

A microscopic view of several cells, likely from a plant or animal, showing cell walls and internal structures. The background is a solid light blue color.

Capitulo 3

Diodos

REOF. ELETRÔNICA I (PSI3321) 2o. Semestre de 2016 (assuntos P1)

Livro Texto: Sedra&Smith, K.C. Microeletrônica. Pearson, 2007, (tradução da 5a. Ed. em inglês)

| Aula | Matéria da Primeira Prova | Capítulo/página |
|----------|--|-----------------------------|
| 1ª 02/08 | Introdução, O primeiro Amp Op Comercial. Encapsulamento do Amp Op, O Amp Op ideal, Análise de circuitos com Amp Ops ideais. Exemplo 2.2 | Cap. 2 p. 38-46 |
| 2ª 04/08 | Somador, Configuração não inversora, seguidor, amplificador de diferenças. Exercício 2.15 | Sedra, Cap. 2 p. 46-53 |
| 3ª 09/08 | Amplificador de instrumentação, Funcionamento dos Amp Ops Não-Ideais. Exemplo 2.3 e 2.4 | Sedra, Cap. 2 p. 53-59 |
| 4ª 11/08 | Operação dos Amp Ops em grande excursão de sinal, imperfeições cc, circuitos integrador e diferenciador. Exemplo 2.6. | Sedra, Cap. 2 p. 59-73 |
| 5ª 16/08 | Diodo ideal, características do diodo real, equação de corrente do diodo, exercícios. | Sedra, Cap. 3 p. 89-96 |
| 6ª 18/08 | Análise gráfica (reta de carga), modelos simplificados de diodos, exercícios | Sedra, Cap. 3 p. 96-99 |
| 7ª 23/08 | Modelo para pequenos sinais, modelos de circuitos equivalentes para pequenas variações (próximas do ponto quiescente), exercícios (exemplos 3.6 e 3.7) | Sedra, Cap. 3 p. 100-103 |
| 8ª 25/08 | Operação na região de ruptura reversa, diodo zener, Projeto de um regulador Zener, exercícios (exemplo 3.8) | Sedra, Cap. 3 p. 104-106 |
| 9ª 30/08 | Aula de Exercícios | |

1ª. Semana de provas (29/08 a 02/09/2016) Data: 30/08/2016 (quinta feira) – Horário: 7:30h

Semana da Pátria (05/09 a 09/09/2016)

REOF. ELETRÔNICA I (PSI3321) 2o. Semestre de 2016 (assuntos P2)

Livro Texto: Sedra&Smith, K.C. Microeletrônica. Pearson, 2007, (tradução da 5a. Ed. em inglês)

| | | |
|--------------------------|--|---|
| 10 ^a 13/09 | Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação c.c., circuito retificador de meia onda, circuito retificador de onda completa com enrolamento secundário com tomada central, exercícios: 3.22. | Sedra, Cap. 3 p. 106-109 |
| 11 ^a 15/09 | Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro. | Sedra, Cap. 3 p. 109-111 |
| 12 ^a 20/09 | Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9). | Sedra, Cap. 3 p. 112-115 |
| 13 ^a 22/09 | Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28. | Sedra, Cap. 3 p. 115-118 |
| 14 ^a 27/09 | Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios. | Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 117-121 |
| 15 ^a 29/09 | Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios. | texto avulso + Sedra, Cap. 3 p. 121-126 |
| 16 ^a 04/10 | Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios. | Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 127-128 |
| 17 ^a 06/10 | Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção, a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios. | Sedra, Cap. 3 p. 124-125 e p. 128-129 |
| 18 ^a 11/10 | Aula de Exercícios (se estiver em fase) | |

2^a. Semana de Provas (13/10 a 19/10/2016) Data: **a combinar** – Horário: 7:30h??

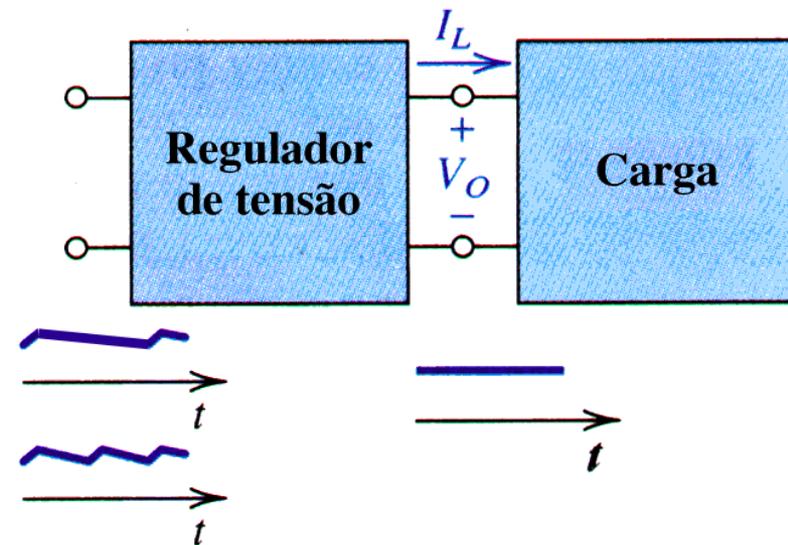
10ª Aula:

Circuitos Retificadores

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

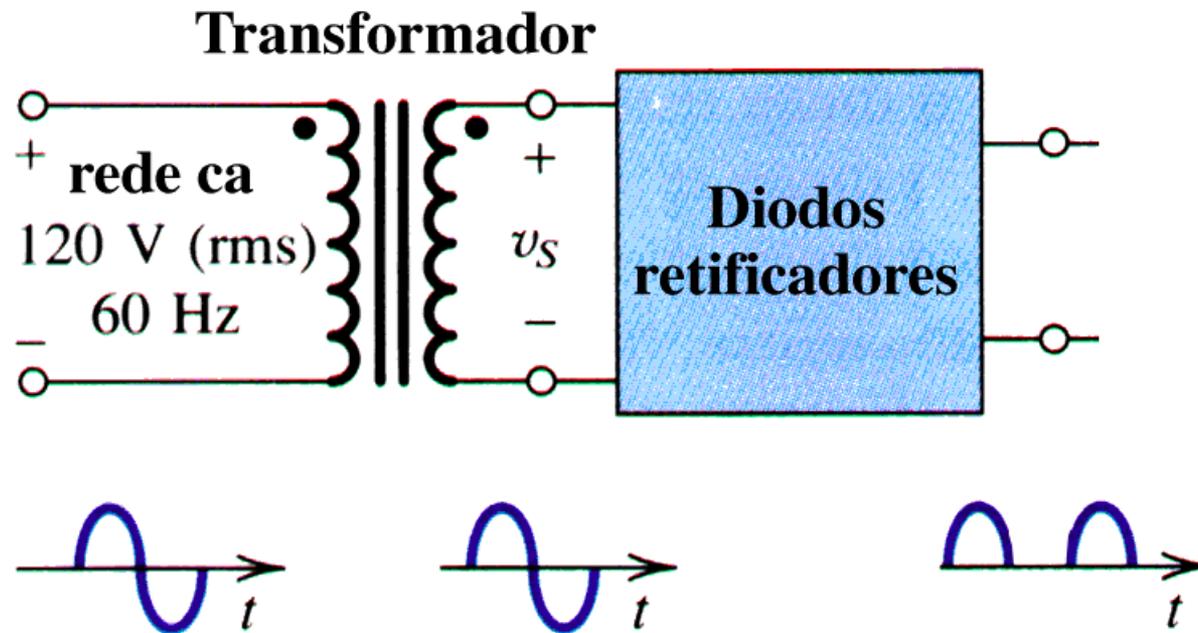
- Explicar o funcionamento de circuitos retificadores com diodos meia-onda e onda completa**
- Desenhar as formas de onda de tensão e corrente em circuitos retificadores com diodos**
- Determinar os valores de pico da tensão de saída (na carga) e da corrente reversa nos diodos**
- Explicar o funcionamento do filtro capacitivo para circuitos regulares**
- Calcular as tensões e correntes em um circuito retificador em ponte com filtro capacitivo e carga**

Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores



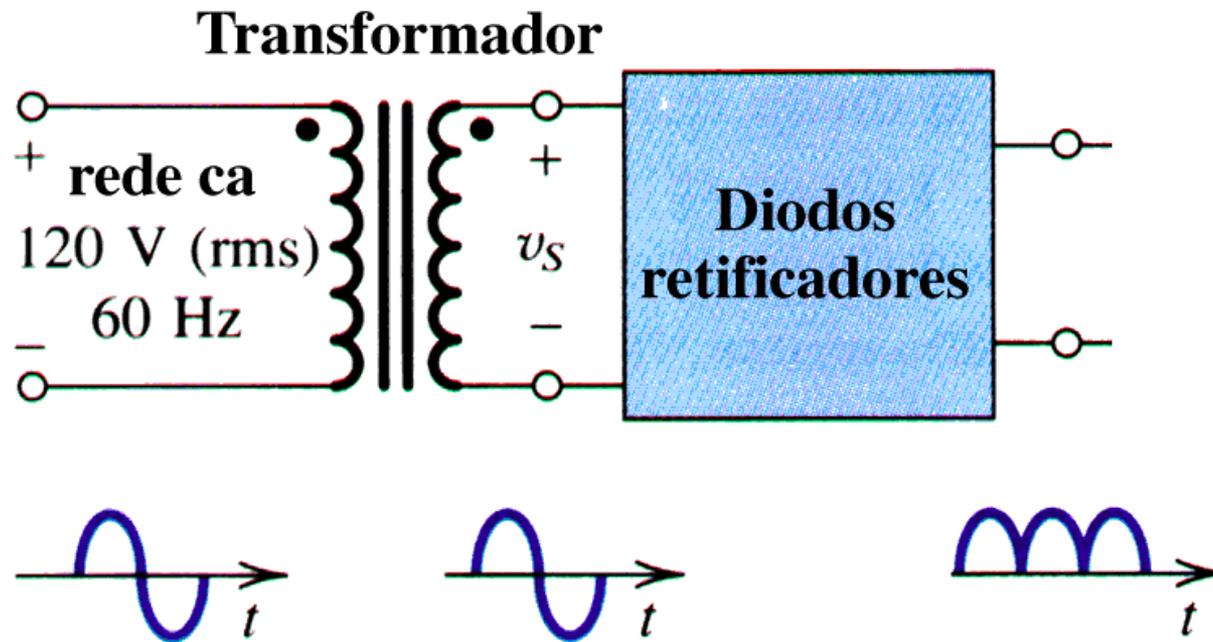
O Bloco de Retificação (com Diodos Retificadores)

Meia Onda



O Bloco de Retificação (com Diodos Retificadores)

Onda Completa



O Bloco de Retificação (com Diodos Retificadores)

Como Analisar? Que modelo utilizar?

-Grandes sinais;

-Modelos CC:

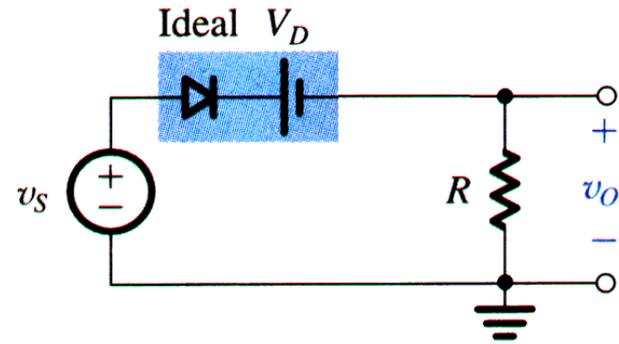
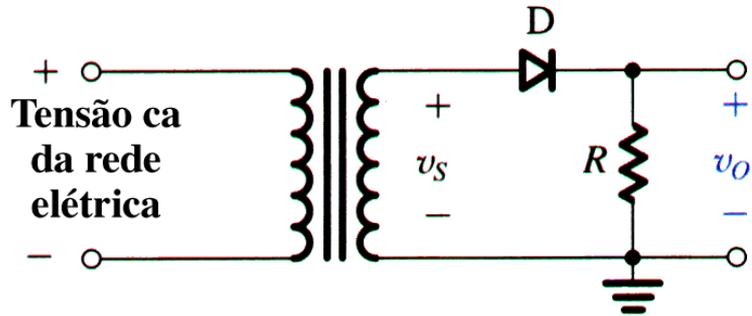
- Chave aberta/fechada

- Bateria

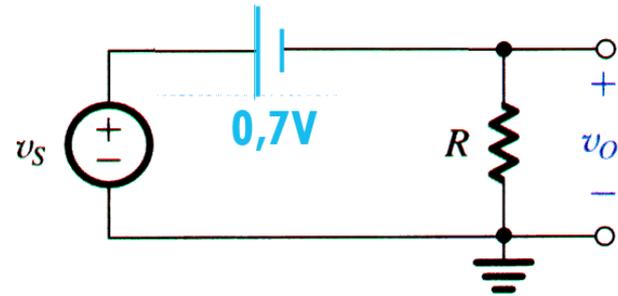
- Bateria + r_D

**é utilizado brevemente no livro,
na prática é pouquíssimo utilizado**

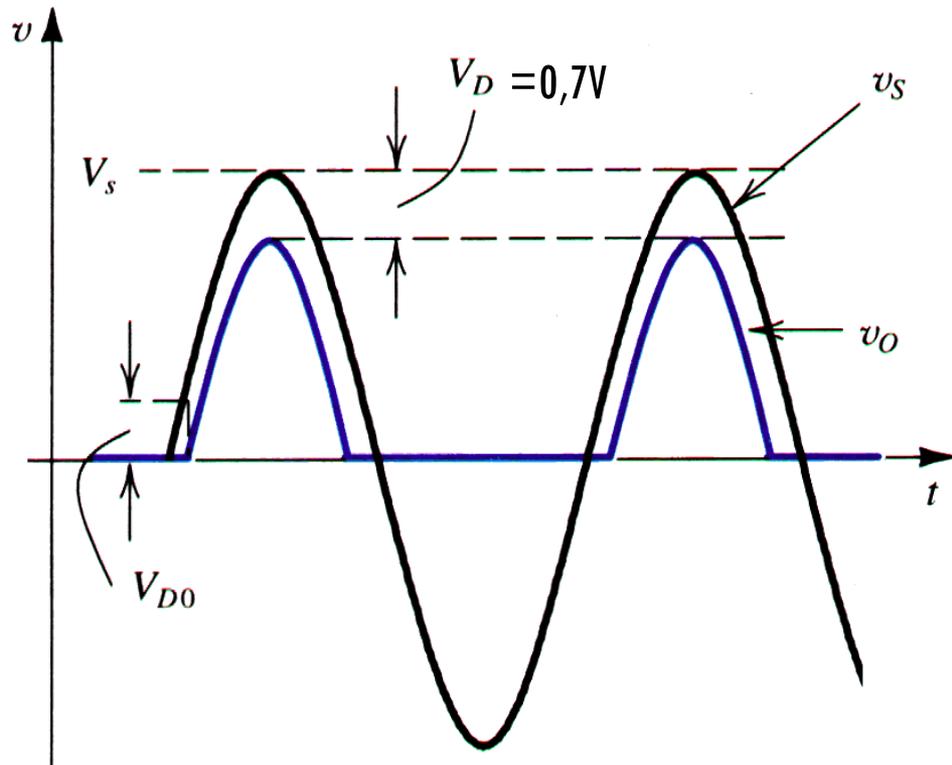
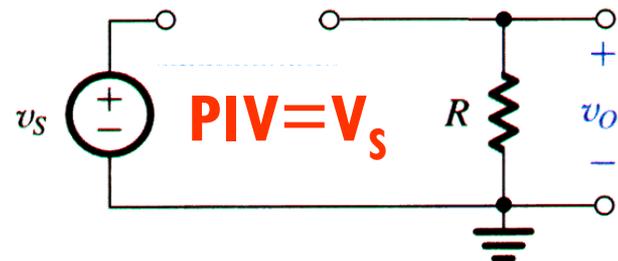
O Bloco de Retificação (Retificador Meia Onda)



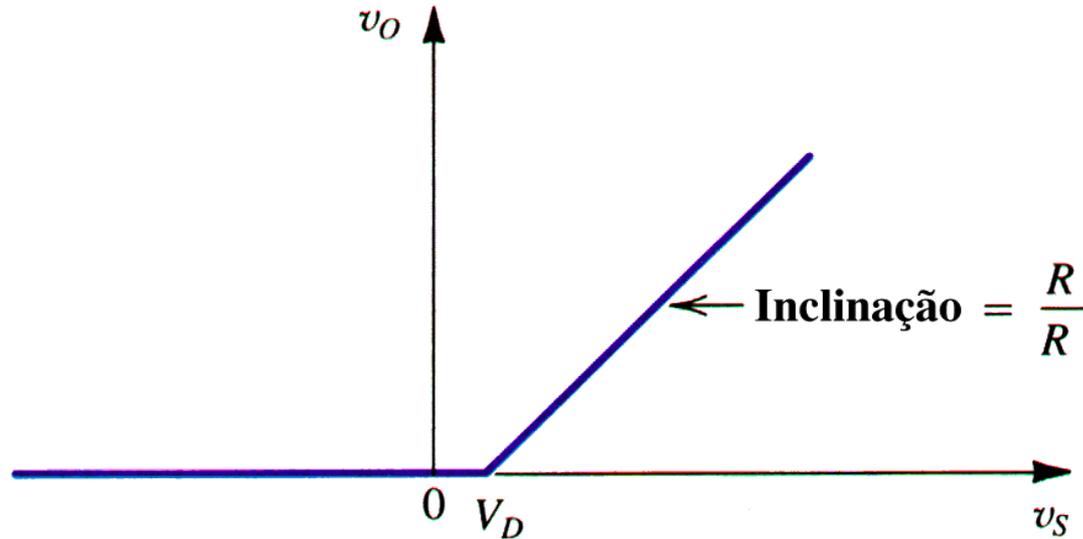
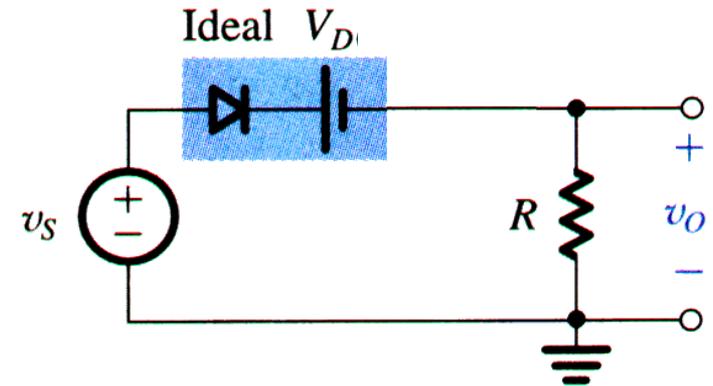
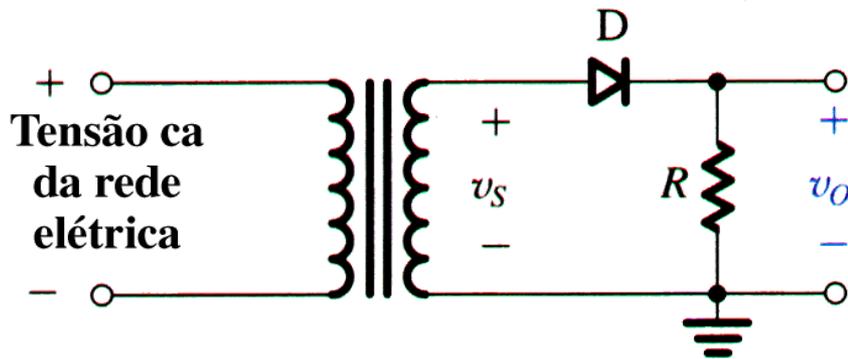
semiciclo +



semiciclo -

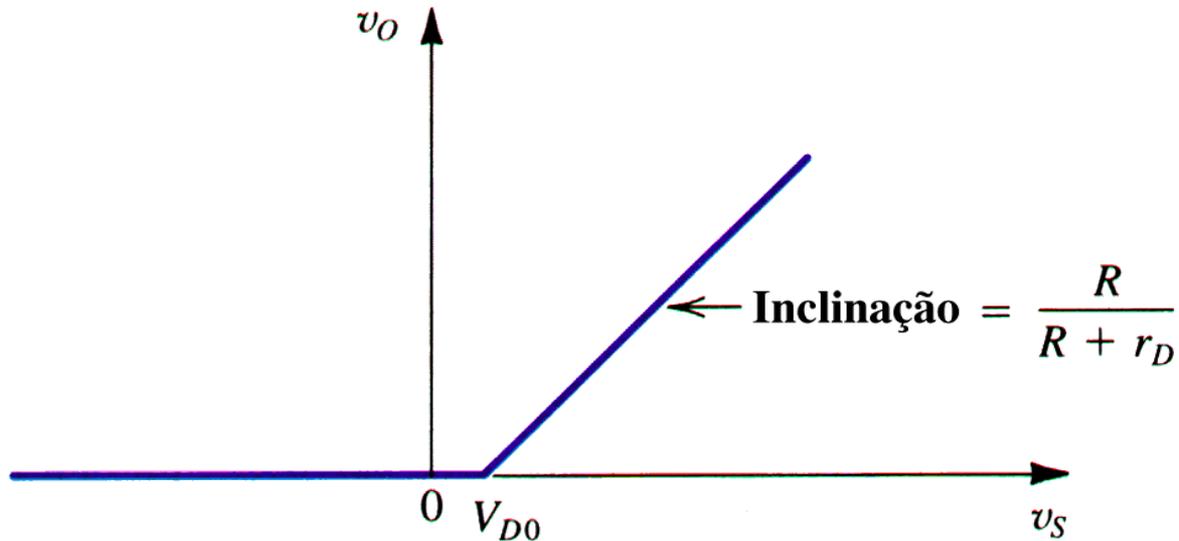
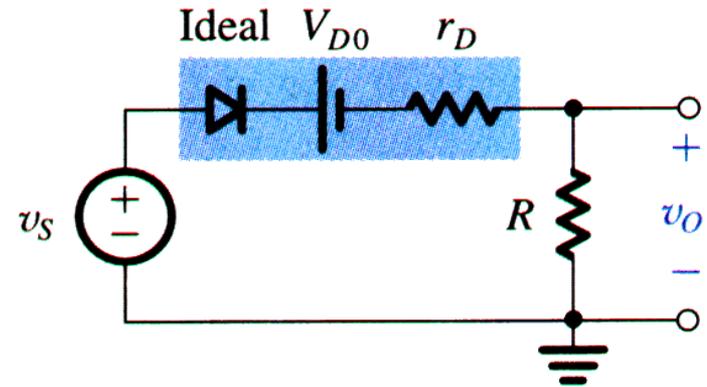
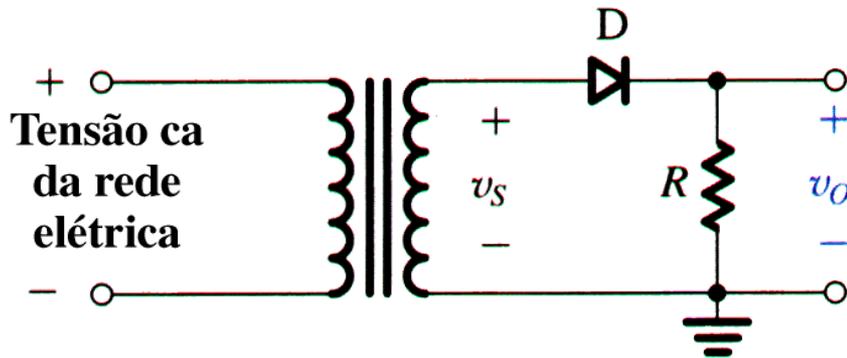


