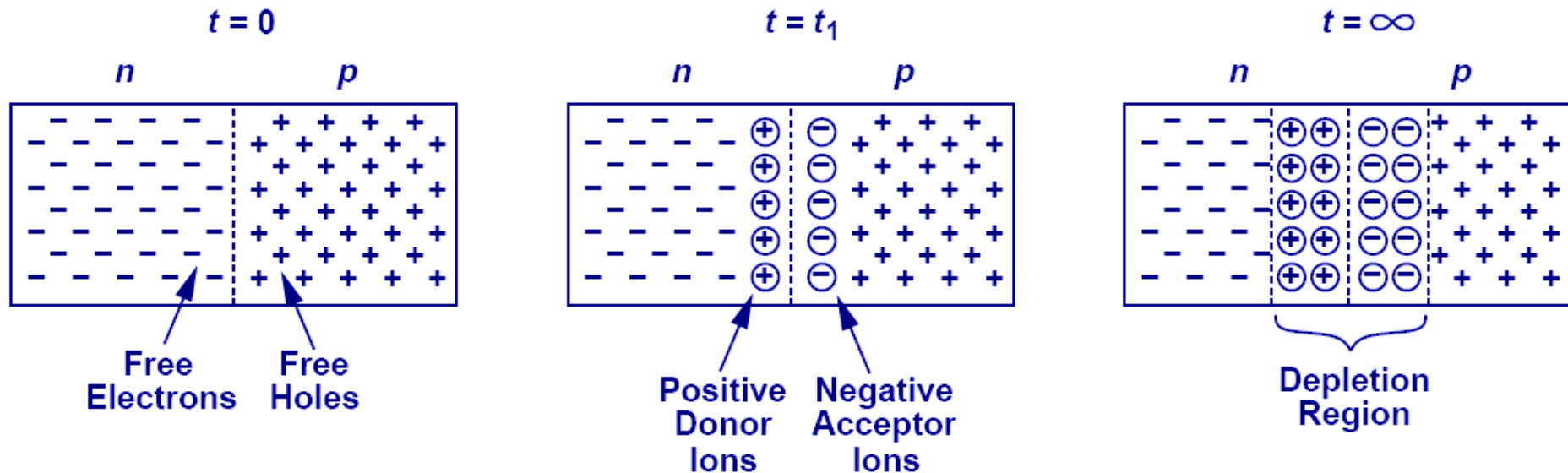
p_n : Concentration of holes on n side

p_p : Concentration of holes on p side

n_p : Concentration of electrons on p side

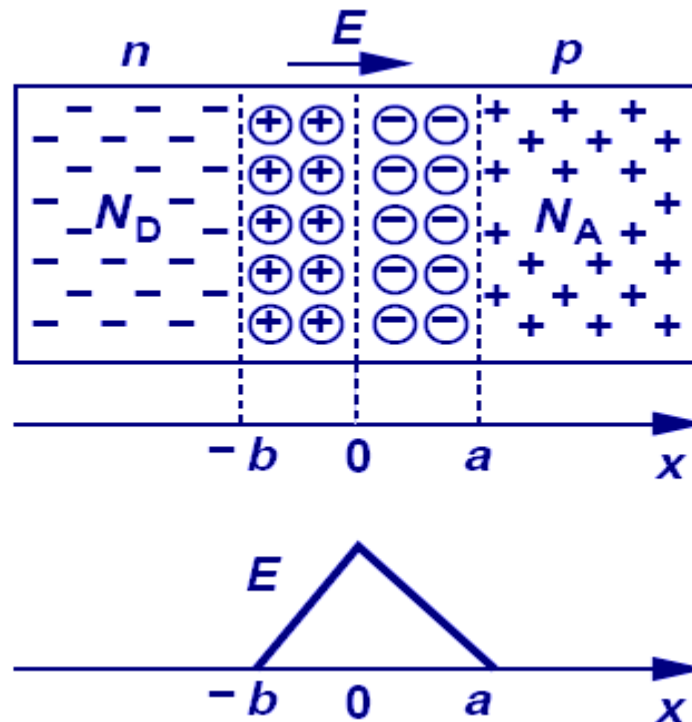
- Como cada um dos lados da junção contém um excesso de Lacunas ou Elétrons em relação ao outro, existe um elevado gradiente de concentração.
- Assim, uma corrente de difusão flui através da junção em ambas as direções.