O Bloco de Retificação (Retificador Meia Onda)

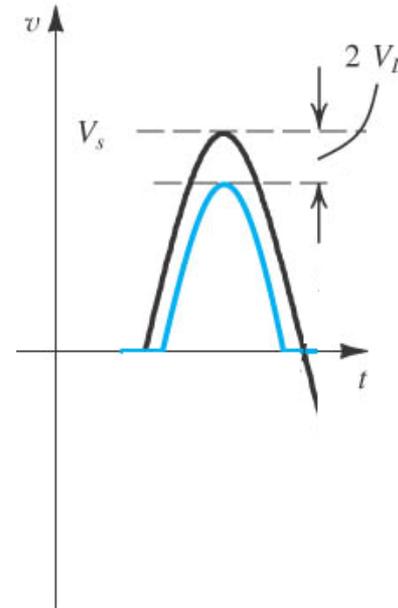
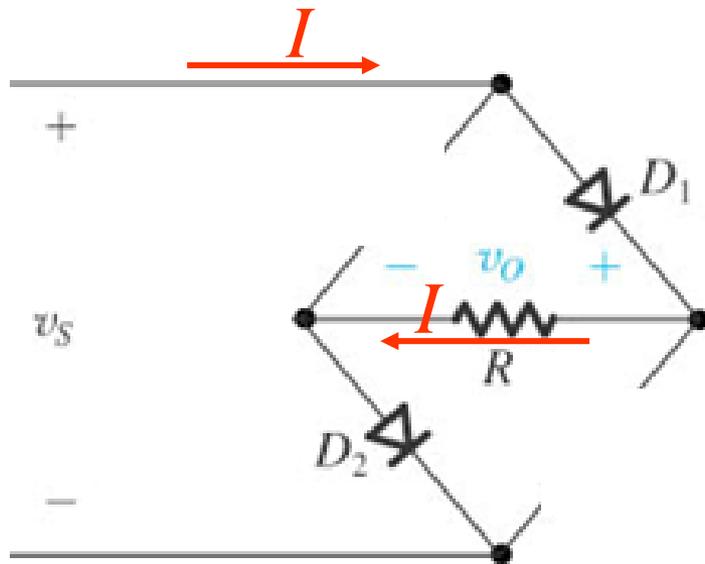
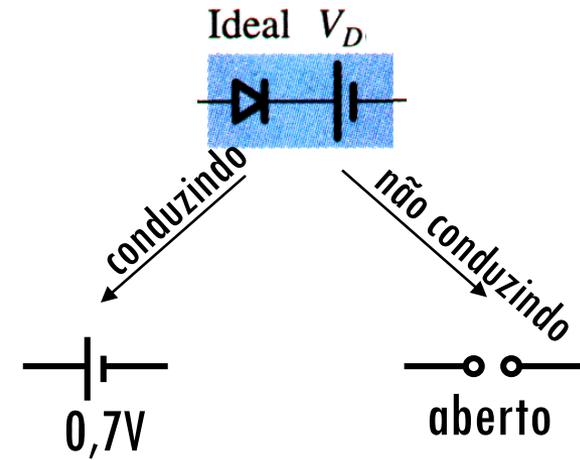
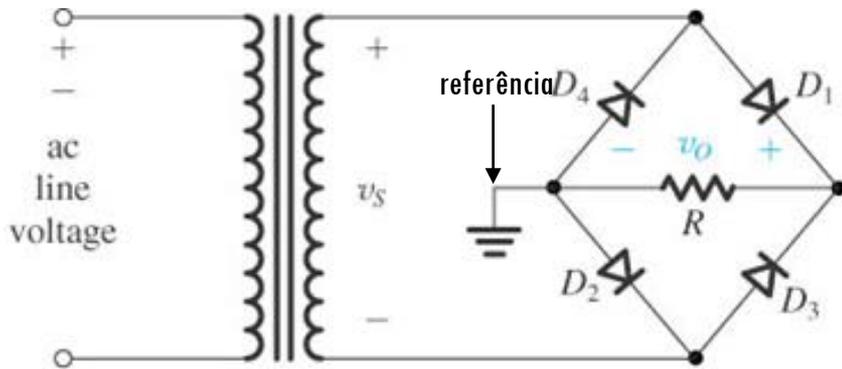


O Bloco de Retificação

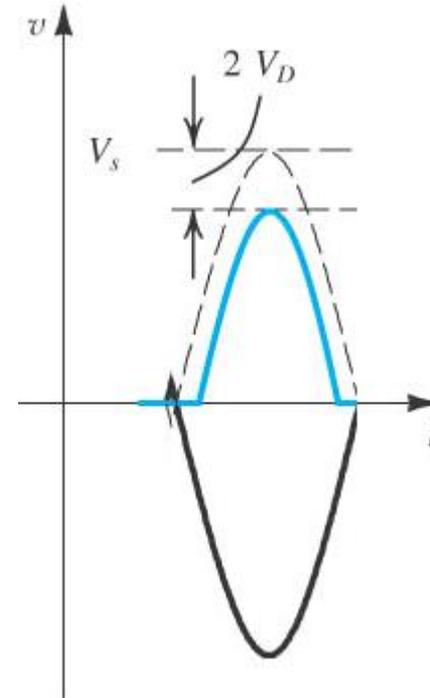
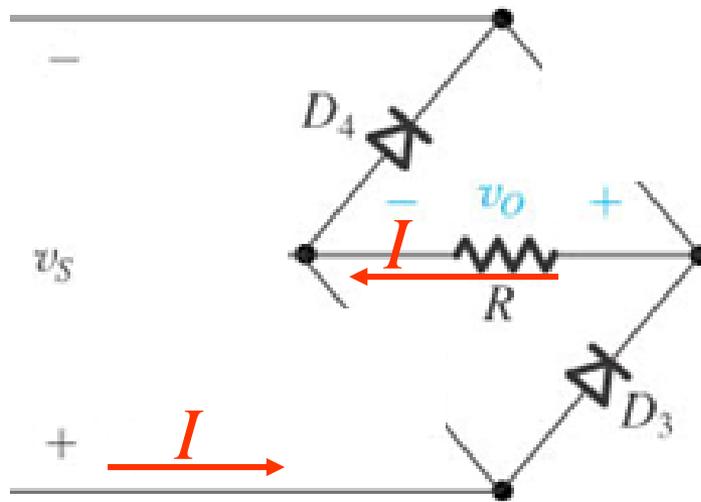
(Retificador Meia Onda – modelo Bat+Res)



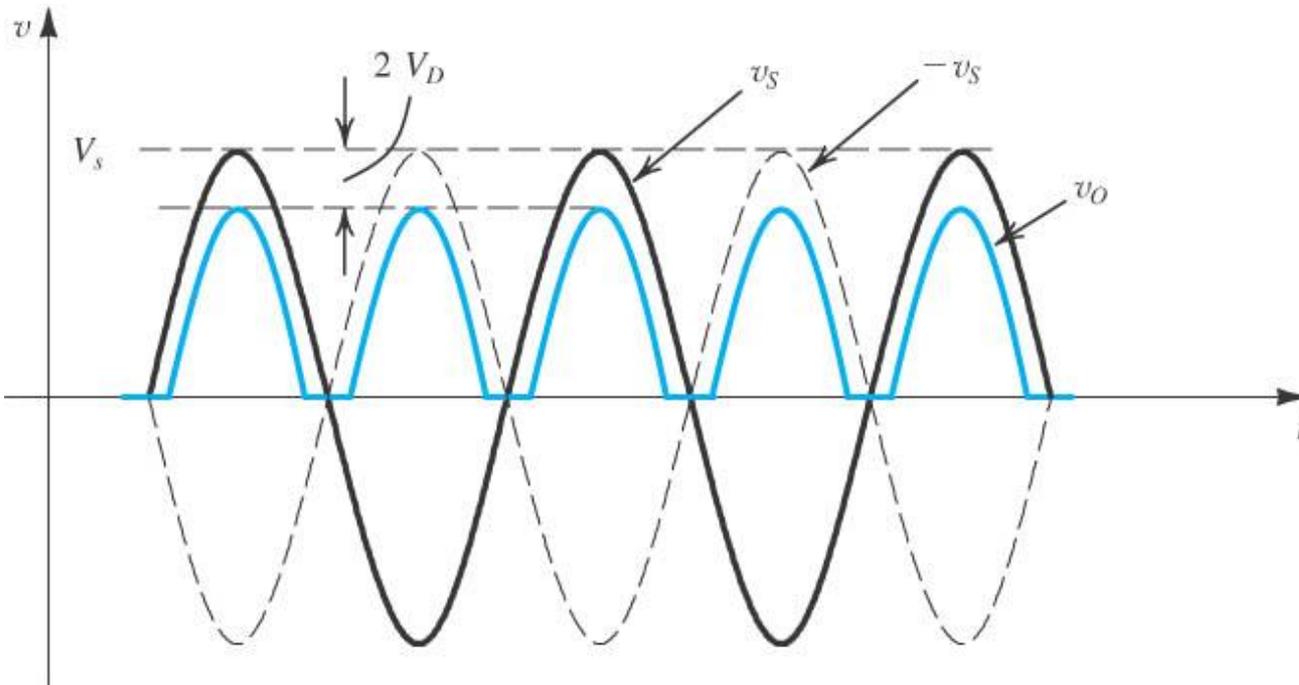
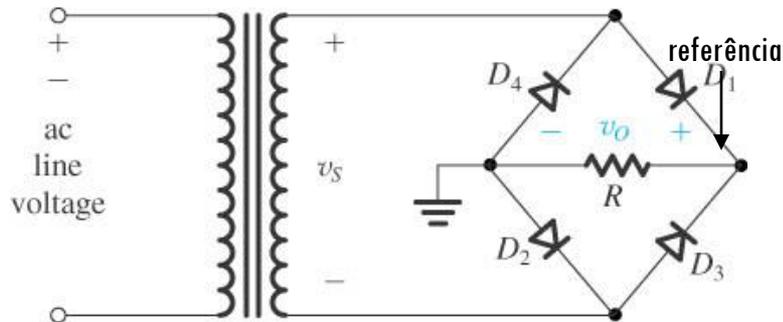
O Bloco de Retificação (Retificador Onda Completa – em ponte)



O Bloco de Retificação (Retificador Onda Completa – em ponte)

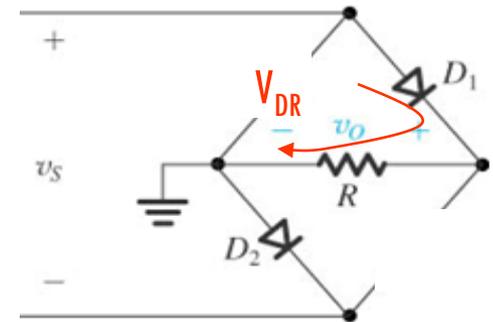


O Bloco de Retificação (Retificador Onda Completa – em ponte)



(b)

PIV:



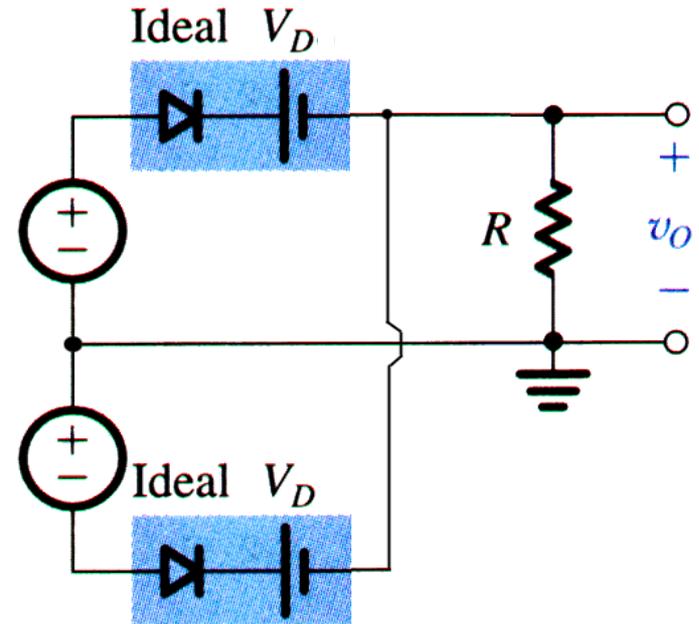
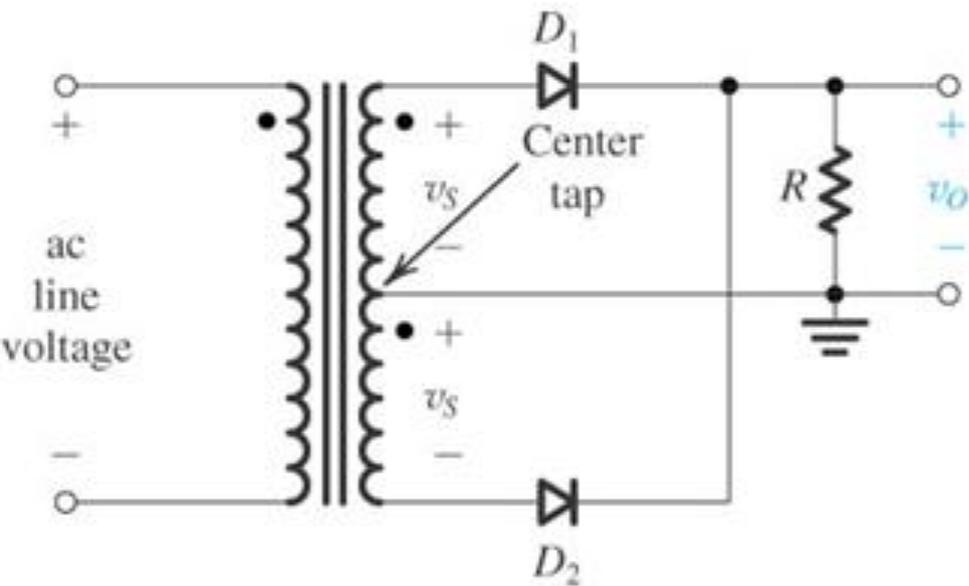
$$V_{Dreverso} = V_O + V_{D1}$$

$$V_{DR} = (V_S - 2V_D) + V_D$$

$$V_{DR} = V_S - V_D$$

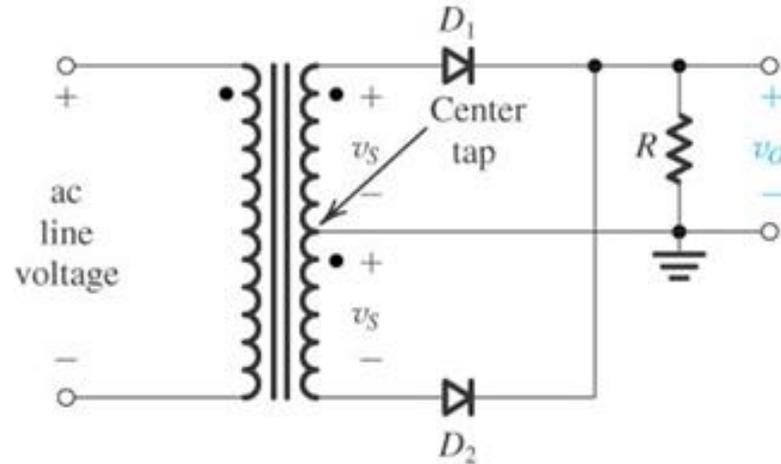
O Bloco de Retificação

(Retificador Onda Completa com Derivação Central - Tap)

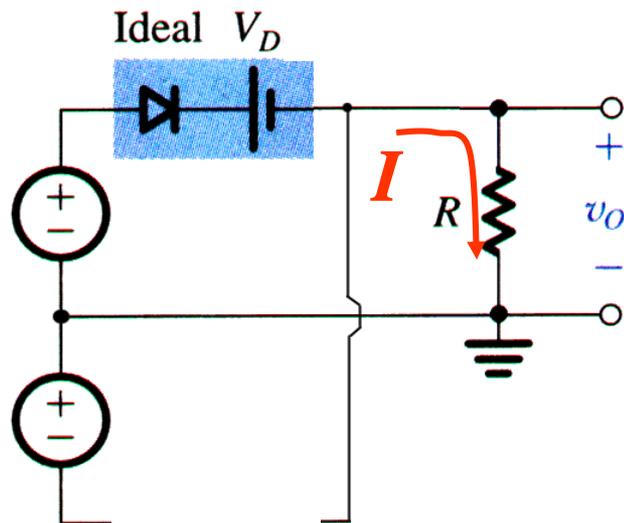


O Bloco de Retificação

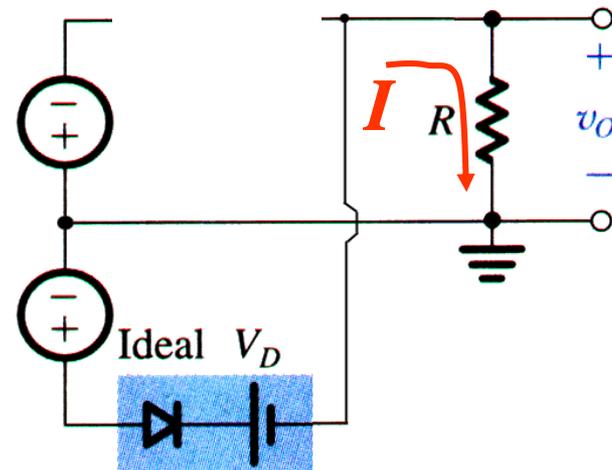
(Retificador Onda Completa com Derivação Central - Tap)



Ciclo Positivo

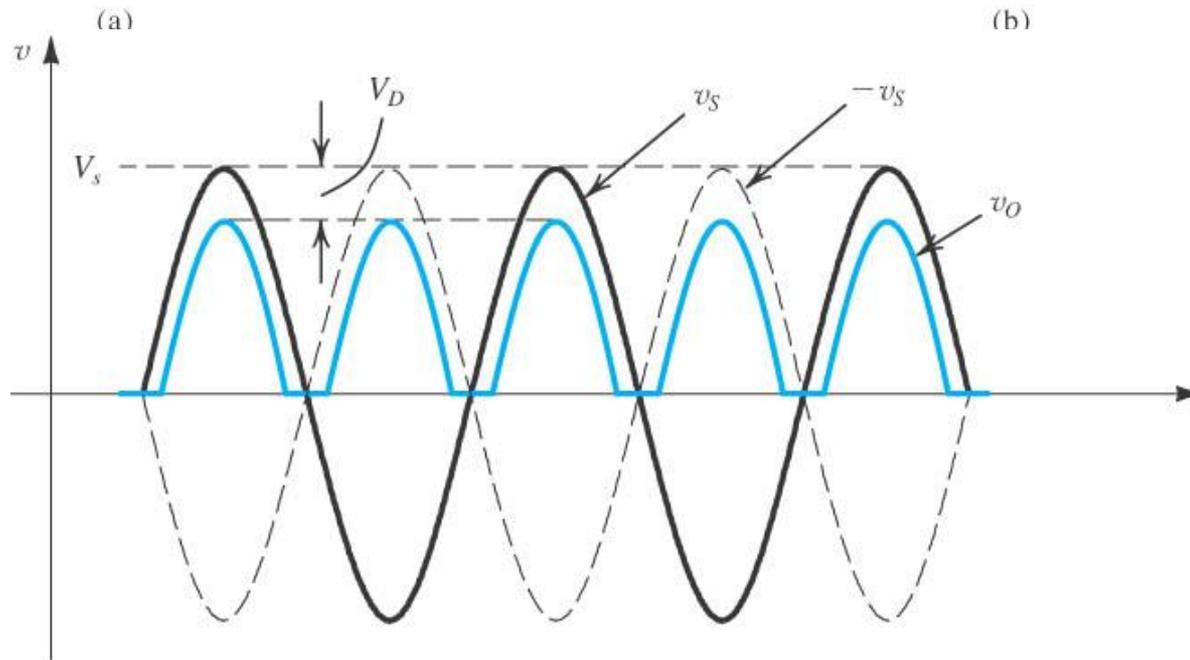
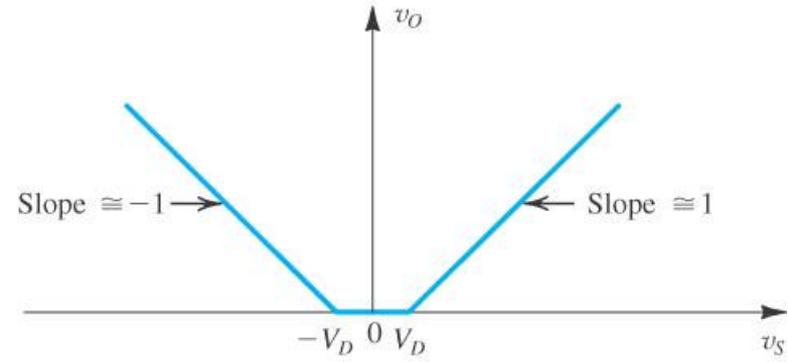
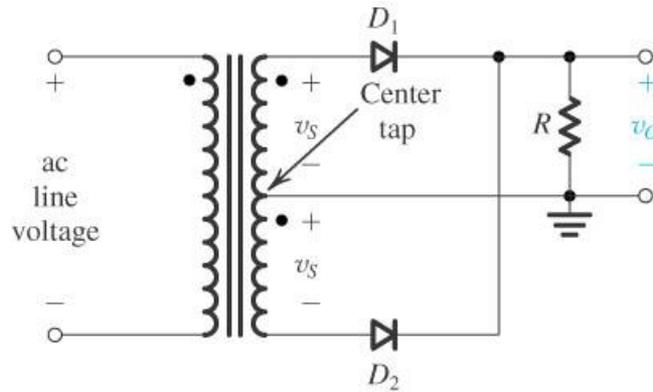


Ciclo Negativo



O Bloco de Retificação

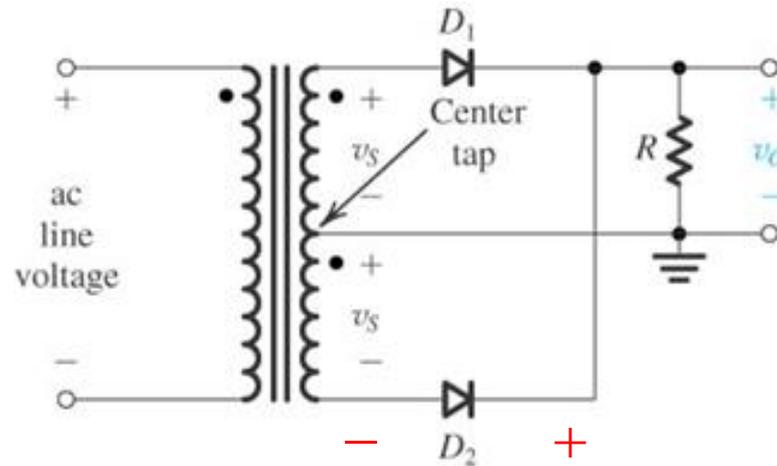
(Retificador Onda Completa com Derivação Central - Tap)



(c)

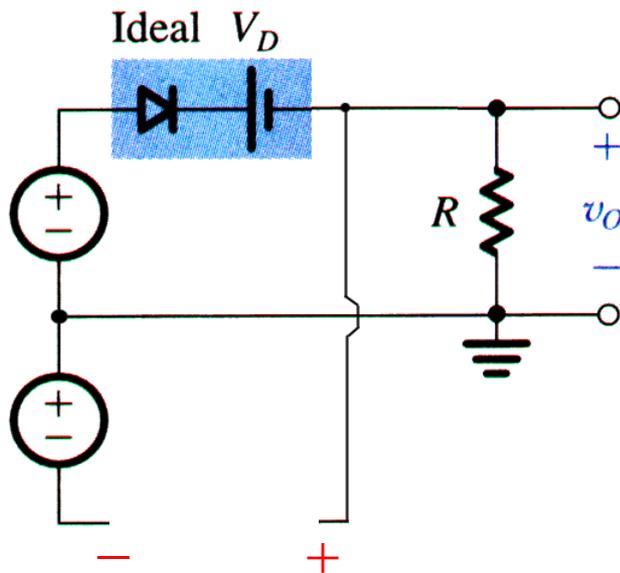
O Bloco de Retificação

(Retificador Onda Completa com Derivação Central - Tap)

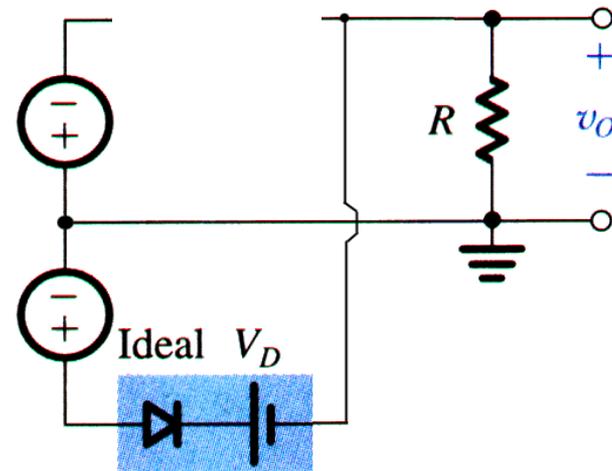


$$PIV = 2V_S - V_D$$

Ciclo Positivo



Ciclo Negativo



REOF. ELETRÔNICA I (PSI3321) 2o. Semestre de 2016 (assuntos P2)

Livro Texto: Sedra&Smith, K.C. Microeletrônica. Pearson, 2007, (tradução da 5a. Ed. em inglês)

| | | |
|--------------------------|--|---|
| 10 ^a 13/09 | Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação c.c., circuito retificador de meia onda, circuito retificador de onda completa com enrolamento secundário com tomada central, exercícios: 3.22. | Sedra, Cap. 3 p. 106-109 |
| 11 ^a 15/09 | Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro. | Sedra, Cap. 3 p. 109-111 |
| 12 ^a 20/09 | Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9). | Sedra, Cap. 3 p. 112-115 |
| 13 ^a 22/09 | Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28. | Sedra, Cap. 3 p. 115-118 |
| 14 ^a 27/09 | Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios. | Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 117-121 |
| 15 ^a 29/09 | Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios. | texto avulso + Sedra, Cap. 3 p. 121-126 |
| 16 ^a 04/10 | Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios. | Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 127-128 |
| 17 ^a 06/10 | Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção, a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios. | Sedra, Cap. 3 p. 124-125 e p. 128-129 |
| 18 ^a 11/10 | Aula de Exercícios (se estiver em fase) | |

2^a. Semana de Provas (13/10 a 19/10/2016) Data: **a combinar** – Horário: 7:30h??

11^a Aula:

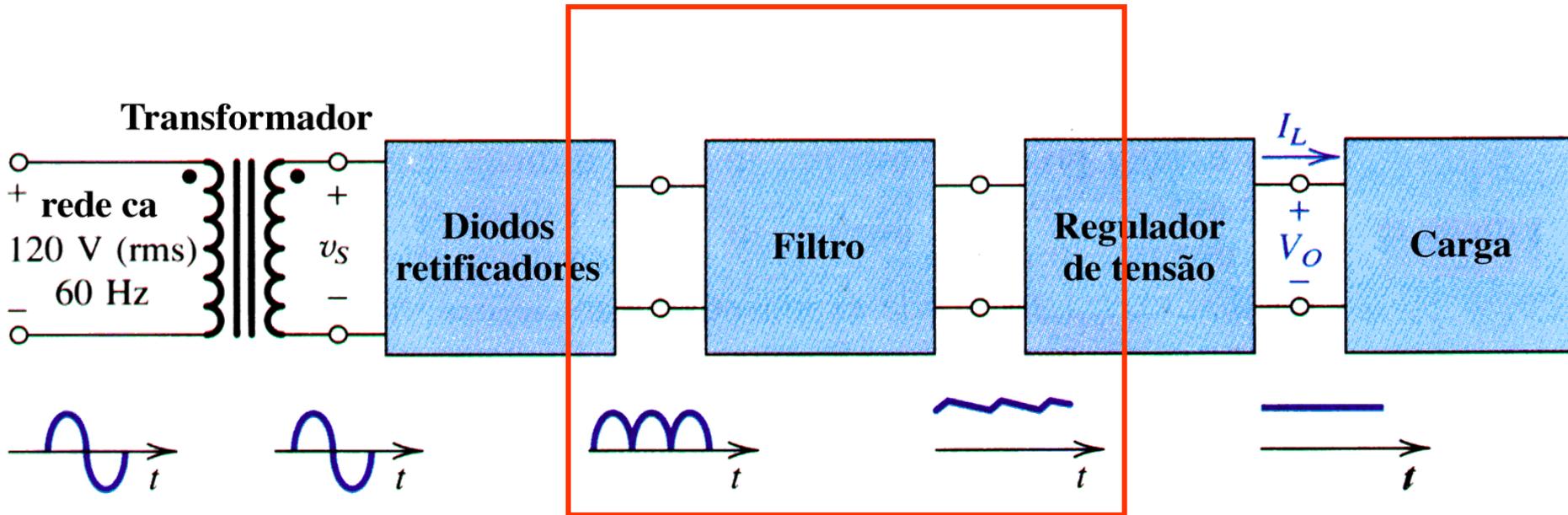
Circuitos Retificadores

- Finalizar a matéria e exercícios.**

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

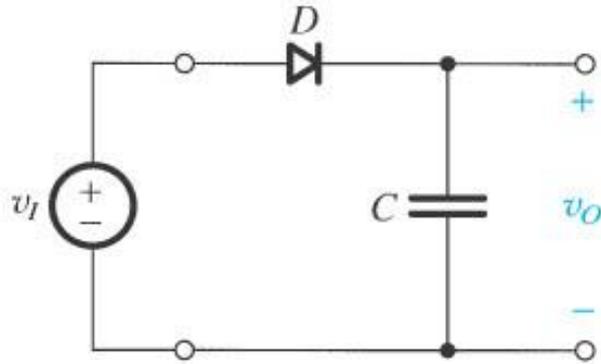
- Explicar o funcionamento do filtro capacitivo para circuitos reguladores**
- Determinar os valores de pico da tensão de saída (na carga) e da corrente reversa nos diodos em retificadores meia onda e onda completa**
- Explicar o funcionamento de circuitos limitadores e grampeadores**
- Determinar a forma de onda de saída em circuitos limitadores**

Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores

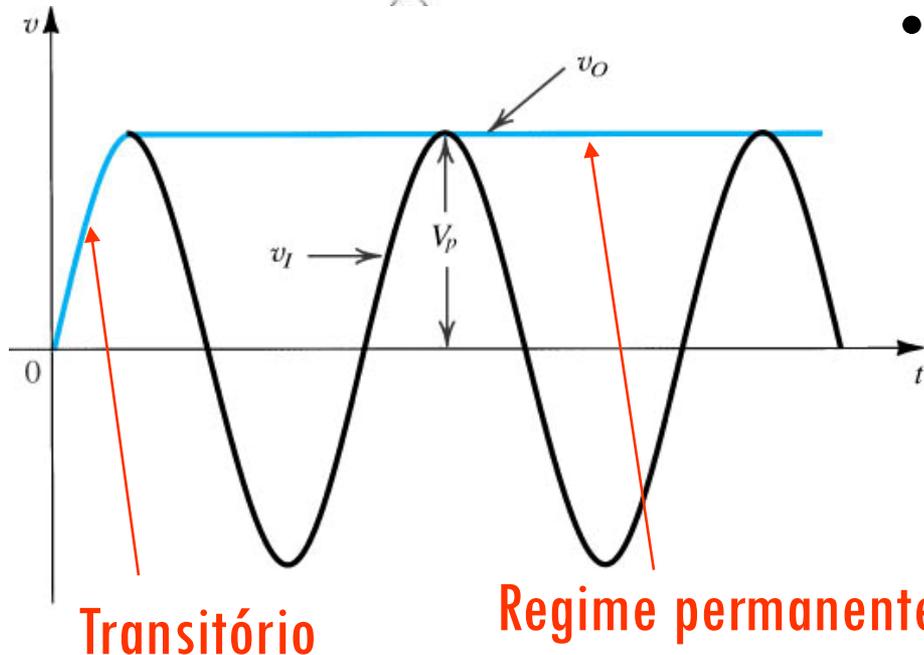


O Retificador com Bloco de Filtro

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor – Retificador de Pico)



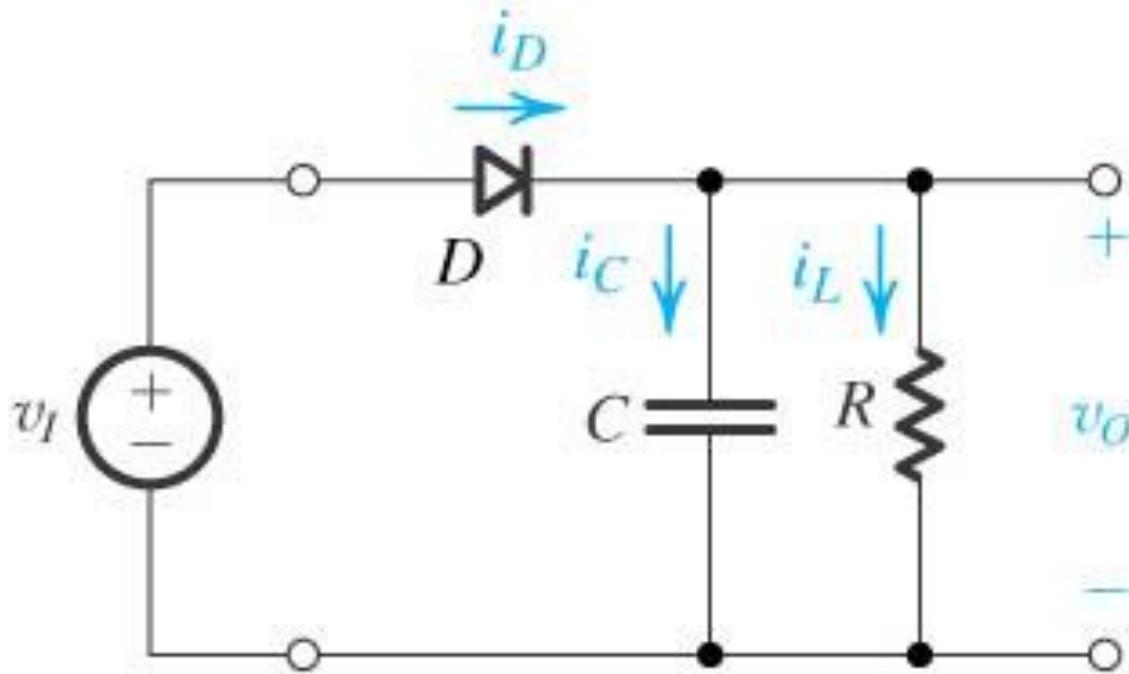
- Sinal (comportamento) variável no tempo
- Que modelo utilizar?
 - pequenos sinais?
 - qual modelo CC?
 - modelo DIODO IDEAL inicial//



O Retificador com Bloco de Filtro

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor – Retificador de Pico)

E com carga?



(a)

Atenção:

$$i_D = i_C + i_L$$

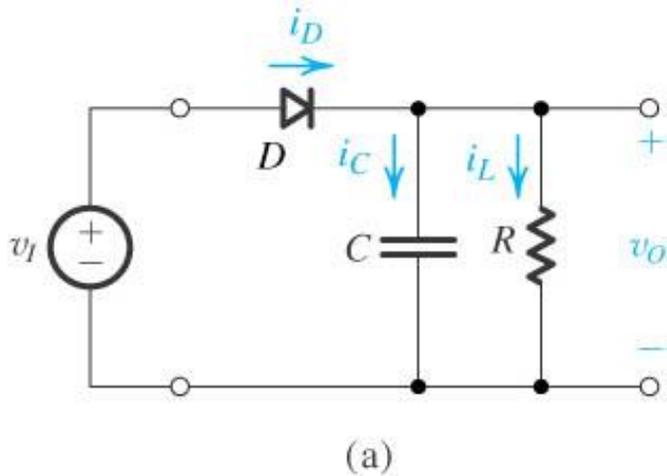
$$v_o = \frac{1}{C} \int_0^T i_C dt$$

$$v_o = R_L i_L$$

Quando o diodo conduz: $v_o(t) = v_i(t)$

O Retificador com Bloco de Filtro

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor – Retificador de Pico)



Quando o diodo conduz: $v_O(t) = v_i(t)$

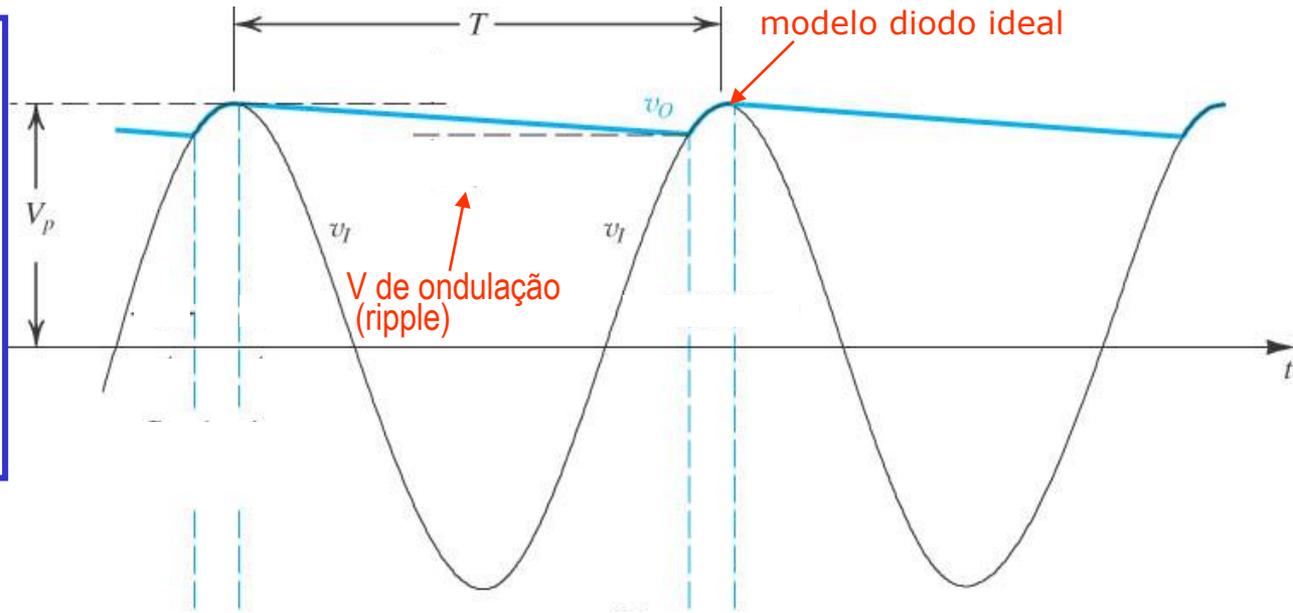
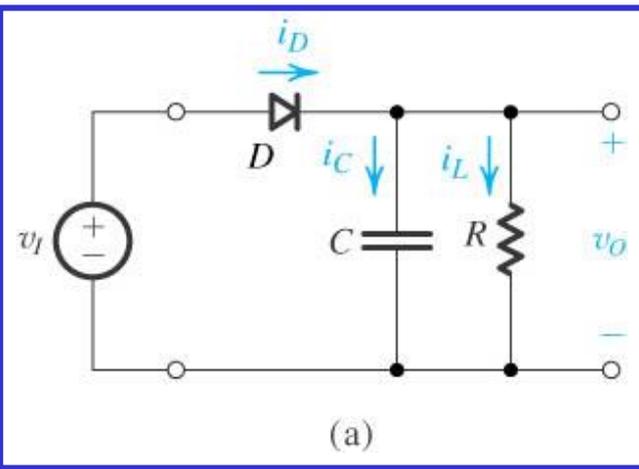
$$i_D = i_C + i_L$$

$$v_O = v_I = \frac{1}{C} \int_0^T i_C dt \Rightarrow i_C = C \frac{dv_I}{dt}$$

$$v_O = R_L i_L \Rightarrow i_L = \frac{v_O}{R_L}$$

O Retificador com Bloco de Filtro

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor – Retificador de Pico)



$$i_L = v_O / R$$

Quando D está conduzindo:

$$i_D = i_C + i_L$$

$$= C \frac{dv_I}{dt} + i_L$$

Dpico

Dmédio

Lmédio

Determinando V_o (valor médio) e V_r

$$V_{O(médio)} = V_p - \frac{1}{2} V_r$$

Quando $CR \gg T$ (V_r pequeno):

$$i_{L(médio)} = \frac{V_p}{R}$$

Para $CR \gg T$:

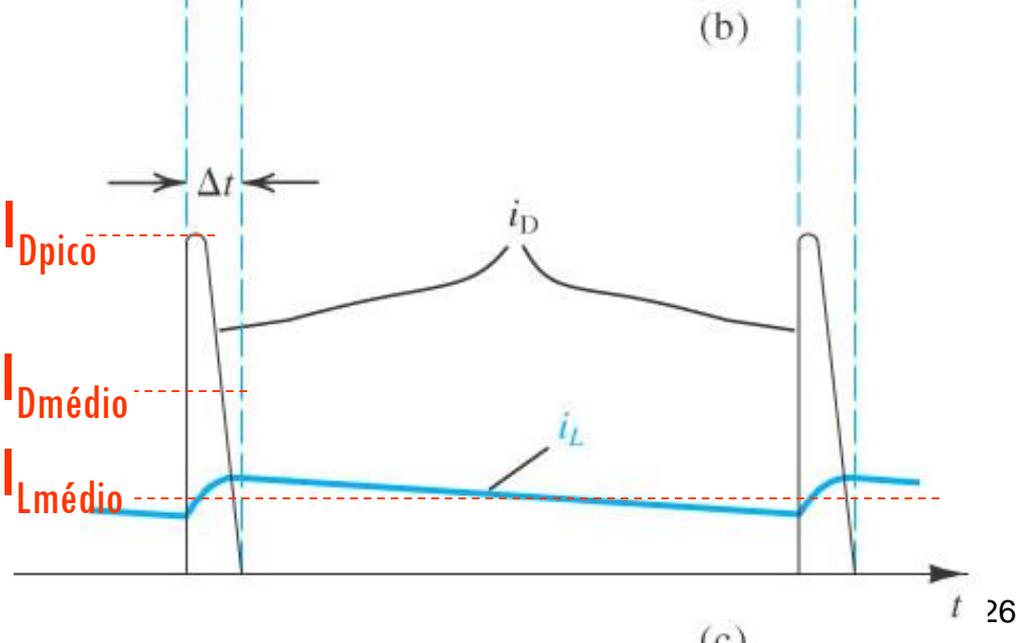
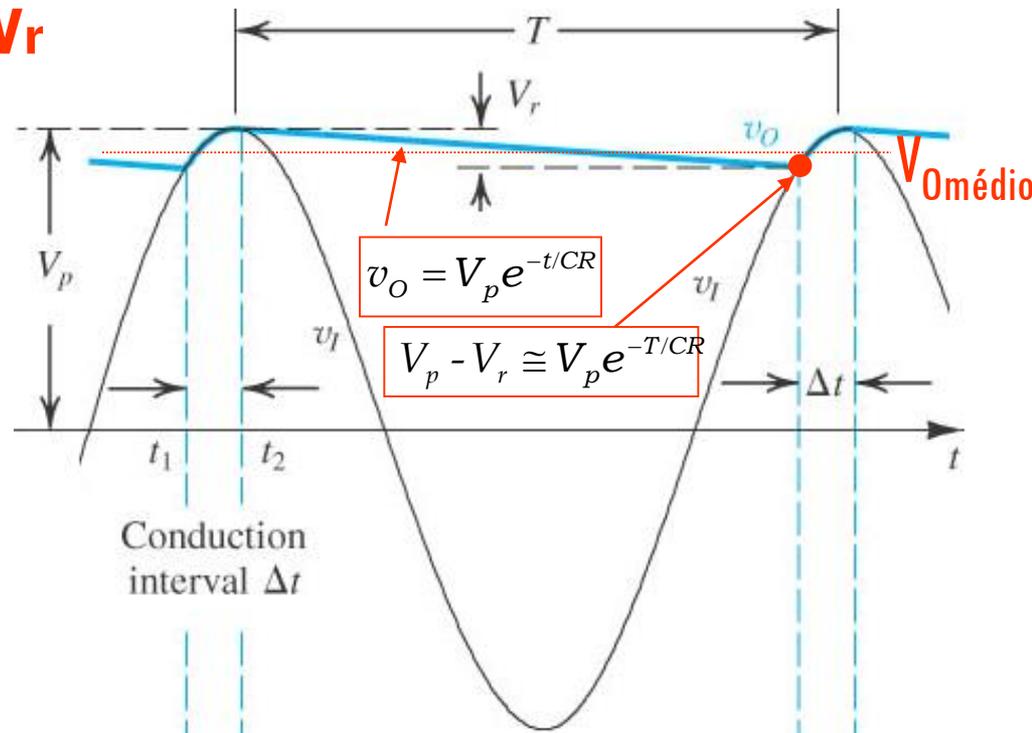
$$e^{-T/CR} \cong 1 - T/CR$$

$$V_p - V_r \cong V_p (1 - T/CR)$$

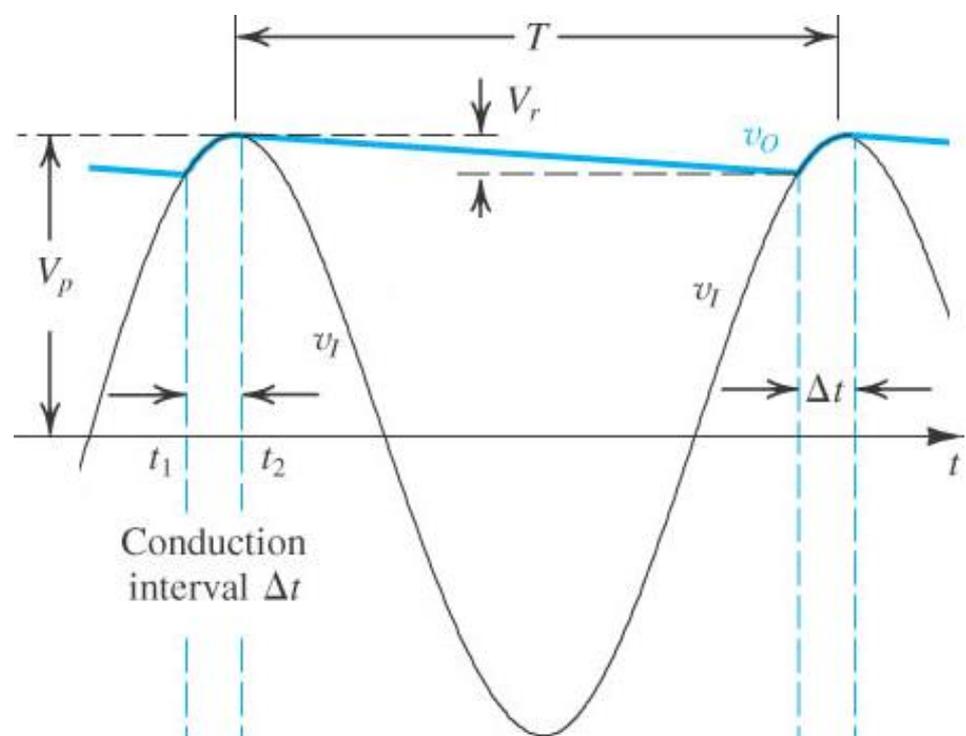
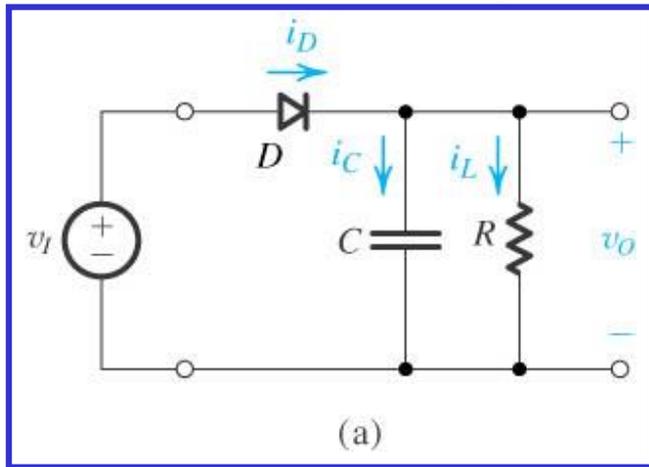
e portanto:

$$V_r \cong V_p \frac{T}{CR} = \frac{V_p}{fRC}$$

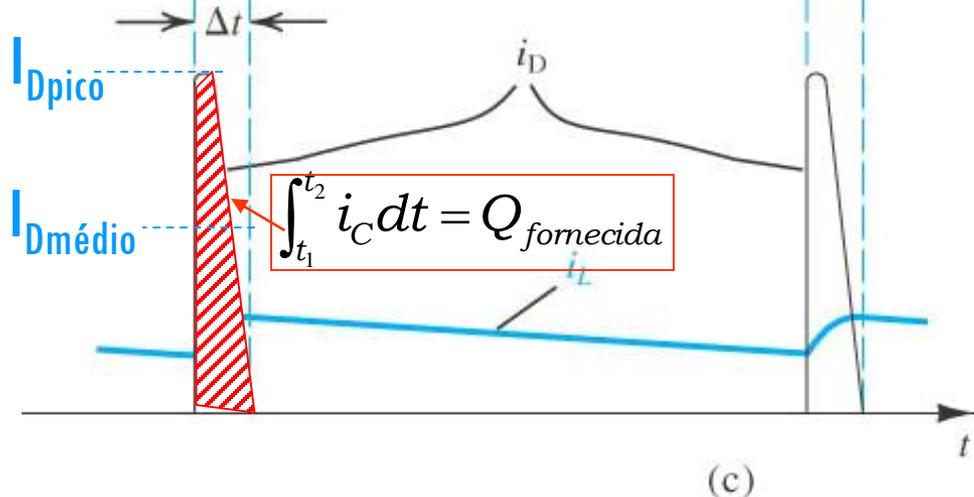
$$\text{ou } V_r = \frac{I_L}{fC}$$



Determinando $I_{D\text{médio}}$



e portanto: (b)



$$Q_{\text{fornecido pela fonte}} = Q_{\text{entregue à carga}}$$

$$Q_f = I_{C\text{medio}} \times \Delta t$$

$$i_{C\text{medio}} = I_{D\text{medio}} - I_L$$

$$Q_f = (I_{D\text{medio}} - I_L) \times \Delta t$$

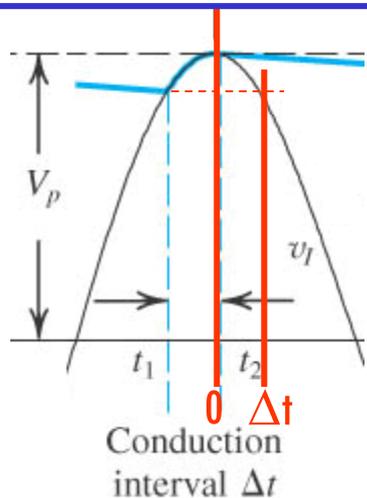
$$Q_e = C \times \Delta V_C = CV_r$$

∴

$$(I_{D\text{medio}} - I_L) \times \Delta t = CV_r$$

$$I_{D\text{medio}} = I_L + \frac{CV_r}{\Delta t} = I_L \left(1 + \frac{1}{f \times \Delta t} \right)$$

Determinando $I_{Dmédio}$



$$I_{Dmédio} = I_L \left(1 + \frac{1}{f \times \Delta t} \right)$$

$$V_p \cos(\omega \Delta t) = V_p - V_r$$

Como $\omega \Delta t$ é um pequeno ângulo :

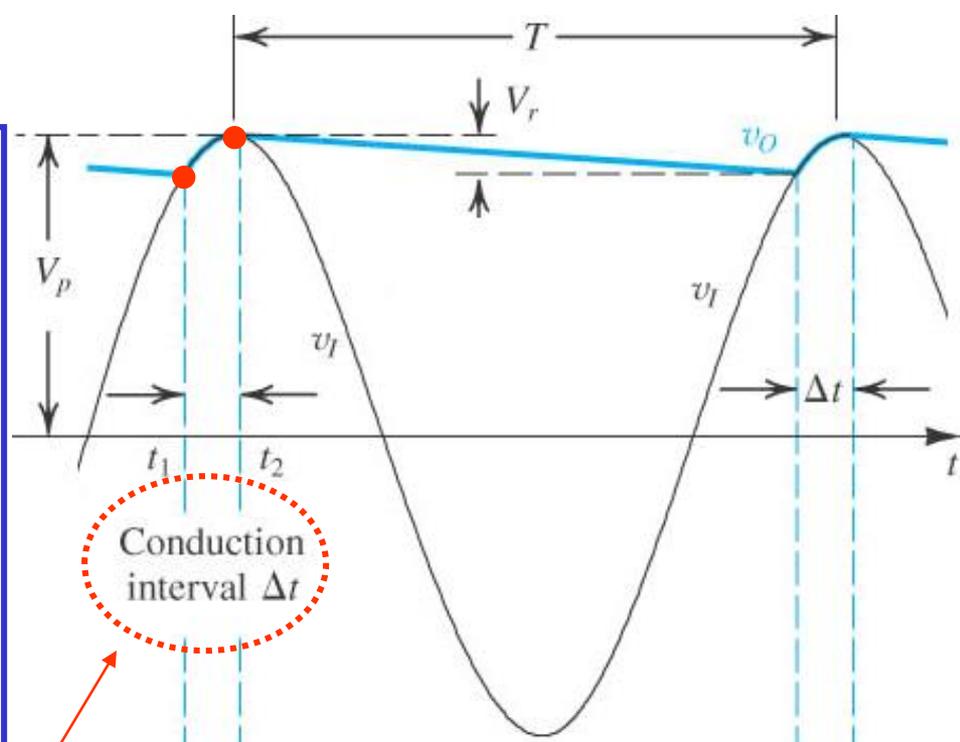
$$\cos(\omega \Delta t) \cong 1 - \frac{1}{2} (\omega \Delta t)^2$$

e portanto :

$$V_p \left[1 - \frac{1}{2} (\omega \Delta t)^2 \right] = V_p - V_r$$

ou

$$\omega \Delta t \cong \sqrt{2V_r / V_p} \text{ ou } \Delta t \cong \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}$$



$$I_{Dmédio} = I_L \left(1 + \frac{1}{f \times \Delta t} \right) = I_L \left(1 + \frac{1}{f \times \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}} \right)$$

$$I_{Dmédio} = I_L \left(1 + \frac{2\pi}{\sqrt{2} \sqrt{V_r / V_p}} \right)$$

$$= I_L \left(1 + \frac{\pi \sqrt{2}}{\sqrt{V_r / V_p}} \right)$$

$$\bar{I}_{Dmédio} = I_L \left(1 + \pi \sqrt{V_p / V_r} \right)$$

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor)

Determinando I_{Dpico}

$$i_D(t) = C \frac{dv_I(t)}{dt} + i_L(t) \quad (\text{enquanto } D \text{ conduzir})$$

$$i_D(t = t_1) = i_{Dpico} = C \frac{dv_I(t_1)}{dt} + i_L(t_1)$$

$$i_{Dpico} = C \frac{dv_I(t_1)}{dt} + (\sim) i_{Lm\u00e9dio} = C \frac{dV_p \cos(\omega t)}{dt} \Big|_{t=t_1} + i_{Lm\u00e9dio}$$

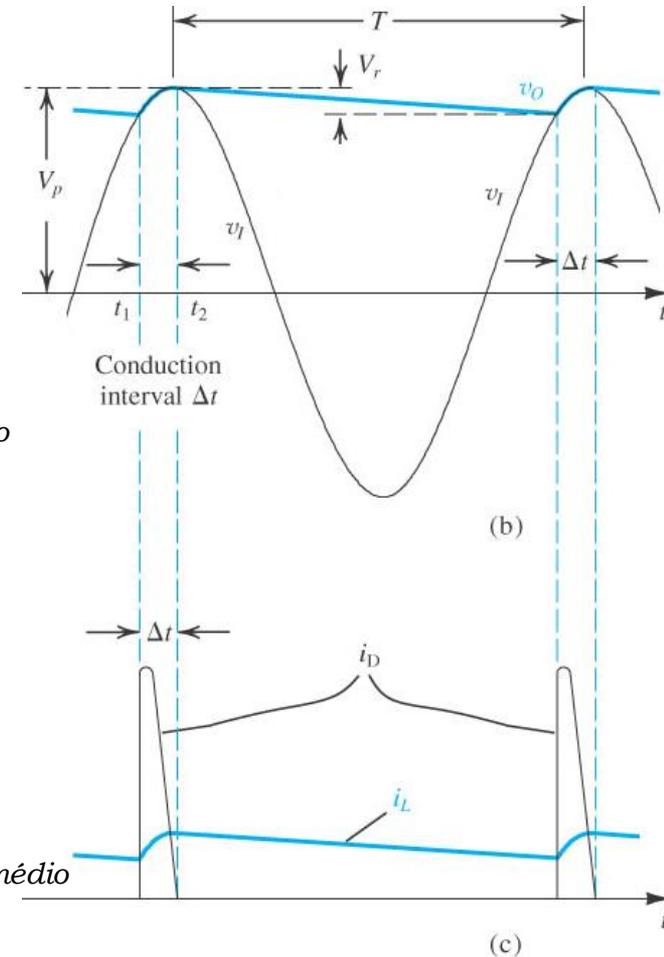
$$i_{Dpico} = CV_p \frac{d[1 - \frac{1}{2}(\omega t)^2]}{dt} \Big|_{t=t_1} + i_{Lm\u00e9dio}$$

$$\frac{d[1 - \frac{1}{2}(\omega t)^2]}{dt} \Big|_{t=t_1} = -\omega^2 t_1 = -\omega^2(-\Delta t) = \omega^2 \Delta t$$

$$i_{Dpico} = CV_p (\omega^2 \Delta t) + i_{Lm\u00e9dio} = \left(\frac{i_{Lm\u00e9dio}}{fV_r} \right) \left(\omega^2 \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{\omega} \right) + i_{Lm\u00e9dio}$$

$$i_{Dpico} = i_{Lm\u00e9dio} \frac{V_p}{V_r} \frac{\omega^2}{f\omega} \sqrt{2V_r / V_p} + i_{Lm\u00e9dio}$$

$$i_{Dpico} = i_{Lm\u00e9dio} \left(1 + \frac{\omega^2}{f\omega} \sqrt{2 \frac{V_p^2}{V_r^2} V_r / V_p} \right) \Rightarrow i_{Dpico} = i_{Lm\u00e9dio} \left(1 + 2\pi \sqrt{2V_p / V_r} \right)$$



(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor)

Resumindo

$$V_{O(m\u00e9dio)} = V_p - \frac{1}{2} V_r$$

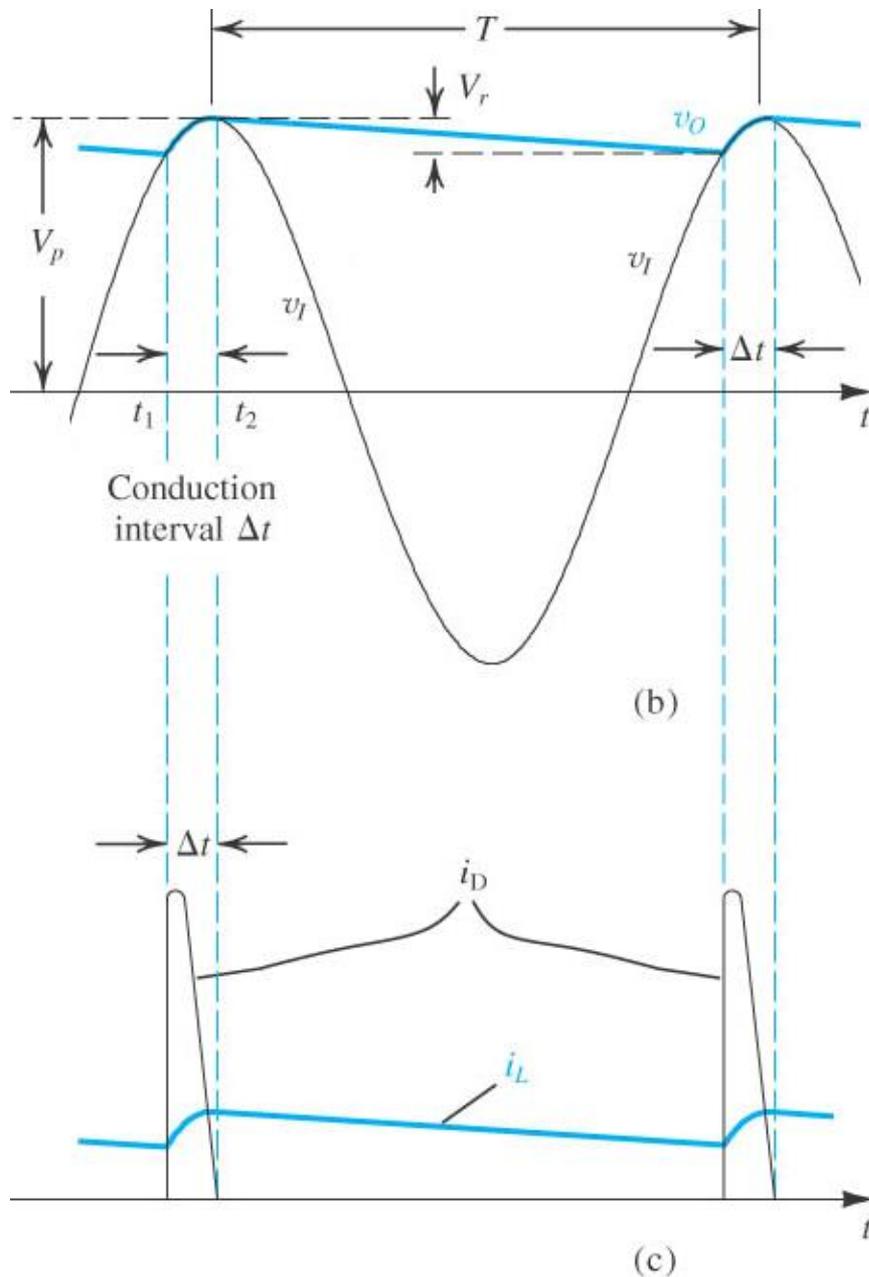
$$i_{L(m\u00e9dio)} = I_L = \frac{V_p}{R}$$

$$V_r = \frac{I_L}{fC}$$

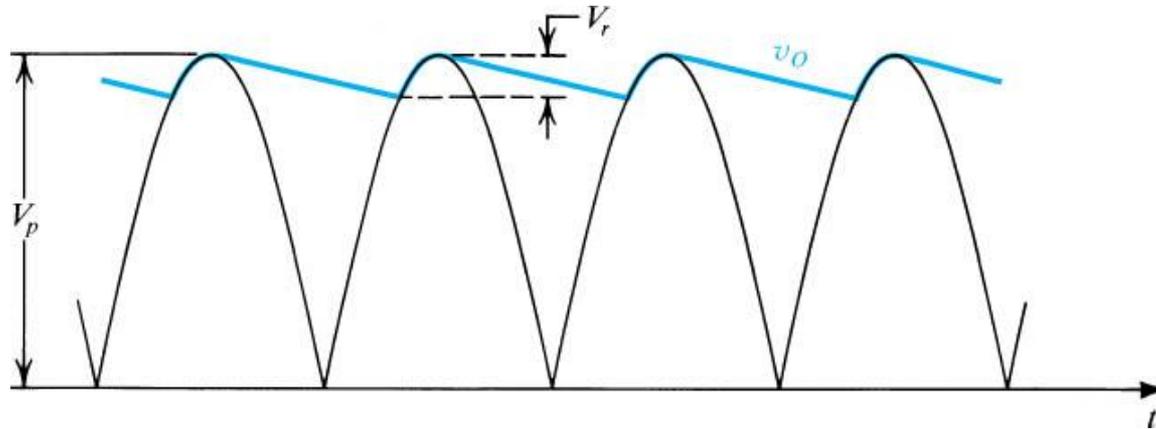
$$\Delta t \cong \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}$$

$$I_{Dm\u00e9dio} = I_L (1 + \pi \sqrt{V_p / V_r})$$

$$i_{Dpico} = i_{Lm\u00e9dio} (1 + 2\pi \sqrt{2V_p / V_r})$$



(No Retificador **Onda Completa** com Filtro com Capacitor)



~~meia onda~~ **onda completa**

$$V_r \cong \frac{V_p}{2fRC}$$

$$i_{D\text{medio}} = I_L (1 + \pi \sqrt{2V_p / 2V_r}) = I_L (1 + \pi \sqrt{V_p / 2V_r})$$

$$i_{D\text{pico}} = I_L (1 + 2\pi \sqrt{V_p / 2V_r})$$

EXEMPLO 3.10 Considere um retificador de pico alimentado por uma senóide de 60 Hz tendo um valor de pico de $V_p = 100$ V. Suponha uma resistência de carga $R = 10$ k Ω . Calcule o valor da capacitância C que resultará numa ondulação de pico-a-pico de 2 V. Calcule também a fração do ciclo durante a qual o diodo conduz, além do valor médio e de pico da corrente no diodo.