Região ou Camada de Depleção



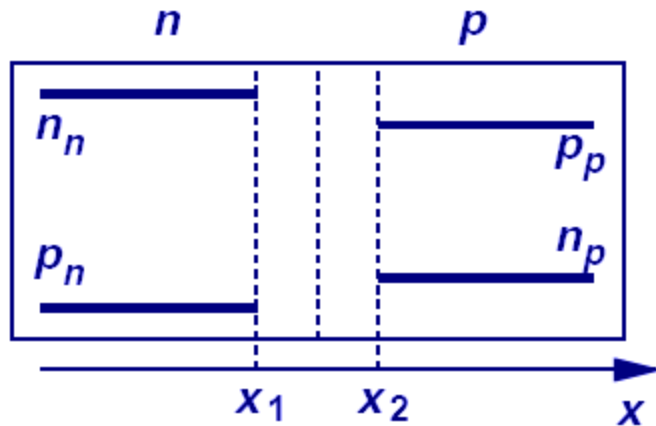
- Como elétrons e lacunas livres se difundem através da junção, ocorre a formação de uma região de íons fixos.
- Esta região é conhecida como Região ou Camada de Depleção.

Fluxo de Corrente através da Junção: Drift



- Os íons fixos na região de depleção criam um campo elétrico que implica uma Corrente de Drift/Deriva, em que os elétrons imersos neste campo são impulsionados da direita para a esquerda, isto é, os elétrons são atraídos pelos íons positivos e repelidos pelos negativos.
- O fluxo de lacunas imersas no campo terá sentido inverso ao dos elétrons.

Fluxo de Corrente através da Junção: Equilíbrio



$$\begin{aligned} |I_{drift,p}| &= |I_{diff,p}| \\ |I_{drift,n}| &= |I_{diff,n}| \end{aligned}$$

- No equilíbrio, para cada portador, a corrente de Drift que flui em uma direção anula a corrente de Difusão que flui na direção oposta, implicando a criação de uma corrente líquida igual a zero.
- A figura mostra o perfil dos portadores de carga em cada região da junção PN.

Potencial

➤ Devido ao campo elétrico através da junção, ocorre o aparecimento um Potencial Embutido/Interno, como pode ser mostrado abaixo.

$$|I_{drift,p}| = |I_{diff,p}|$$

$$|q\mu_p pE| = \left| -qD_p \frac{dp}{dx} \right| \quad \left| -\mu_p p \frac{dV}{dx} \right| = \left| -D_p \frac{dp}{dx} \right|$$

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

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

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}, \quad V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Exemplo – Potencial Interno

Uma Junção de Si, a temperatura ambiente (300 K), emprega

$$N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ e } N_D = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} .$$

Determine o Potencial Embutido, V_o .

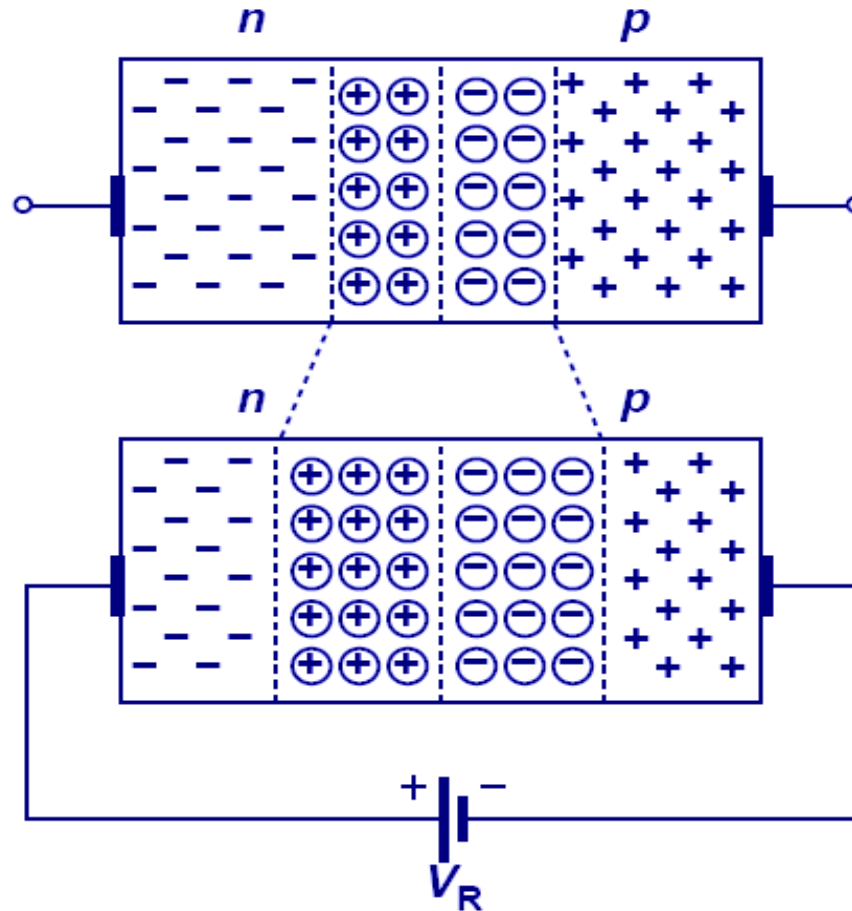
$$T=300 \text{ K}, k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}, q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