Formulário (1/2 onda)

$$V_{O(\text{médio})} = V_p - \frac{1}{\sqrt{2}} V_r$$

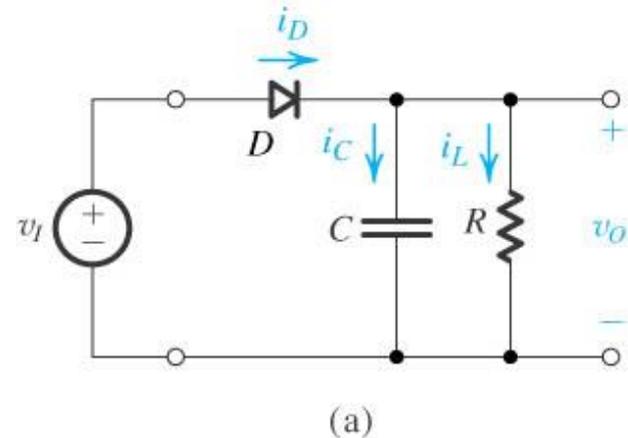
$$i_{L(\text{médio})} = I_L = \frac{V_p}{R}$$

$$V_r = \frac{I_L}{fC}$$

$$\Delta t \cong \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}$$

$$I_{D\text{médio}} = I_L (1 + \pi \sqrt{V_p / V_r})$$

$$i_{D\text{pico}} = i_{L\text{médio}} (1 + 2\pi \sqrt{2V_p / V_r})$$



EXEMPLO 3.10 Considere um retificador de pico alimentado por uma senóide de 60 Hz tendo um valor de pico de $V_p = 100$ V. Suponha uma resistência de carga $R = 10$ k Ω . Calcule o valor da capacitância C que resultará numa ondulação de pico-a-pico de 2 V. Calcule também a fração do ciclo durante a qual o diodo conduz, além do valor médio e de pico da corrente no diodo.

SOLUÇÃO

Obtemos o valor de C como

$$C = \frac{V_p}{V_r f R} = \frac{100}{2 \times 60 \times 10 \times 10^3} = 83,3 \mu\text{F}$$

O ângulo de condução $\omega\Delta t$ é $\omega \Delta t = \sqrt{2 \times 2/100} = 0,2$ rad

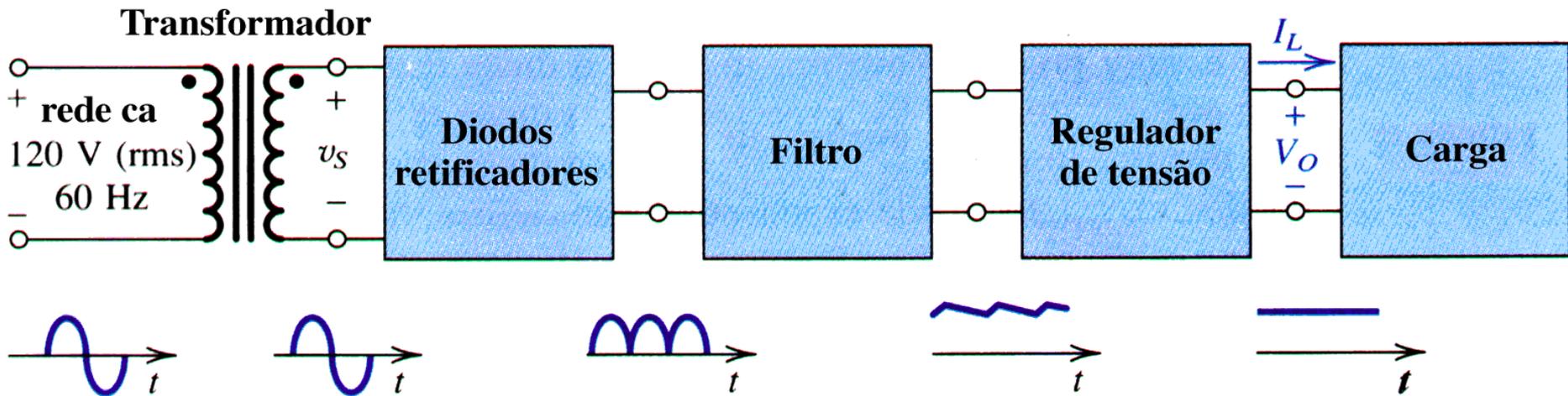
Logo, o diodo conduz por $(0,2/2\pi) \times 100 = 3,18\%$ do ciclo.

Como $I_L = 100/10 = 10$ mA, as correntes média e de pico no diodo são:

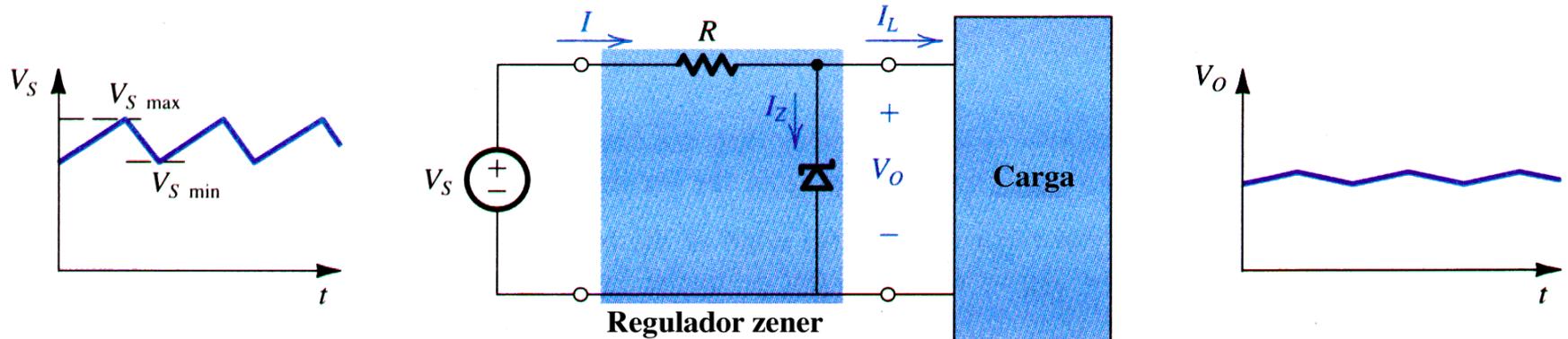
$$i_{D\text{med}} = 10(1 + \pi\sqrt{2 \times 100/2}) = 324 \text{ mA}$$

$$i_{D\text{max}} = 10(1 + 2\pi\sqrt{2 \times 100/2}) = 638 \text{ mA}$$

Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores



Desempenho de um Regulador com Zener



$$\text{Regulação de Linha} \equiv \frac{\Delta V_O}{\Delta V_S} \quad (\text{p.ex.} = 1\text{V})$$

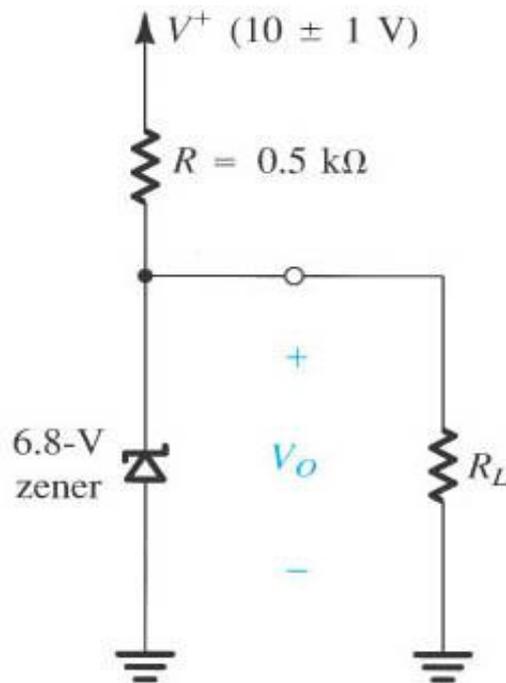
(máxima corrente pior carga)

$$\text{Regulação de Carga} \equiv \frac{\Delta V_O}{\Delta I_L} \quad (\text{p.ex.} = 1\text{mA})$$

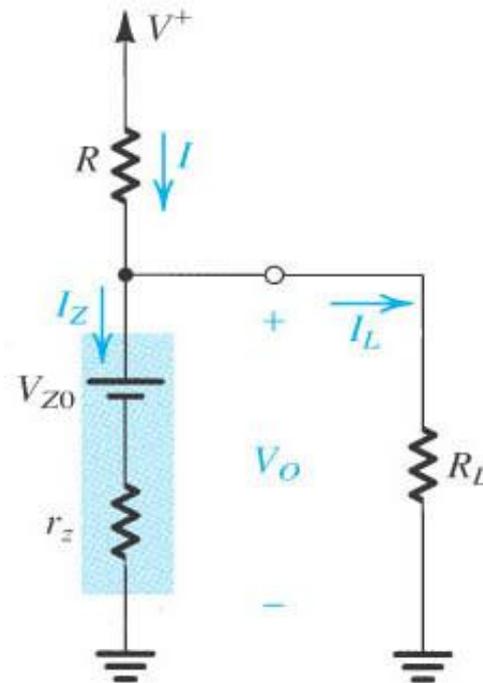
(V_S médio)

Exemplo 3.8: O diodo zener do circuito abaixo é especificado para $6,8V@5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{zk} = 0,2mA$. Veja que V^+ tem uma variação.

- Determine a tensão de saída sem carga;
- Determine a regulação de linha para a variação de $\pm 1V$ na entrada;
- Qual a variação na tensão de saída quando se coloca uma carga que drena $1mA$? Isso é chamado Regulação de Carga.
- Qual a variação na tensão de saída para uma carga de $2kW$;
- Qual a variação na tensão de saída para uma carga de $0,5kW$;
- Qual o valor mínimo de carga para o circuito operar corretamente?

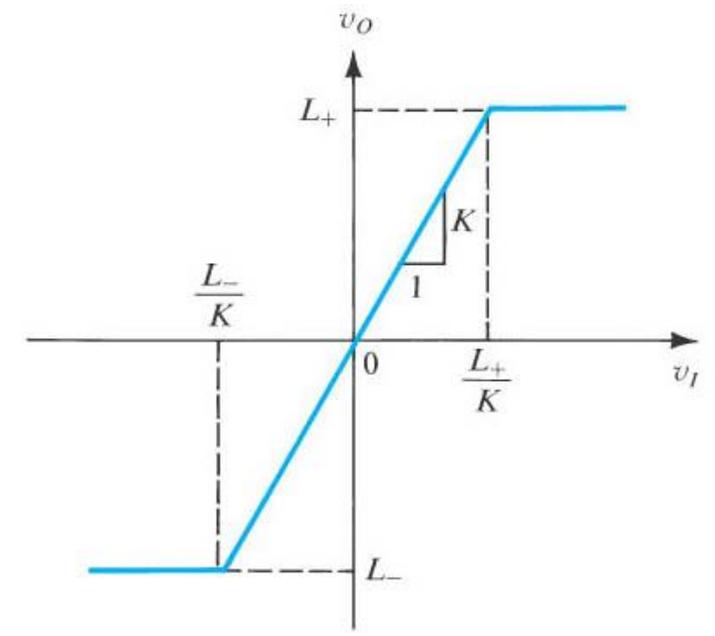
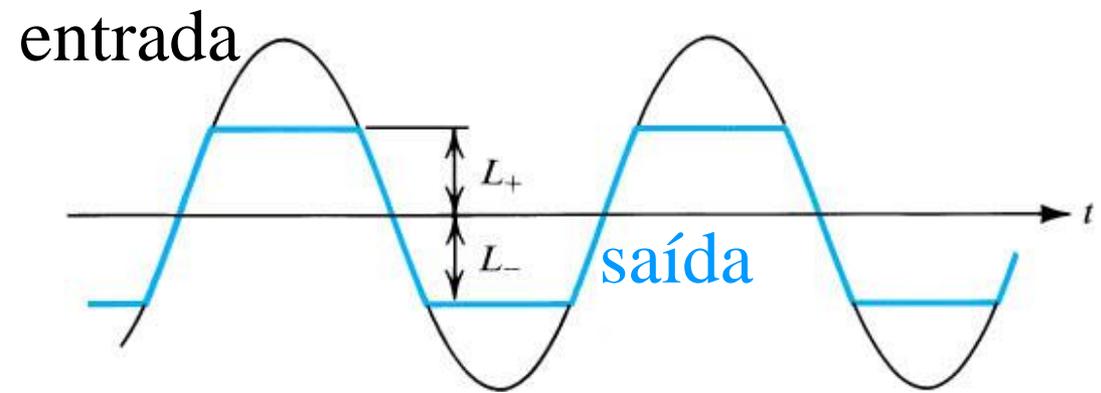
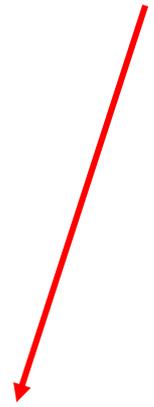


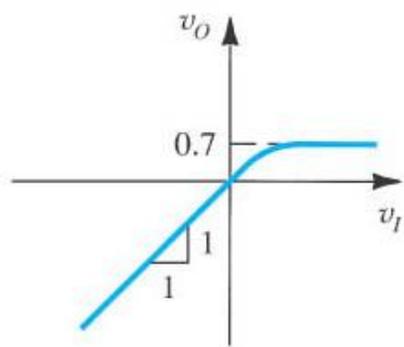
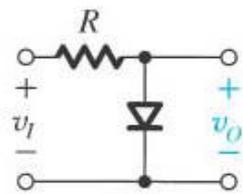
(a)



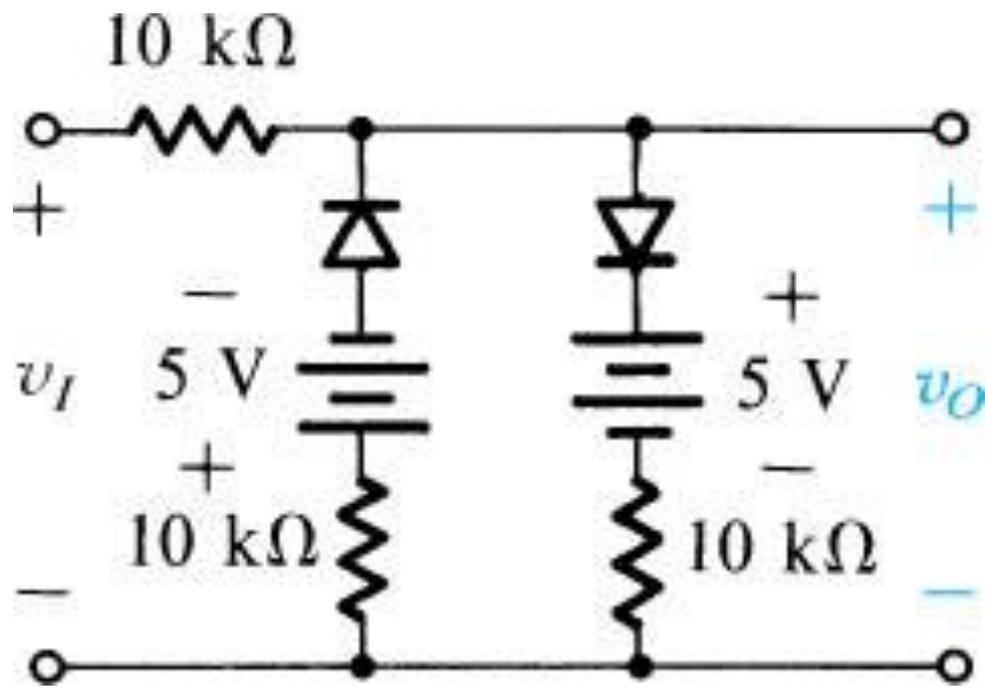
(b)

Circuitos Limitadores e Grampeadores

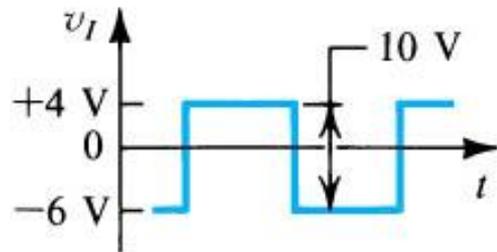




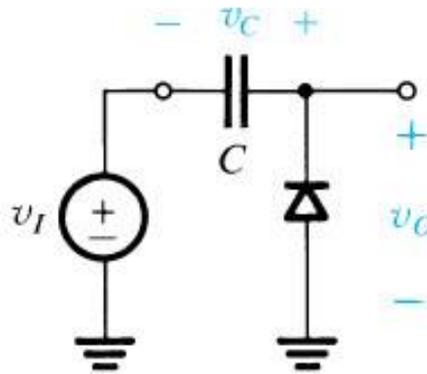
(a)



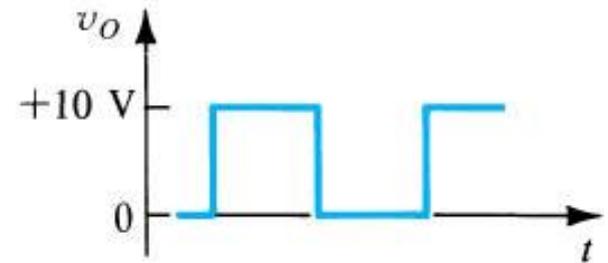
Circuito Grampeador



(a)



(b)



(c)

Exercícios

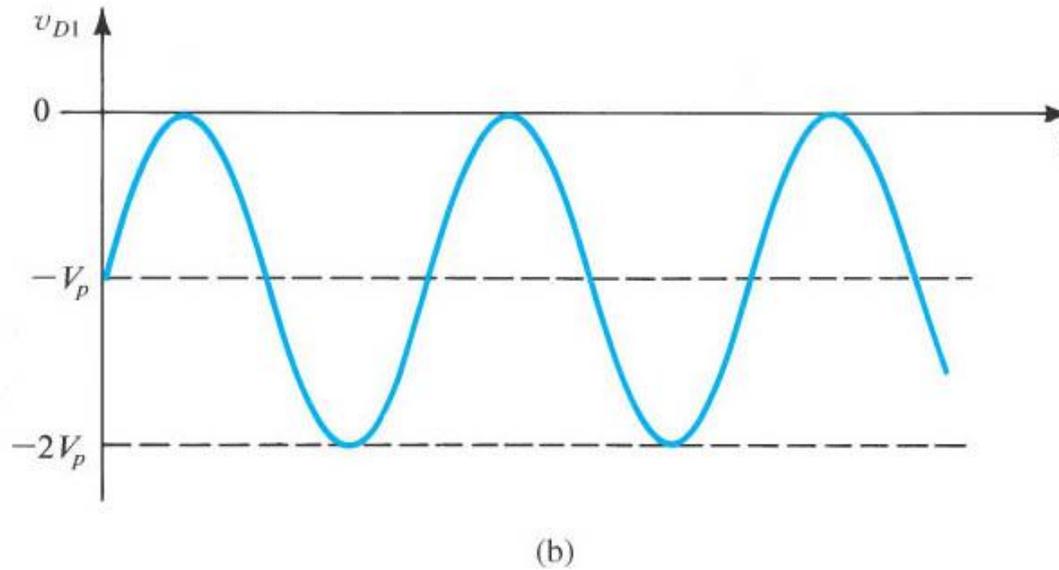
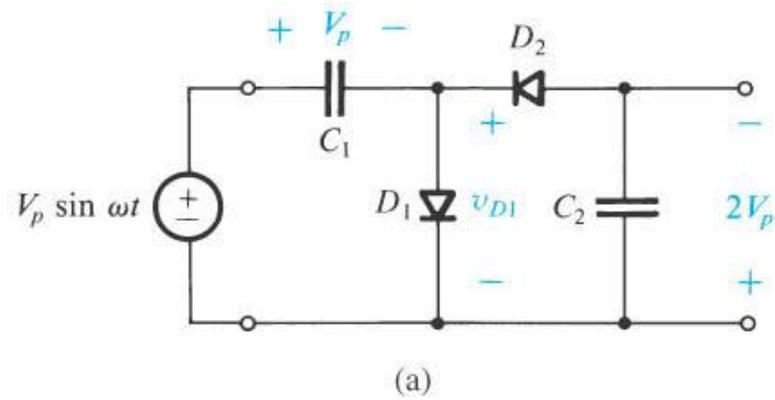
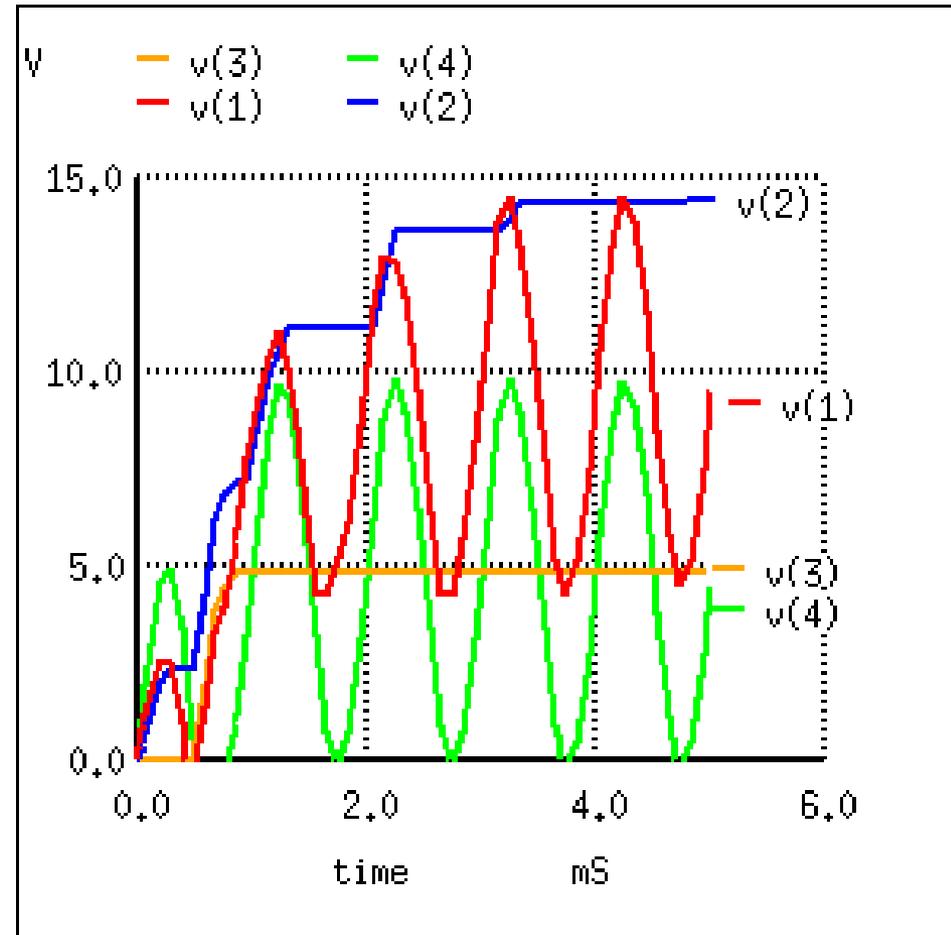
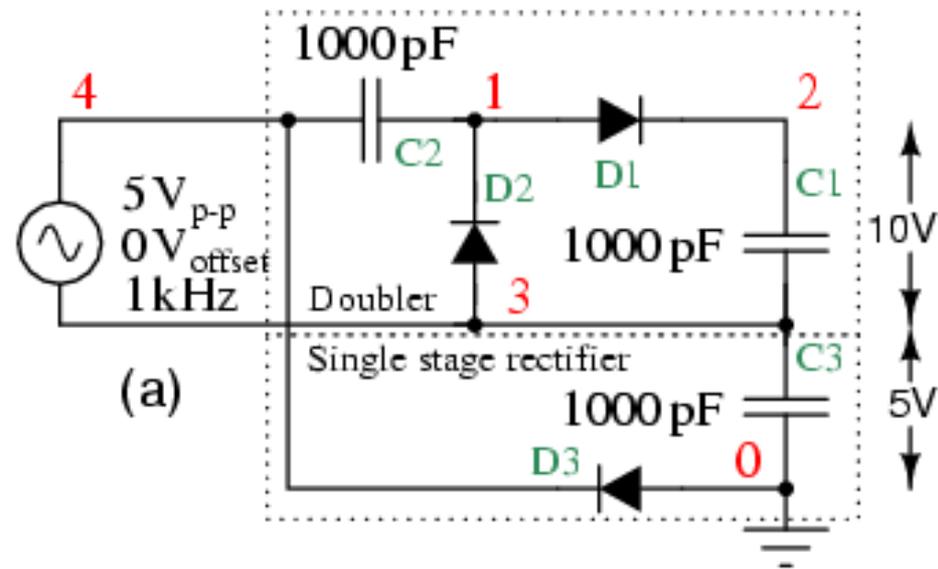
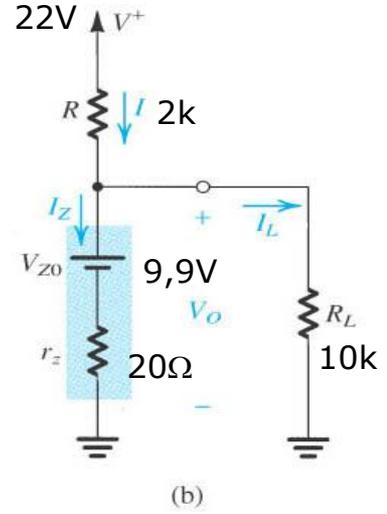
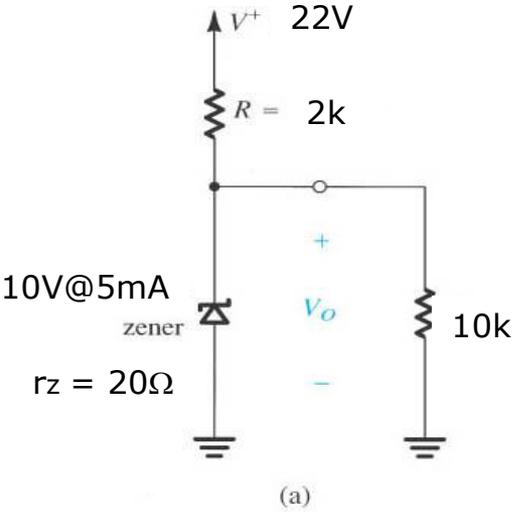


Figura 3.38 Voltage doubler: (a) circuit; (b) waveform of the voltage across D_1 .

Triplicador de Tensão





$$V_z = V_{z0} + r_z I_z$$

$$10V = V_{z0} + 20.5 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{z0} = 10 - 0,1 = 9,9V$$

$$V_o = 22 \cdot \frac{10k // 20}{2k + 10k // 20} + 9,9 \cdot \frac{10k // 2k}{20 + 10k // 2k}$$

$$V_o = 22 \cdot \frac{20}{2k + 20} + 9,9 \cdot \frac{\sim 2k}{20 + \sim 2k} = 0,22 + 9,9 = 10,12$$

OU

$$V_o = 22 \cdot \frac{20}{2k + 20} + 9,9 \cdot \frac{1,67k}{1,69k} = 0,22 + 9,9 \cdot 0,988 = 0,22 + 9,78 = 10,00$$

REOF. ELETRÔNICA I (PSI3321) 2o. Semestre de 2016 (assuntos P2)

Livro Texto: Sedra&Smith, K.C. Microeletrônica. Pearson, 2007, (tradução da 5a. Ed. em inglês)

| | | |
|--------------------------|--|---|
| 10 ^a 13/09 | Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação c.c., circuito retificador de meia onda, circuito retificador de onda completa com enrolamento secundário com tomada central, exercícios: 3.22. | Sedra, Cap. 3 p. 106-109 |
| 11 ^a 15/09 | Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro. | Sedra, Cap. 3 p. 109-111 |
| 12 ^a 20/09 | Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9). | Sedra, Cap. 3 p. 112-115 |
| 13 ^a 22/09 | Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28. | Sedra, Cap. 3 p. 115-118 |
| 14 ^a 27/09 | Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios. | texto avulso + Sedra, Cap. 3 p. 117-121 |
| 15 ^a 29/09 | Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios. | texto avulso + Sedra, Cap. 3 p. 121-126 |
| 16 ^a 04/10 | Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios. | texto avulso + Sedra, Cap. 3 p. 127-128 |
| 17 ^a 06/10 | Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção, a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios. | Sedra, Cap. 3 p. 124-125 e p. 128-129 |
| 18 ^a 11/10 | Aula de Exercícios (se estiver em fase) | |

2^a. Semana de Provas (13/10 a 19/10/2016) Data: **a combinar** – Horário: 7:30h??

14ª Aula:

Conceitos Básicos de Dispositivos Semicondutores

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Descrever os principais mecanismos de geração de corrente elétrica em um material semicondutor**
- Apresentar a estrutura cristalina 3D e sua representação 2D, dando uma ordem de grandeza das dimensões envolvidas**
- Explicar a existência de elétrons livres na estrutura e o conceito de lacunas (buracos)**
- Calcular a concentração intrínseca de portadores livres**
- Explicar as consequências da dopagem de materiais semicondutores**

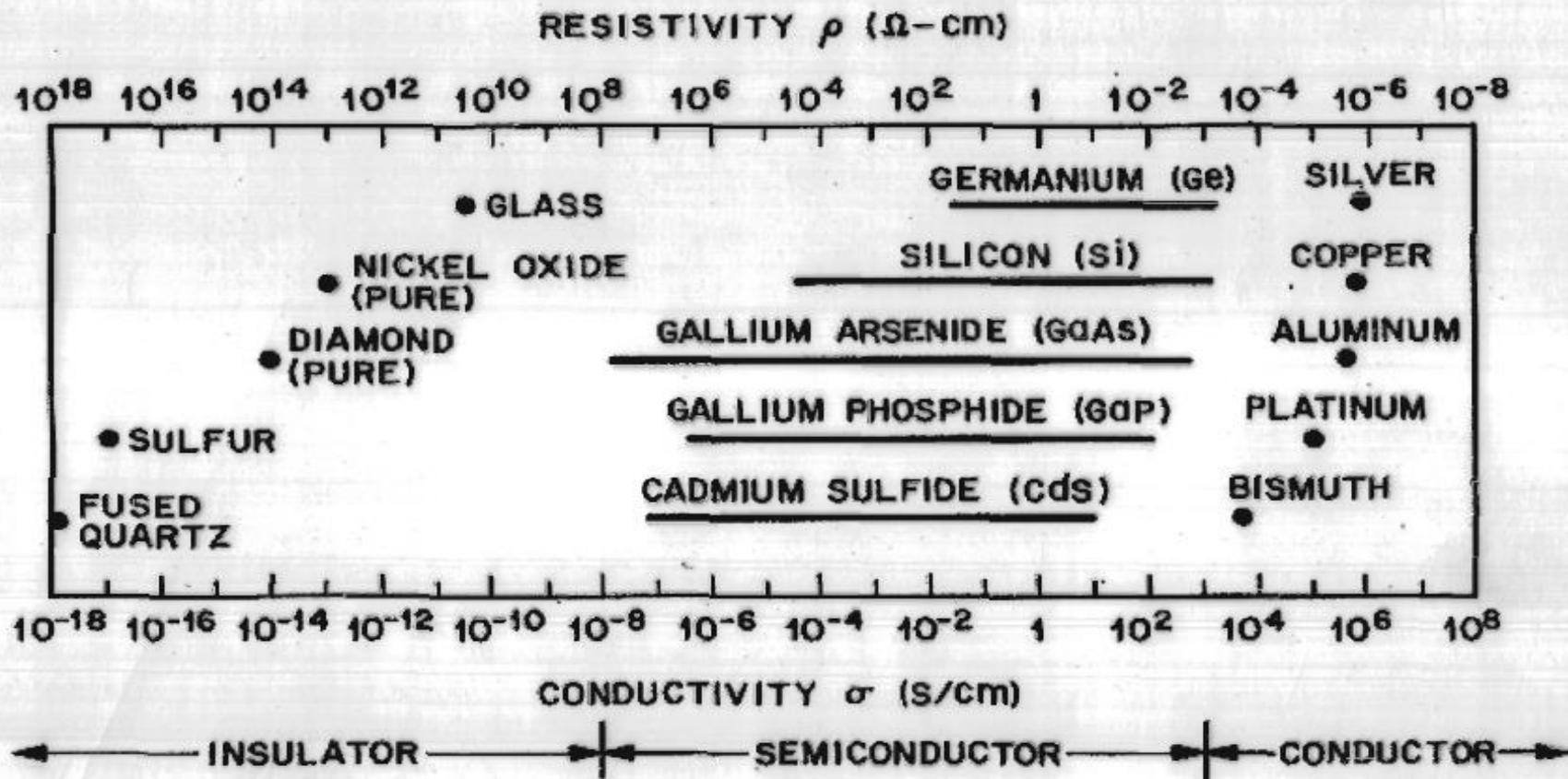
Materiais para Eletrônica

A resistividade de um semicondutor é sensível a

- **temperatura**
- **iluminação**
- **campos magnéticos**
- **pequenas doses de impurezas**

<http://jas.eng.buffalo.edu>

Materials para Eletrônica



Prof. Seabra

02 A

Estrutura Cristalina

Os materiais semicondutores são encontrados na forma cristalina, policristalina e amorfa.

Estudaremos basicamente os materiais semicondutores na forma cristalina. Nesse Caso:

- Os átomos estão arranados de uma forma periódica tridimensional
- A esse arranjo chamamos de rede cristalina

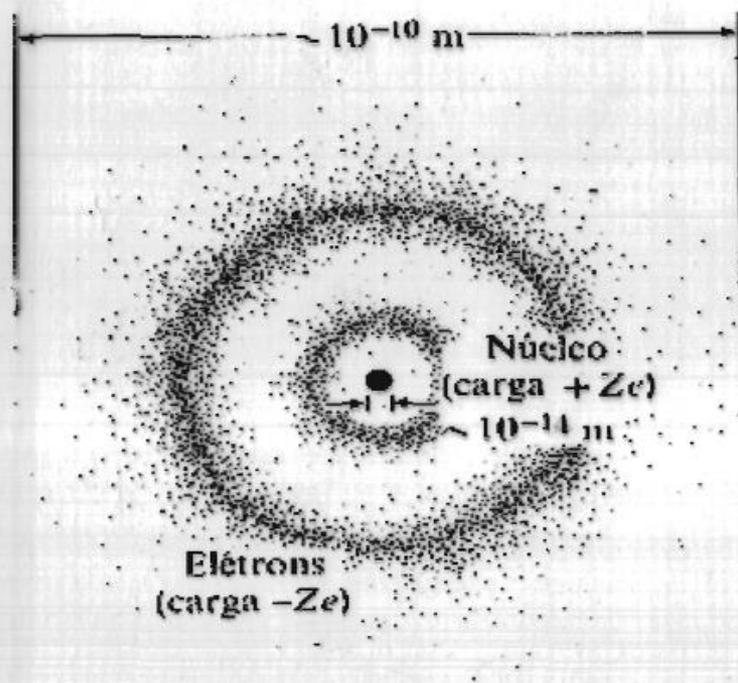
Materials para Semicondutores

Table 1 Portion of the Periodic Table Related to Semiconductors

| Period | Column II | III | IV | V | VI |
|--------|-----------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| 2 | | B Boron | C Carbon | N Nitrogen | |
| 3 | Mg Magnesium | Al Aluminum | Si <u>Silicon</u> | P Phosphorus | S Sulfur |
| 4 | Zn Zinc | Ga <u>Gallium</u> | Ge <u>Germanium</u> | As <u>Arsenic</u> | Se Selenium |
| 5 | Cd Cadmium | In Indium | Sn Tin | Sb Antimony | Te Tellurium |
| 6 | Hg Mercury | | Pb Lead | | |

04 A2_11

O átomo

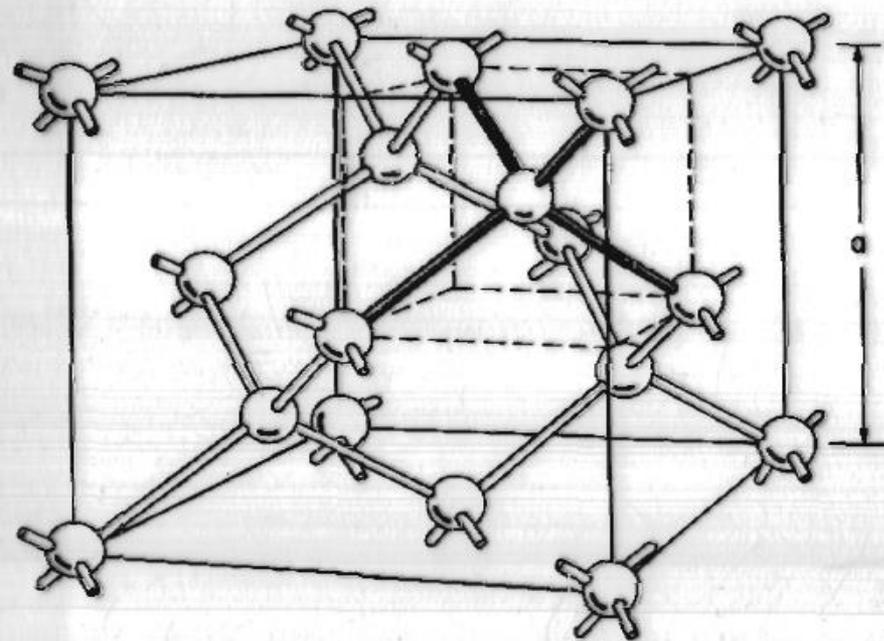


- Núcleo composto de neutrons e prótons (+q) com massas iguais de $1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (1.700 vezes a m do elétron). O núcleo tem diâmetro de 10^{-14} m .
- Uma nuvem de elétrons recobre o núcleo, estendendo-se até 10^{-10} m
- O átomo é eletricamente neutro

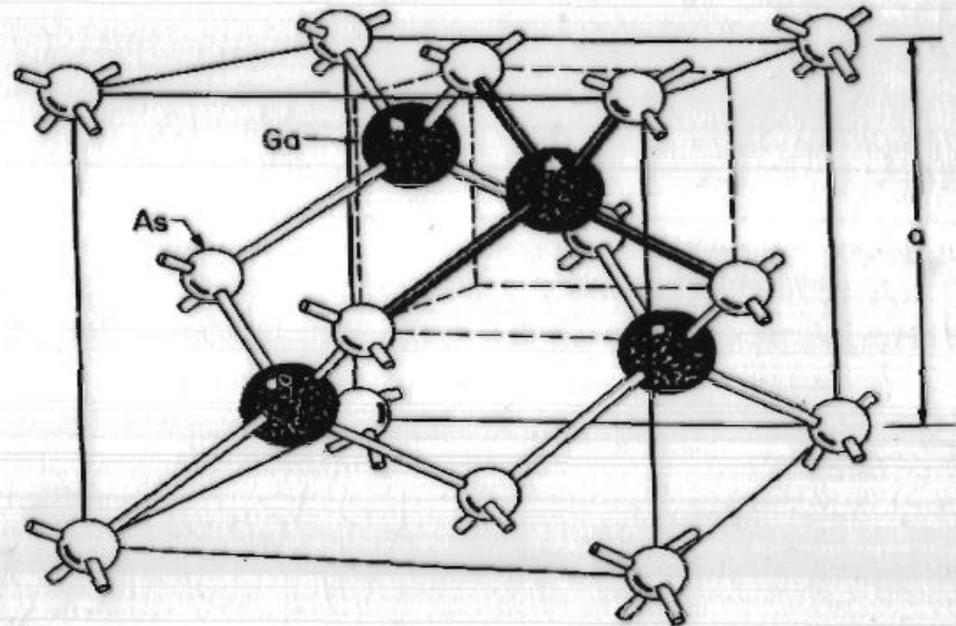
05 A6_03

Estrutura Cristalina

A estrutura do diamante (e dos principais materiais semicondutores!)