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

$$n_i(T = 300^0 \text{ K}) = 1.08 \times 10^{10} \text{ electrons/cm}^3$$

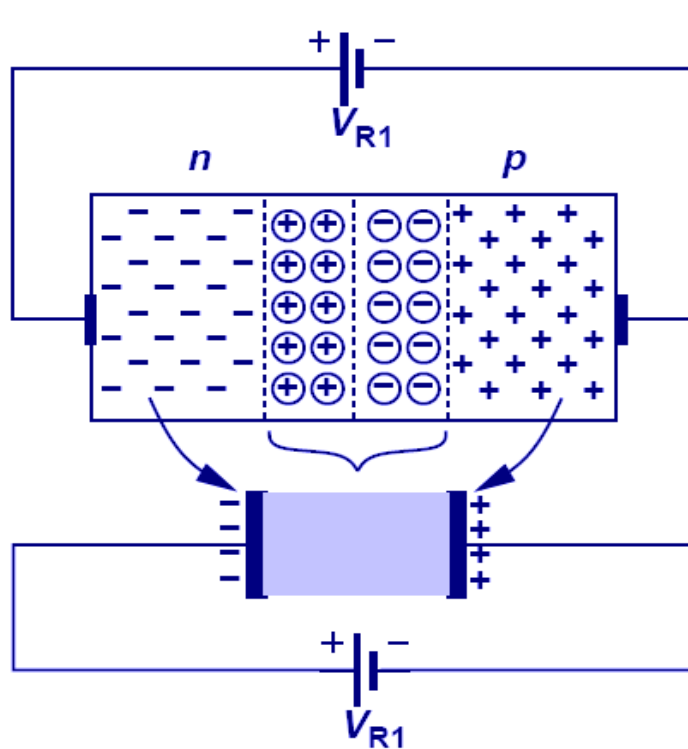
$$V_o = (kT/q) \cdot \ln (N_A N_D / n_i^2) = 768 \text{ mV}$$

Diodo Polarizado Inversamente

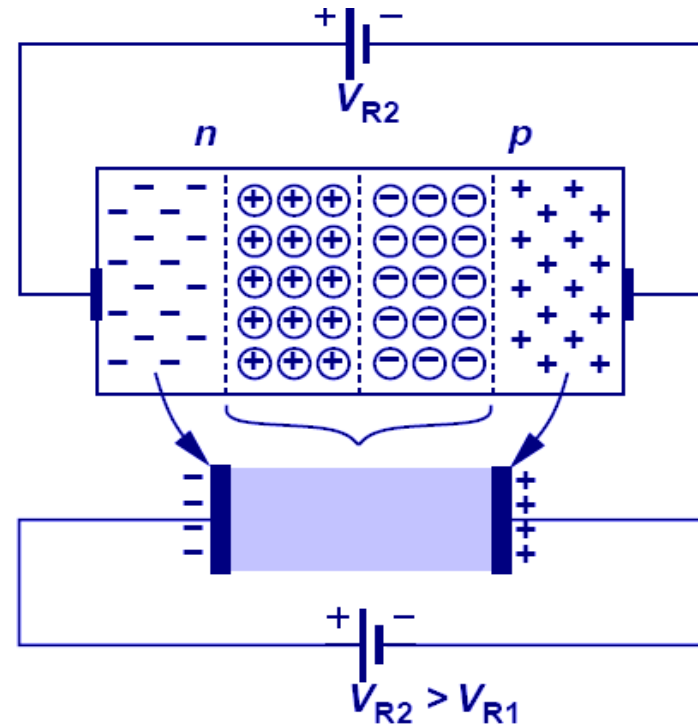


- Quando a região de tipo N de um diodo está ligada a um potencial mais elevado que a região de tipo P, o diodo está sob Polarização Inversa ou Reversa.
- Assim, a Região de Depleção torna-se mais larga, implicando maior Campo Elétrico e maior Potencial Interno na junção, quando comparada às condições de equilíbrio.

Aplicação - Diodo Polarizado Inversamente : Capacitor Dependente da Tensão



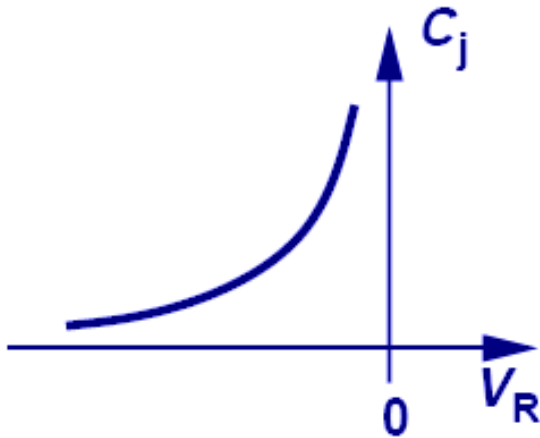
(a)



(b)

- A junção PN pode ser vista como um Capacitor de Placas Paralelas.
- A variação de V_R altera o comprimento da Camada de Depleção, que representa a distância entre as “placas”, modificando o valor de capacitância.
- Nesse caso, a junção PN tem uma capacitância dependente da tensão.

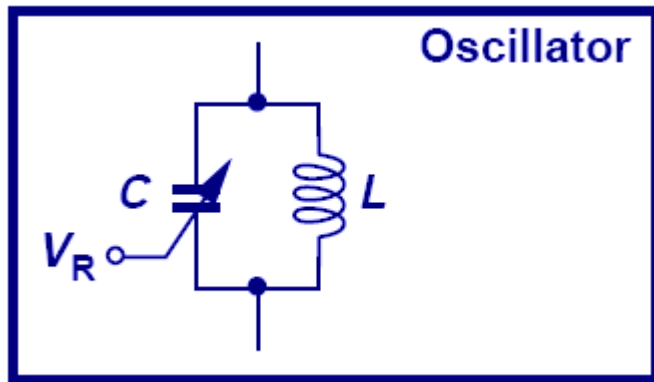
Capacitância Dependente da Tensão



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

As equações mostradas acima descrevem como a capacitância depende da Tensão Reversa - V_R .

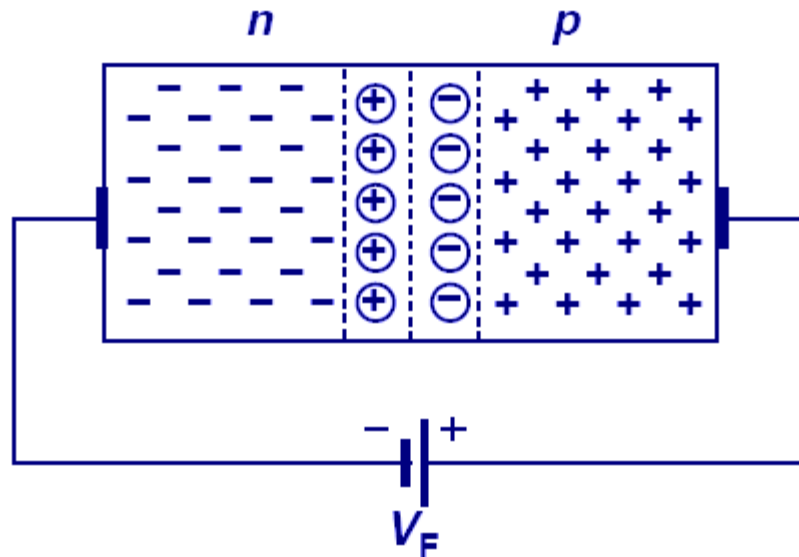
Oscilador Controlado por Tensão - VCO



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

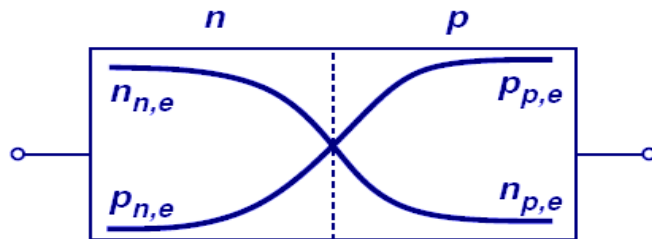
- Uma aplicação de uma junção PN inversamente polarizada é o VCO, em que um circuito sintonizado LC é usado em um oscilador.
- Modificando o valor de V_R , podemos alterar a Capacitância C , que por sua vez modifica a frequência de oscilação ou de ressonância.

Diodo em Polarização Direta



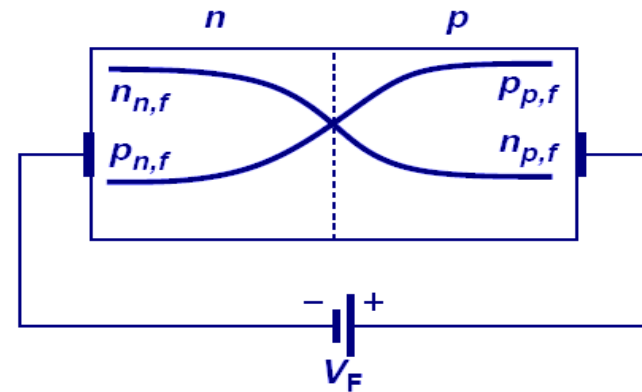
- Quando a região de tipo N de um diodo está a um potencial mais baixo que a região de tipo P, o diodo está em polarização direta.
- Assim, sob Polarização Direta, a Região de Depleção diminui o comprimento, implicando menor campo elétrico e menor Potencial Interno ou Embutido, quando comparada às condições de equilíbrio.