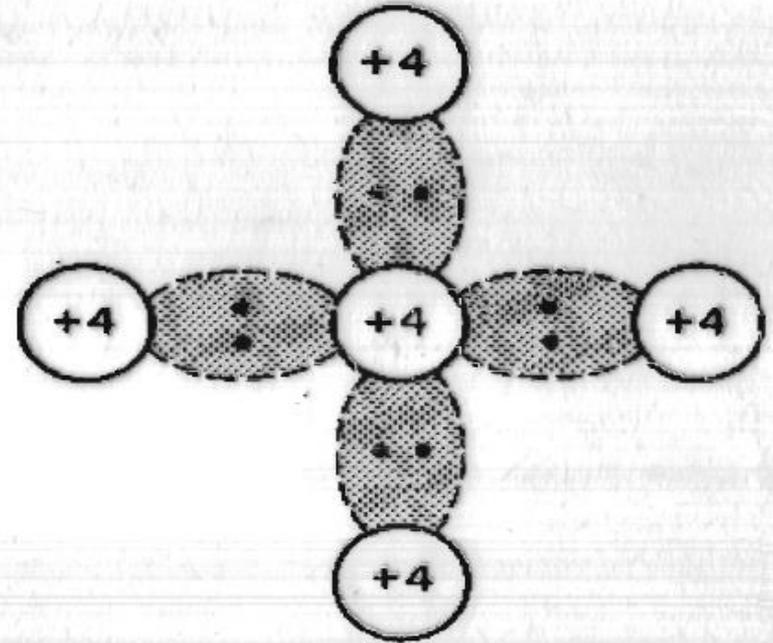
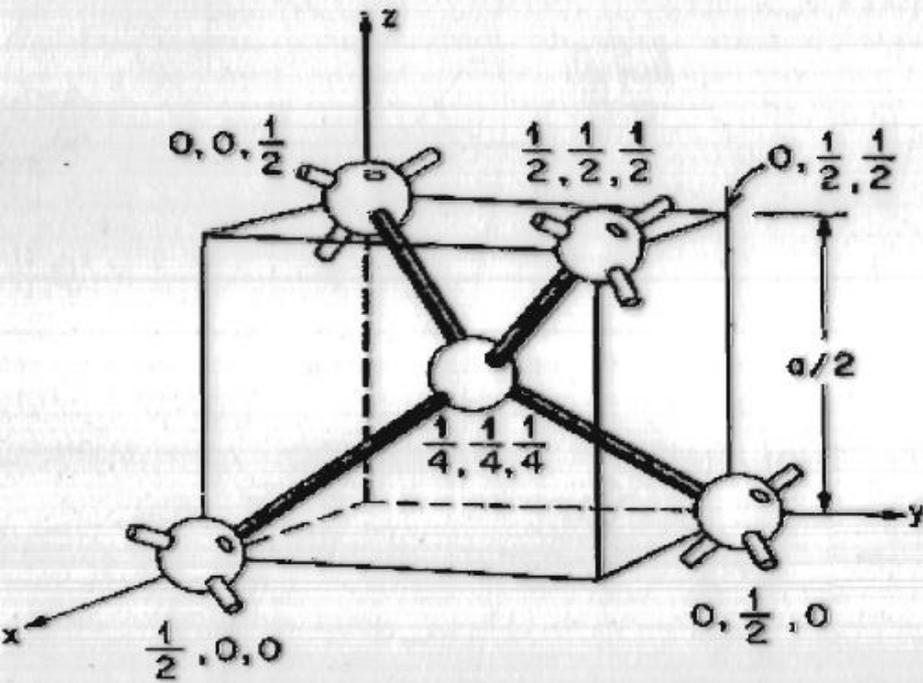
Silício ($a = 5,43 \text{ \AA}$)



GaAs ($a = 5,63 \text{ \AA}$)

06 A4_02

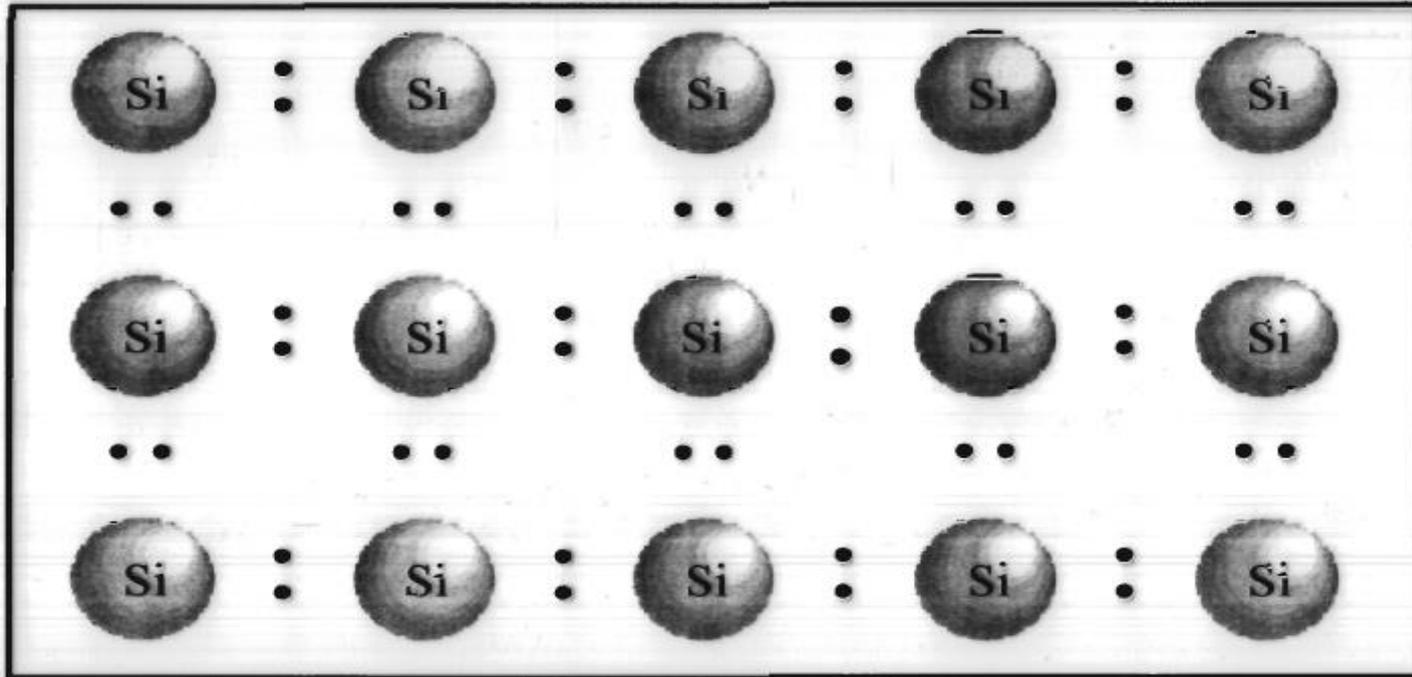
Estrutura Cristalina



Silício

07 A4_03

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

08

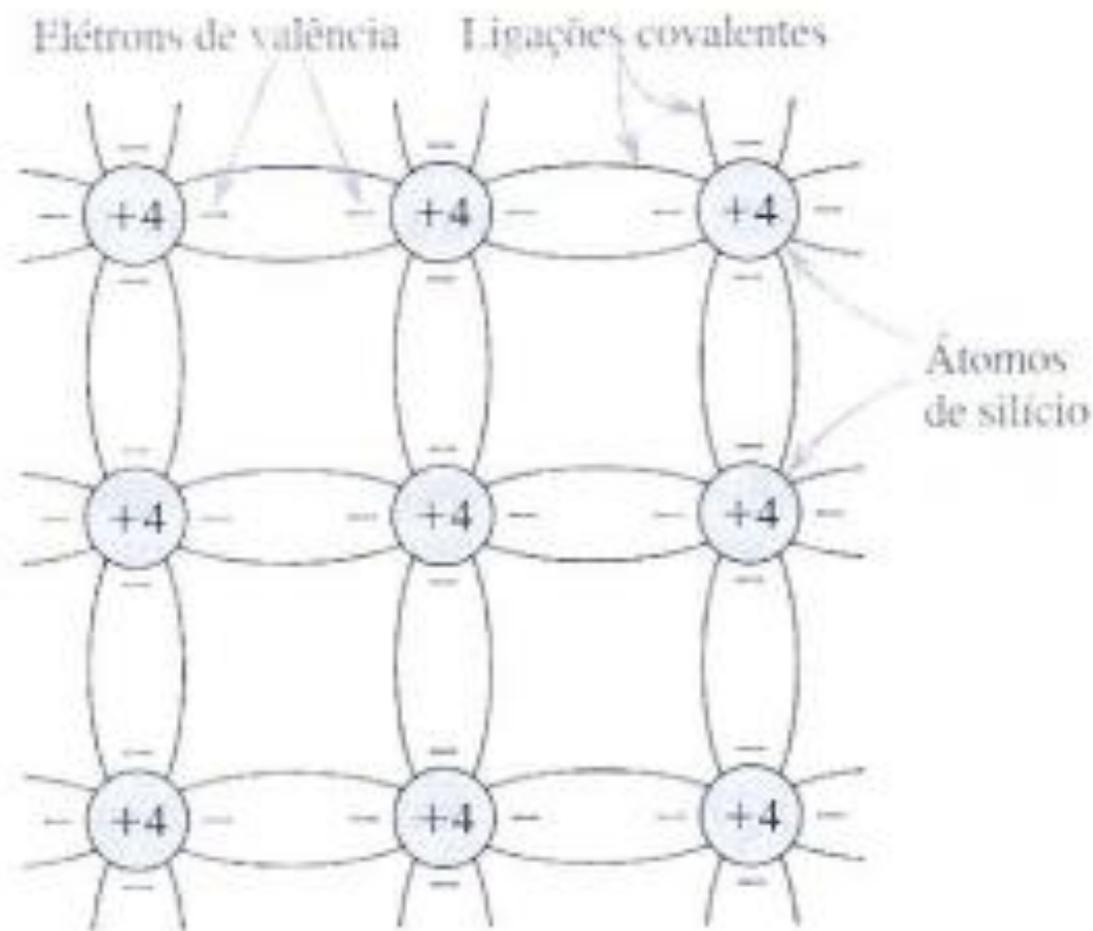
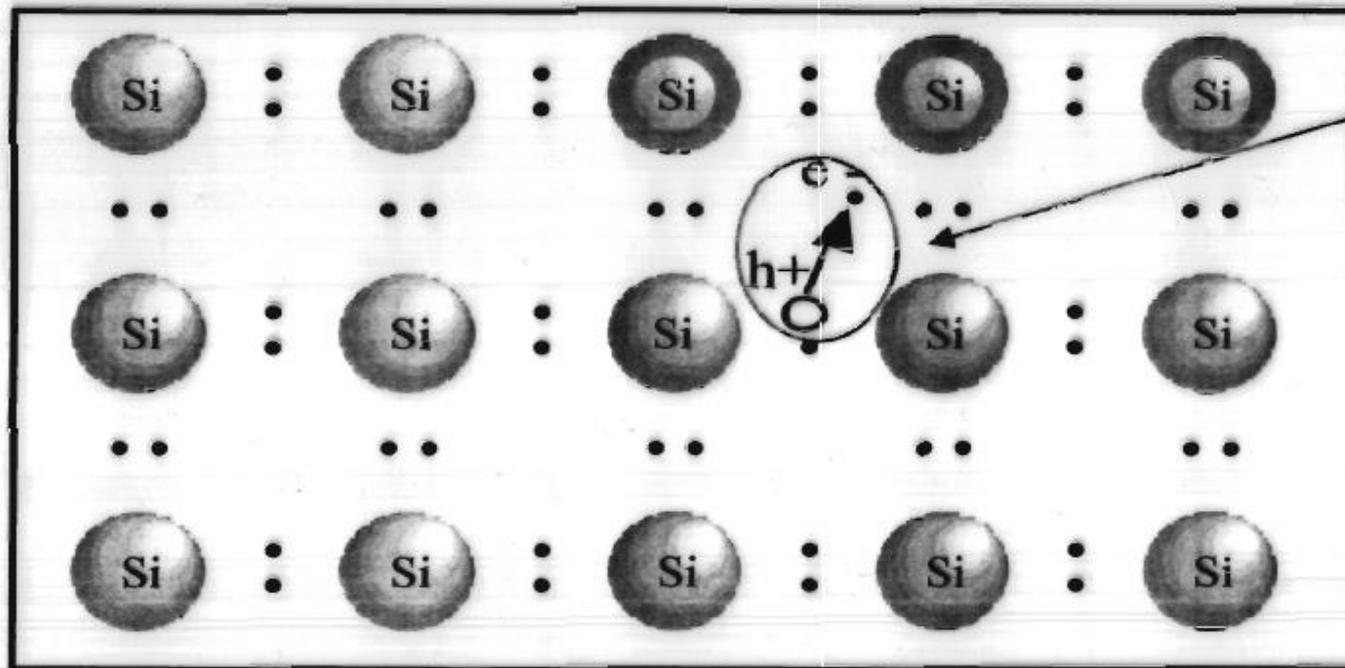


Figura 3.40 Representação bidimensional de um cristal de silício. Os círculos representam o núcleo dos átomos de silício, com +4 indicando sua carga positiva de $+4q$, que é neutralizada pela carga dos quatro elétrons de valência. Observe como as ligações covalentes são formadas partilhando os elétrons de valência entre átomos vizinhos. A 0 K, todas as ligações estão completas e não existem elétrons livres disponíveis para a condução de corrente.

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.

Concentração Intrínseca

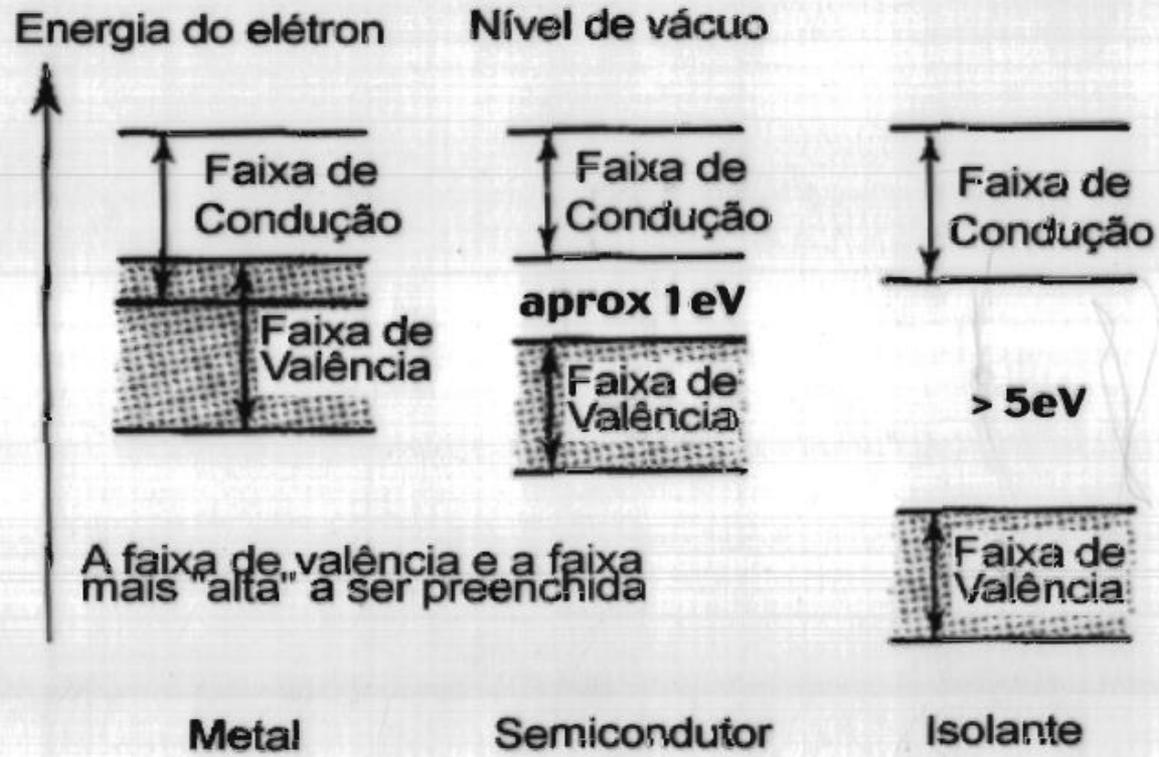
$$n_i(T) = [B \cdot T^3 \cdot e^{-E_G/kT}]^{1/2}$$

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

Exemplo: Para $T = 300 \text{ K} \rightarrow n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ portadores/cm}^3$, ou seja, $1,45 \cdot 10^{10} \text{ elétrons/cm}^3$ e $1,45 \cdot 10^{10} \text{ lacunas/cm}^3$, já que no silício intrínseco $n = p = n_i$

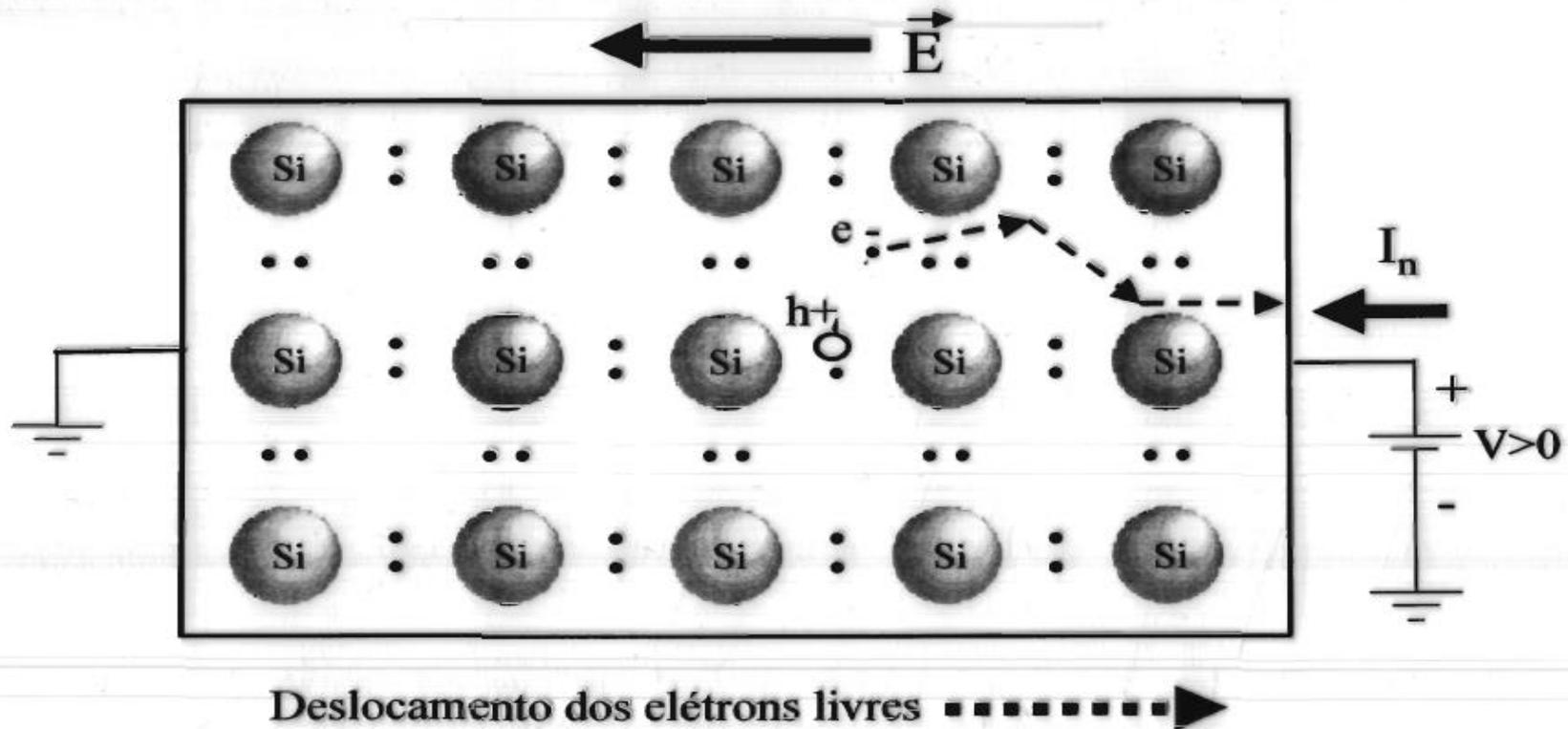
Lembrar que o silício tem $5 \cdot 10^{22}$ átomos de silício/cm³ 41

Porque um material é condutor, semicondutor ou isolante?

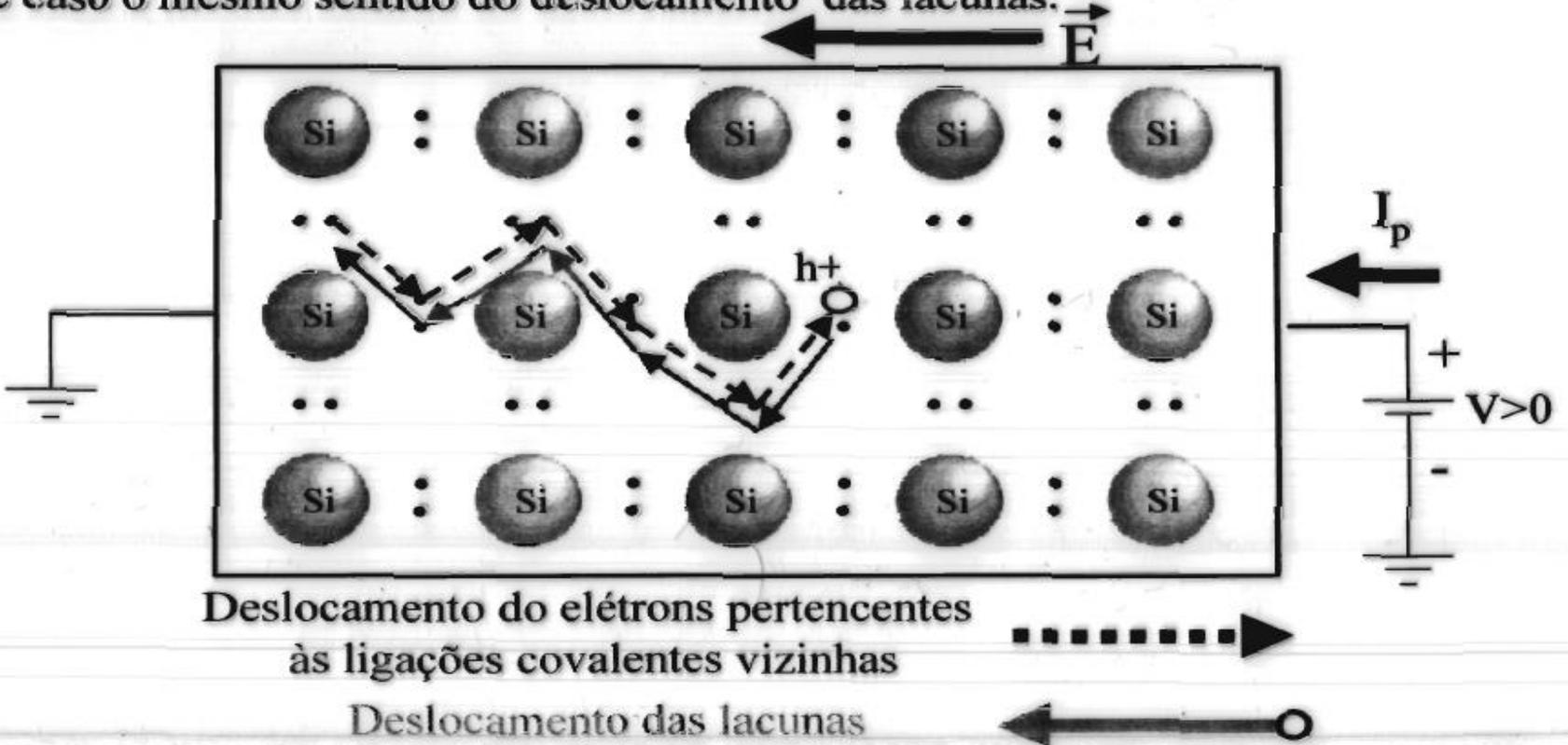


A faixa de valência e a faixa mais "alta" a ser preenchida

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.