Perfil de Portadores Minoritários em Polarização Direta



$$p_{n,e} = \frac{p_{p,e}}{\exp \frac{V_0}{V_T}}$$

Equação do Potencial Interno no equilíbrio, na forma exponencial.



$$p_{n,f} = \frac{p_{p,f}}{\exp \frac{V_0 - V_F}{V_T}}$$

Equação do Potencial Interno sob Polarização Direta, na forma exponencial.

➤ Sob polarização direta, ocorre a criação de um campo elétrico em oposição àquele gerado na condição de equilíbrio, reduzindo a Barreira de Potencial Efetiva ($V_0 - V_F$), reduzindo o campo elétrico interno e provocando um aumento dos portadores minoritários em cada região.

Corrente de Difusão em Polarização Direta

$$\Delta n_p \approx \frac{N_D}{V_0} \left(\exp \frac{V_F}{V_T} - 1 \right)$$

$$\Delta p_n \approx \frac{N_A}{V_0} \left(\exp \frac{V_F}{V_T} - 1 \right)$$

$$I_{tot} \propto \frac{N_A}{V_0} \left(\exp \frac{V_F}{V_T} - 1 \right) + \frac{N_D}{V_0} \left(\exp \frac{V_F}{V_T} - 1 \right)$$

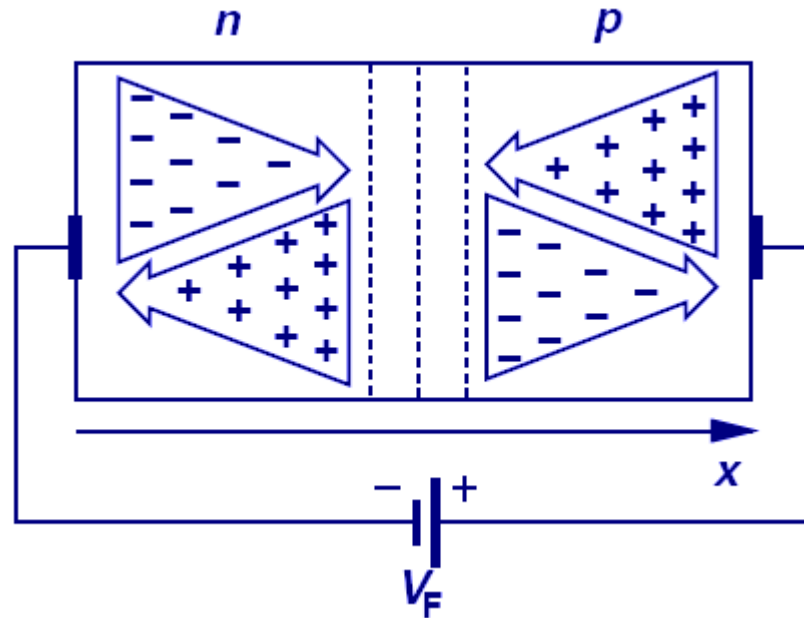
$$I_{tot} = I_s \left(\exp \frac{V_F}{V_T} - 1 \right)$$

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

➤ Corrente de difusão aumenta, a fim de suprir o aumento de portadores minoritários, como mostrado acima.

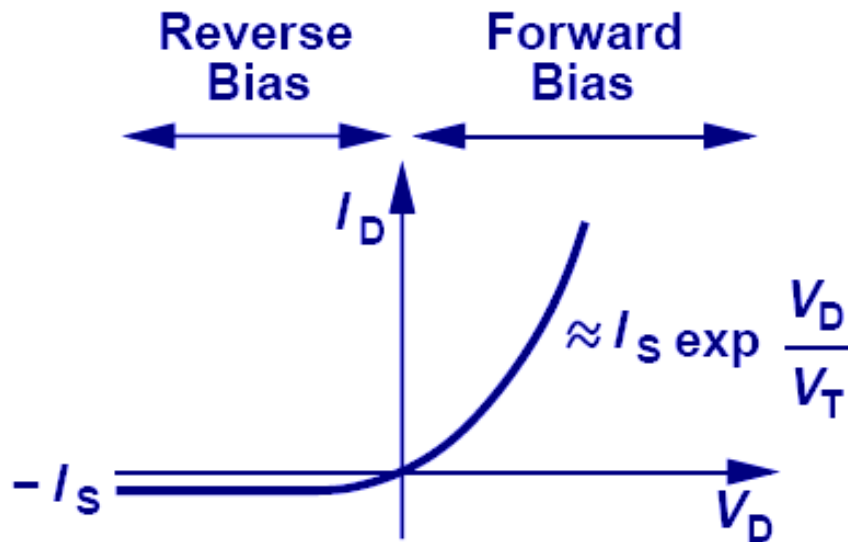
➤ I_s é chamada Corrente de Saturação Reversa, seu valor depende do modelo do Diodo e pode ser obtido em consulta à Folha de Dados do Componente – Datasheet.

Polarização Direta: Resumo



- Na polarização direta, há grandes correntes de difusão de portadores minoritários através da junção, que se recombina com os portadores majoritários do outro lado da barreira.
- No entanto, à medida que avançamos além da barreira, as correntes devido aos portadores majoritários dominam.
- Estas duas correntes se somam e resultam em um valor constante.

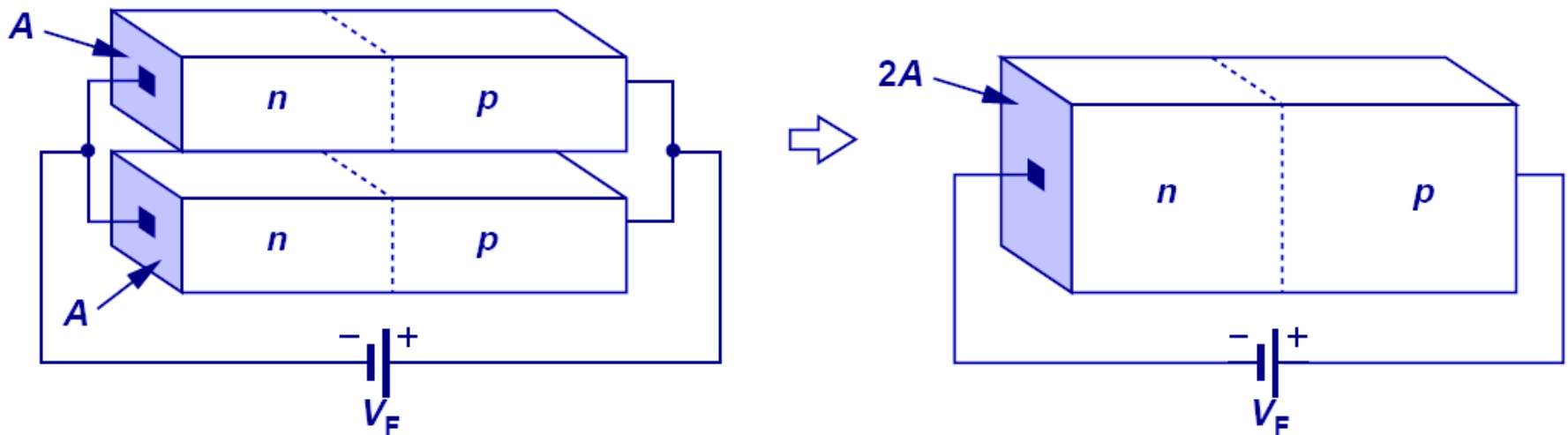
Curva Característica da Junção PN



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

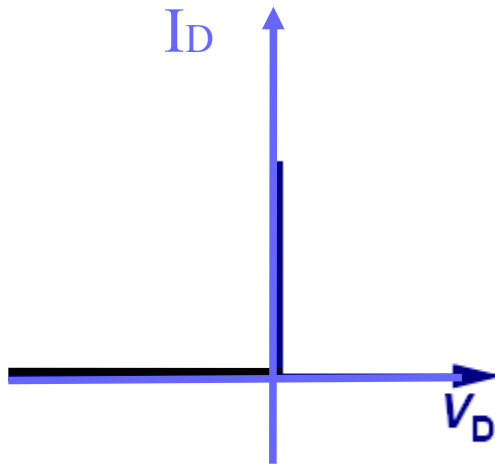
- A relação Tensão - Corrente em uma junção PN é uma exponencial na região de polarização direta, e aproximadamente constante na região de polarização inversa.
- $V_T = K.T/q$ é chamada de Tensão Termal e à temperatura ambiente (300 K), $V_T = 26$ mV.

Junções PN em Paralelo



Desde que correntes de junção são proporcionais à área da secção transversal da junção, duas junções PN colocados em paralelo são consideradas uma junção PN com o dobro da área de secção transversal, e, portanto, o dobro da corrente.

Modelo Ideal



(a)

$$V_D < 0$$



$$V_D = 0$$

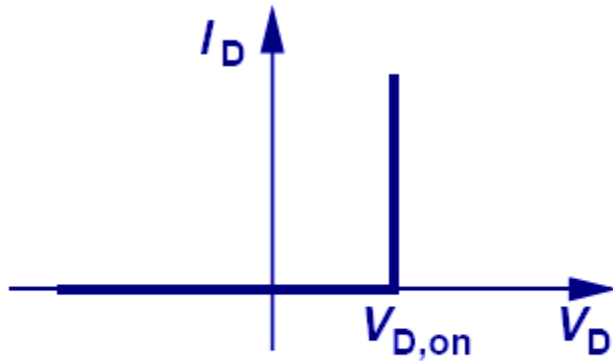


(b)

O Diodo funciona como:

- um circuito aberto ou chave aberta se $V_D < 0$; e
- um curto-circuito ou uma chave fechada , quando V_D tende para um valor positivo.

Modelo Tensão Constante



(a)

$$V_D < V_{D,on}$$



$$V_D = V_{D,on}$$

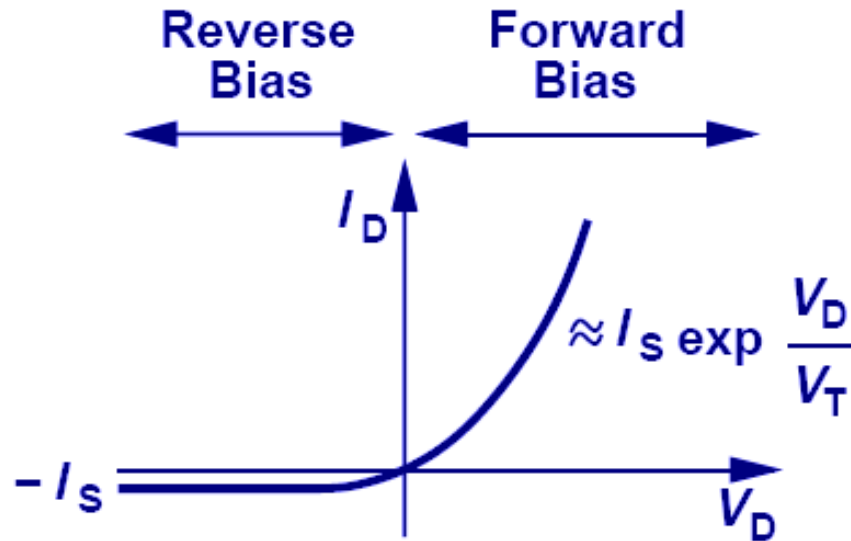


(b)

O Diodo funciona como:

- um circuito aberto se $V_D < V_{D,on}$; e
- uma fonte de tensão constante de valor $V_{D,on}$, quando V_D tende exceder $V_{D,on}$.

Modelo Real ou Exponencial



A corrente no Diodo tem um comportamento exponencial com relação à tensão V_D aplicada nos terminais do componente.

Exemplo: Modelo Exponencial – Método Iterativo

1) Escolha $V_{D1} = 750 \text{ mV}$ (Estimativa Inicial);

2) Calcule $I_x = (V_x - V_{D1})/R_1$, equação de Malha;

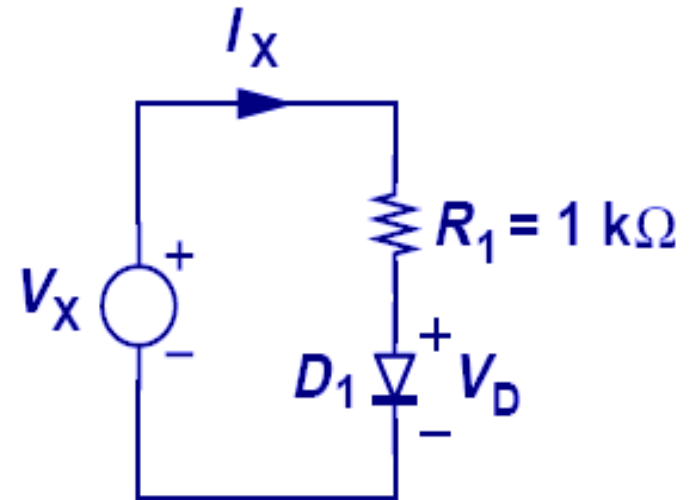
3) Calcule V_D atualizado: $V_{D2} = V_T \cdot \ln(I_x/I_s)$,
via equação do diodo na forma neperiana;

4) Calcule $|V_{D1} - V_{D2}|$;

5) Verifique se $|V_{D1} - V_{D2}| < \text{eps}$, onde eps é o erro aceitável.
Por exemplo $\text{eps} = 0,01 \text{ mV}$.

6) Se a desigualdade for :

- Verdadeira, então FIM, pois o algoritmo convergiu.
- Falsa, então volte ao passo 1), utilizando V_D atualizado, ie, $V_{D1} = V_{D2}$.



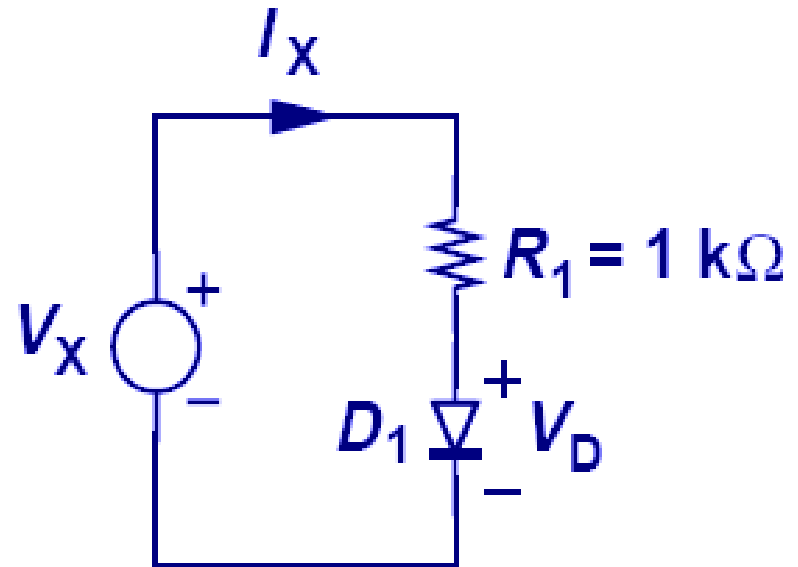
Exemplo: Modelo Exponencial – Método Iterativo

- 1) Seja $V_{D1} = 750 \text{ mV}$
- 2) $I_x = (V_x - V_{D1}) / R_1 = 2,25 \text{ mA}$
- 3) $V_{D2} = V_T \cdot \ln(I_x / I_s) = 799 \text{ mV}$,
 $V_T = 26 \text{ mV}$ e $I_s = 10^{-16} \text{ A}$
- 4) $|V_{D1} - V_{D2}| =$
 $|750 \text{ mV} - 799 \text{ mV}| = 49 \text{ mV} (> 0,01 \text{ mV})$

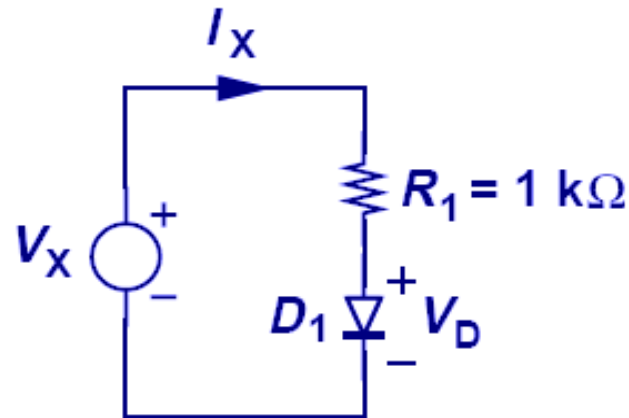
- Então, de volta ao passo 1)

- 1) Seja $V_{D1} = 799 \text{ mV}$
- 2) $I_x = (V_x - V_{D1}) / R_1 = 2,201 \text{ mA}$
- 3) $V_{D2} = V_T \cdot \ln(I_x / I_s) = 798,7 \text{ mV}$
- 4) $|V_{D1} - V_{D2}| = |799 \text{ mV} - 798,7 \text{ mV}| = 0,3 \text{ mV} < 0,01 \text{ mV} \rightarrow$ algoritmo convergiu.

Logo, $V_D = 799 \text{ mV}$ e $I_x = 2,2 \text{ mA}$



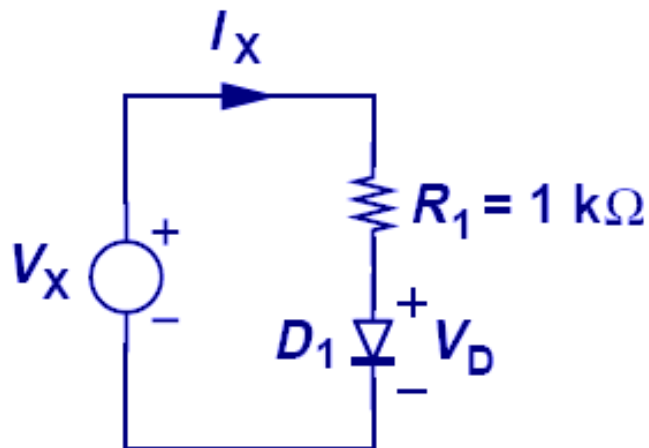
Ex: Modelo Tensão Constante – mais simples!!!



1) Considere os $V_D = V_{D,on}$. Assim, $V_D = 800\text{ mV (Si)}$ ou $V_D = 300\text{ mV (Ge)}$

2) $I_X = (V_X - V_D) / R_1 = (3 - 0,8) / 1\text{K} = 2,2\text{ m A}$

Exemplo: DIODO - CONCLUSÃO



$$V_X = I_X R_1 + V_D = I_X R_1 + V_T \ln \frac{I_X}{I_S}$$
$$I_X = 2.2 \text{ mA} \quad \text{for} \quad V_X = 3 \text{ V}$$
$$I_X = 0.2 \text{ mA} \quad \text{for} \quad V_X = 1 \text{ V}$$

Este exemplo mostra a simplicidade de utilização do Modelo Tensão Constante quando comparado ao modelo Exponencial ou Real.
O Modelo Exponencial requer o método iterativo, enquanto os Modelos Ideal ou Tensão Constante, requerem apenas equações lineares.