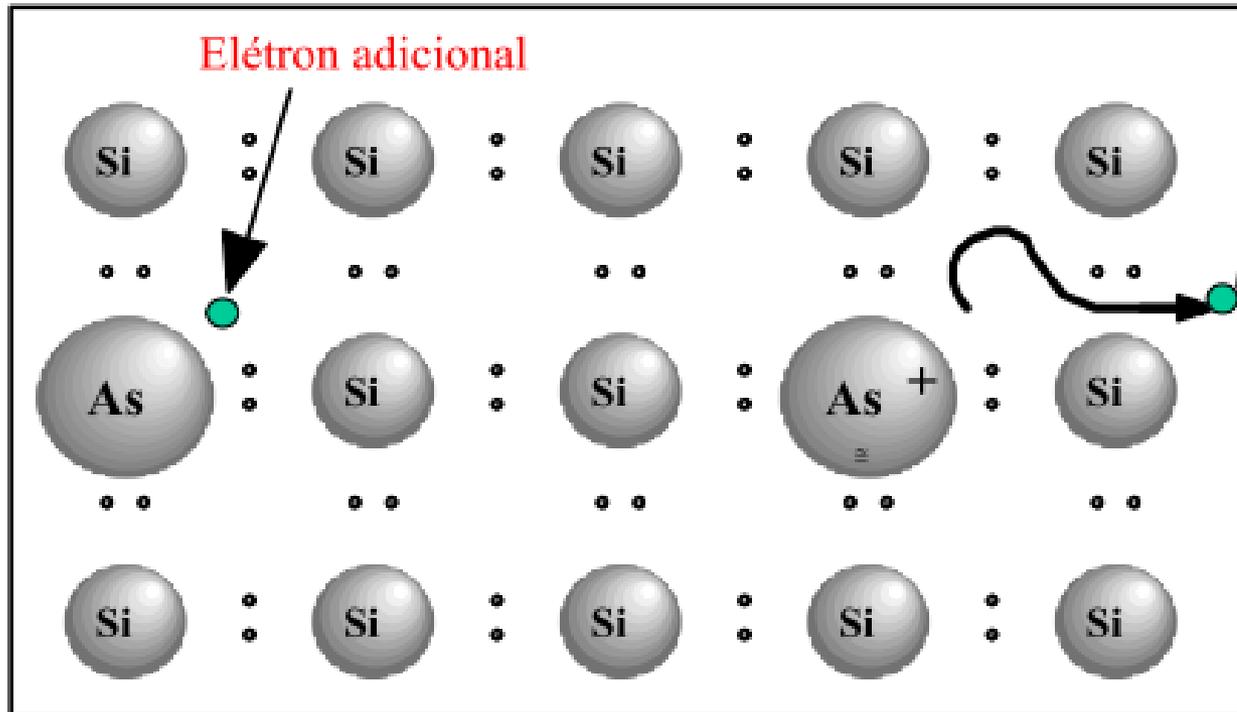
A lacuna gerada pode ser ocupada por um outro elétron vizinho (também pertencente a uma ligação covalente), que por sua vez deixará uma lacuna no seu lugar e assim sucessivamente. Por exemplo, se for aplicada uma tensão como indicada abaixo, o campo elétrico induzirá o deslocamento dos elétrons pertencentes as 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.



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 :

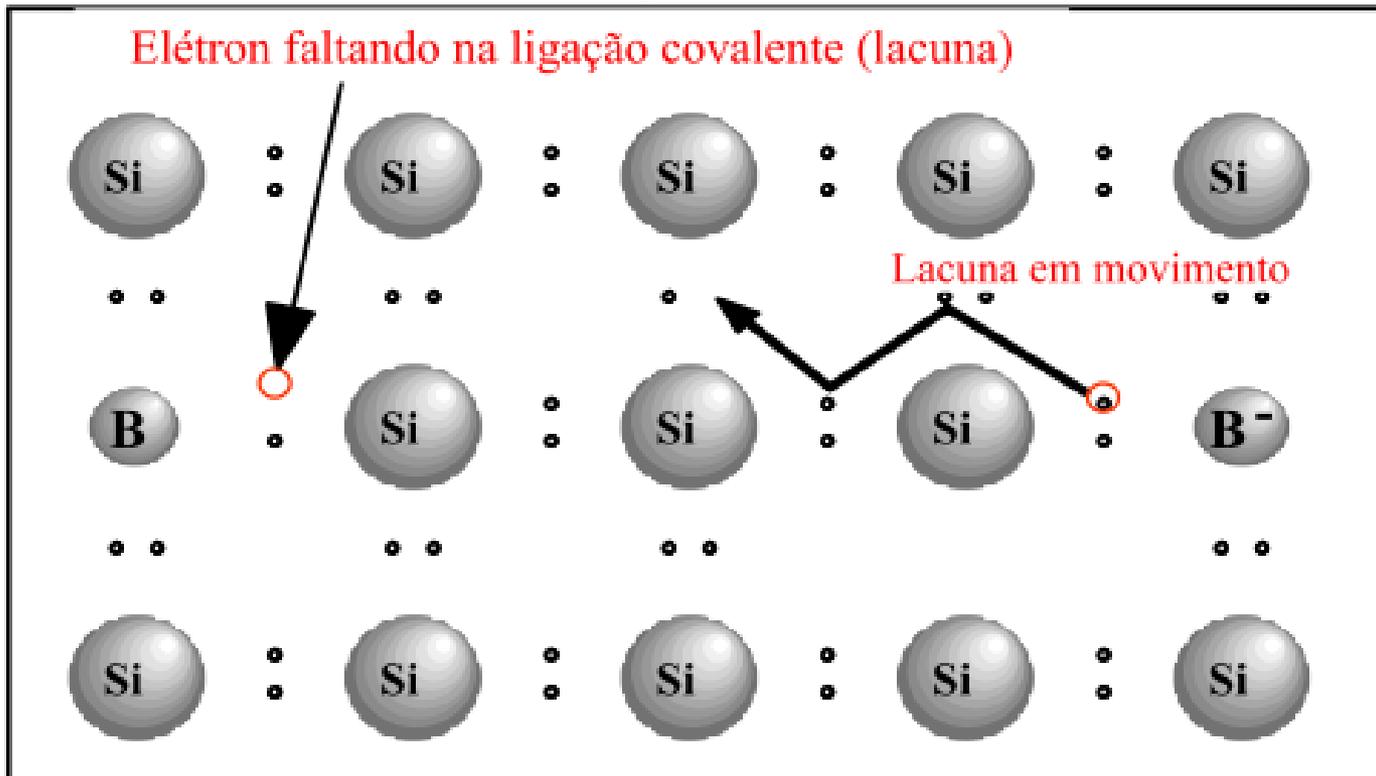
$$n \cdot p = n_i^2$$

$$n = N_D + n_i \cong N_D$$

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

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)



Em equilíbrio térmico :

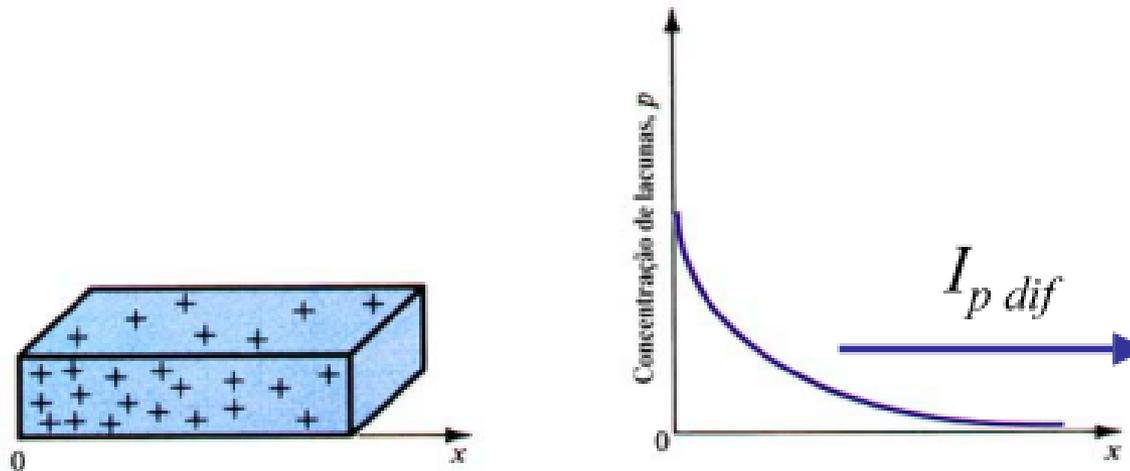
$$n \cdot p = n_i^2$$

$$p = N_A + n_i \cong N_A$$

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

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



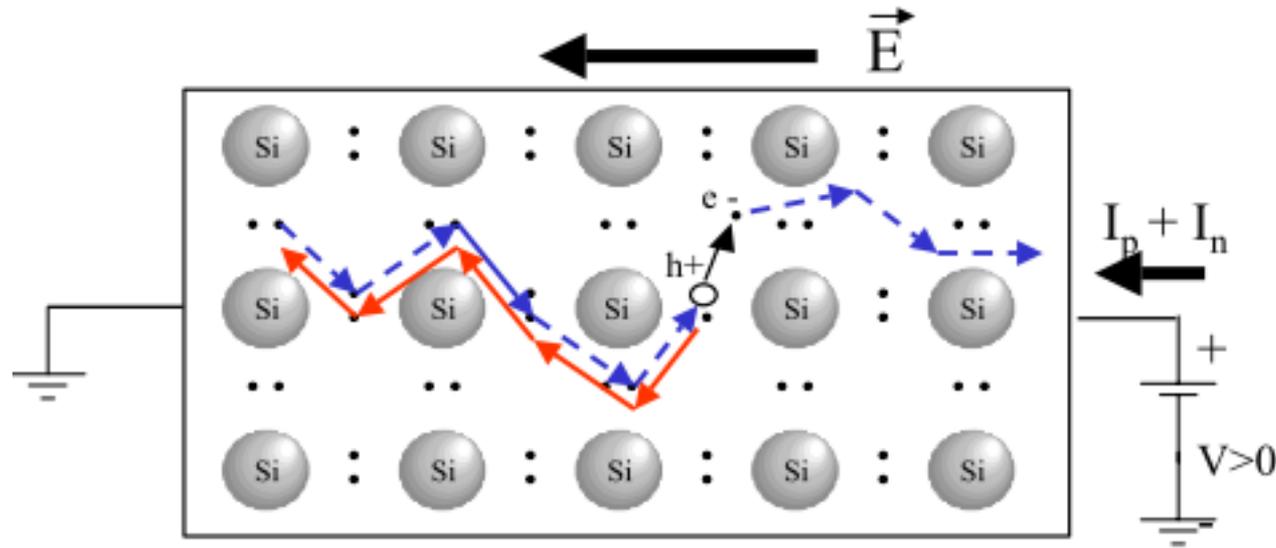
$$J_p = -qD_p \left| \text{grad}(p) \right| = -qD_p \frac{dp}{dx} \longrightarrow I_{p \text{ dif}} = -q \cdot A \cdot D_p \frac{dp}{dx}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EXERCÍCIOS

3.29 Calcule a densidade intrínseca de portadores n_i a 250 K, 300 K e 350 K.

Resposta $1,5 \times 10^8/\text{cm}^3$; $1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$; $4,18 \times 10^{11}/\text{cm}^3$.

Using eq. (3.36) we have $n_i = \sqrt{BT^3} e^{-E_g/2kT}$ $\frac{\text{carriers}}{\text{cm}^3}$

where $B = 5.4 \times 10^{31}$
 $E_g = 1.12 \text{ eV}$ for silicon

$k = 8.62 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$

$T = \text{temperature in Kelvin}$

for $T = 250 \text{ K} \sim n_i = 1.5 \times 10^8 \frac{\text{carriers}}{\text{cm}^3}$

$T = 300 \text{ K} \sim n_i = 1.5 \times 10^{10} \frac{\text{carriers}}{\text{cm}^3}$

$T = 350 \text{ K} \sim n_i = 4.18 \times 10^{11} \frac{\text{carriers}}{\text{cm}^3}$

3.30 Considere um silício tipo n no qual a concentração de dopantes N_D é $10^{17}/\text{cm}^3$. Encontre as concentrações de elétrons e lacunas a 250 K, 300 K e 350 K. Você pode usar os resultados do Exercício 3.29.

Resposta 10^{17} , $2,25 \times 10^{-1}$; 10^{17} , $2,25 \times 10^3$; 10^{17} , $1,75 \times 10^6$ (todos por cm^3).

Solução

Given the dopant concentration is $N_D = 10^{17}$ the electron concentration is equivalent to

$N_D = 10^{17} \frac{\text{electrons}}{\text{cm}^3}$ at All temperatures

Solução (cont)

The concentration of holes can be found by:

$$p_{no} = \frac{n_i^2}{N_D} = \begin{cases} 0.225 \frac{\text{holes}}{\text{cm}^3} & \text{at 250K} \\ 2250 \frac{\text{holes}}{\text{cm}^3} & \text{at 300K} \\ 1.75 \times 10^6 \frac{\text{holes}}{\text{cm}^3} & \text{at 350K} \end{cases}$$

where n_i is obtained from exercise 3.29

3.31 Encontre a resistividade de (a) silício intrínseco e (b) silício tipo p com $N_A = 10^{16}/\text{cm}^3$. Use $n_i = 1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ e suponha que, para o silício intrínseco, $\mu_n = 1.350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ e $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, e para o silício dopado, $\mu_n = 1.110 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ e $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. (Note que a dopagem resulta em uma redução da mobilidade dos portadores.) Solução

Use eq (3.41)

$$(a) \rho = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} (1.5 \times 10^{10} \times 480 + 1.5 \times 10^{10} \times 1350)} = \underline{2.28 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}}$$

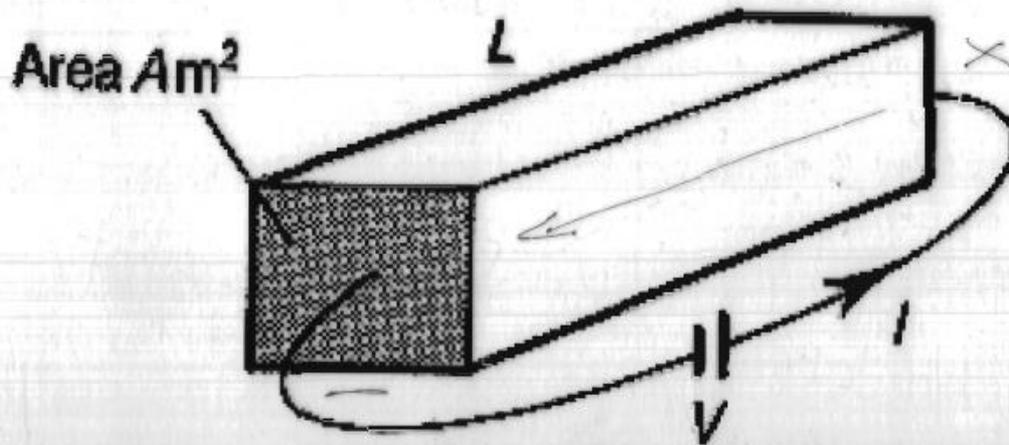
$$(b) \rho = \frac{1}{q(p\mu_{p0} + n\mu_{n0})} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \left(N_A \times 400 + \frac{n_i^2}{N_A} \times 1110 \right)}$$

↑ thermal equilibrium

$$= \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \left(10^{16} \times 400 + \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{16}} \times 1110 \right)} = \underline{1.56 \Omega \cdot \text{cm}}$$

Revisitando a Lei de Ohm

Suponha uma barra de material condutor ou semiconductor homogêneo (com características uniformes) de resistividade ρ_e ($\Omega \cdot m$), comprimento L (m) e seção A (m^2), submetido a um campo elétrico E :



A corrente que circula por ele é dada por: $I = \frac{V}{R} = \frac{VA}{\rho_e L}$

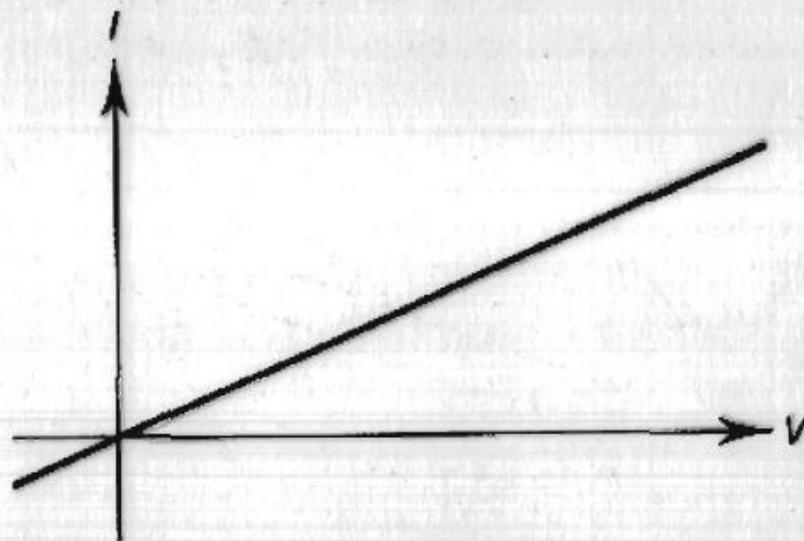
Podemos reescrever essa relação de outra forma:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{VA}{\rho_e L}$$

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho_e} \frac{V}{L} \quad [\text{A/m}^2]$$

ou

$$J = \sigma \times E \quad [\text{A/m}^2]$$



Materiais para Eletrônica

Resistividade elétrica:

$$\rho_e \text{ em } [\Omega \cdot \text{m}]$$

$\rho_e \neq \rho(z) \rightarrow$ dens. de cargas

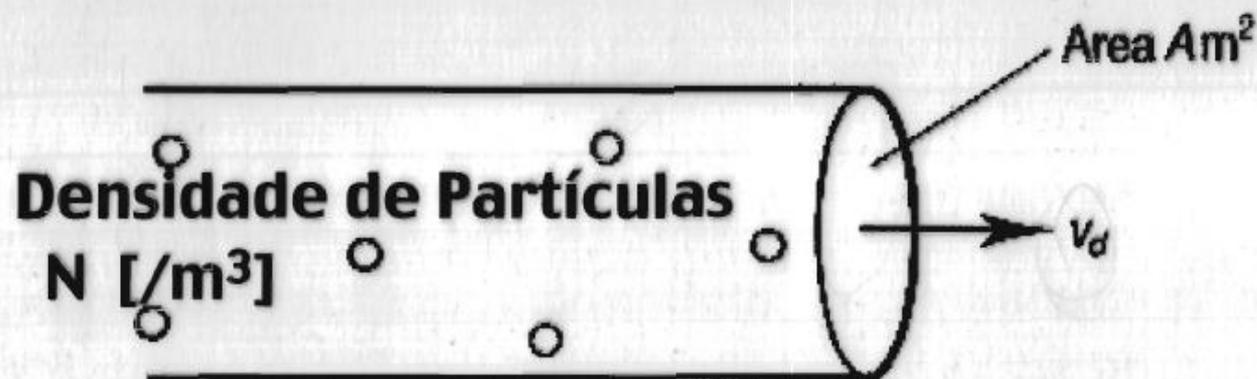
Condutividade elétrica:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_e} \quad [1/(\Omega \cdot \text{m})]$$

Velocidade de Deriva

$$I, V \leftrightarrow J, E$$

Vamos olhar melhor para σ :



Número de partículas em 1 m de tubo: $N.A$ [1/m]

Número de partículas em um

determinado ponto/segundo : $N.A.v_d$ [1/s]

em cargas por segundo: $Q.N.A.v_d$ [A]

ou, em outras palavras:

$$J = Q \cdot N \cdot v_d \text{ [A/m}^2\text{]}$$

A velocidade v_d é conhecida como velocidade de deriva.

Ela se aplica a qualquer material e situação onde pode-se definir uma certa densidade de partículas móveis e uma velocidade MÉDIA pode ser definida.

Conductividade e Mobilidade

Concluimos que:

$$J = \sigma \times E \quad [\text{A/m}^2]$$

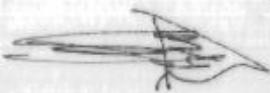
$$J = Q.N.v_d \quad [\text{A/m}^2]$$

Logo:

$$v_d = \text{constante} \times E$$

Essa constante, $\sigma / Q.N$, é conhecida como MOBILIDADE μ [$\text{m}^2/\text{V.s}$]

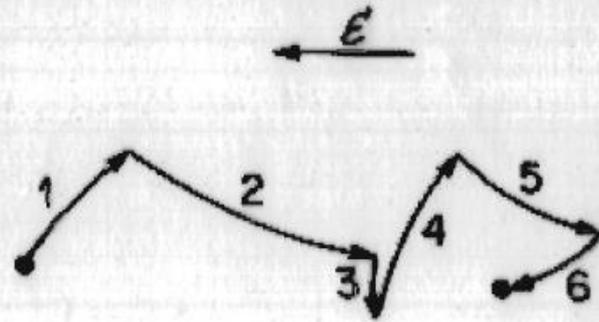
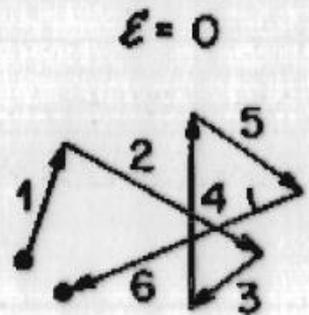
Podemos reescrever J como:


$$J = Q.N.\mu.E \quad [\text{A/m}^2]$$

E a condutividade como:

$$\sigma = Q.N.\mu \quad [\Omega/\text{m}]$$

Velocidade de Deriva e Velocidade Térmica



$$v_{th} = \left(\frac{8kT}{\pi M} \right)^{1/2} \text{ [m/s]}$$

10⁵ m/s a 300K

ou 0,026 eV

para elétrons em Si

$$v_d = \mu \times E$$

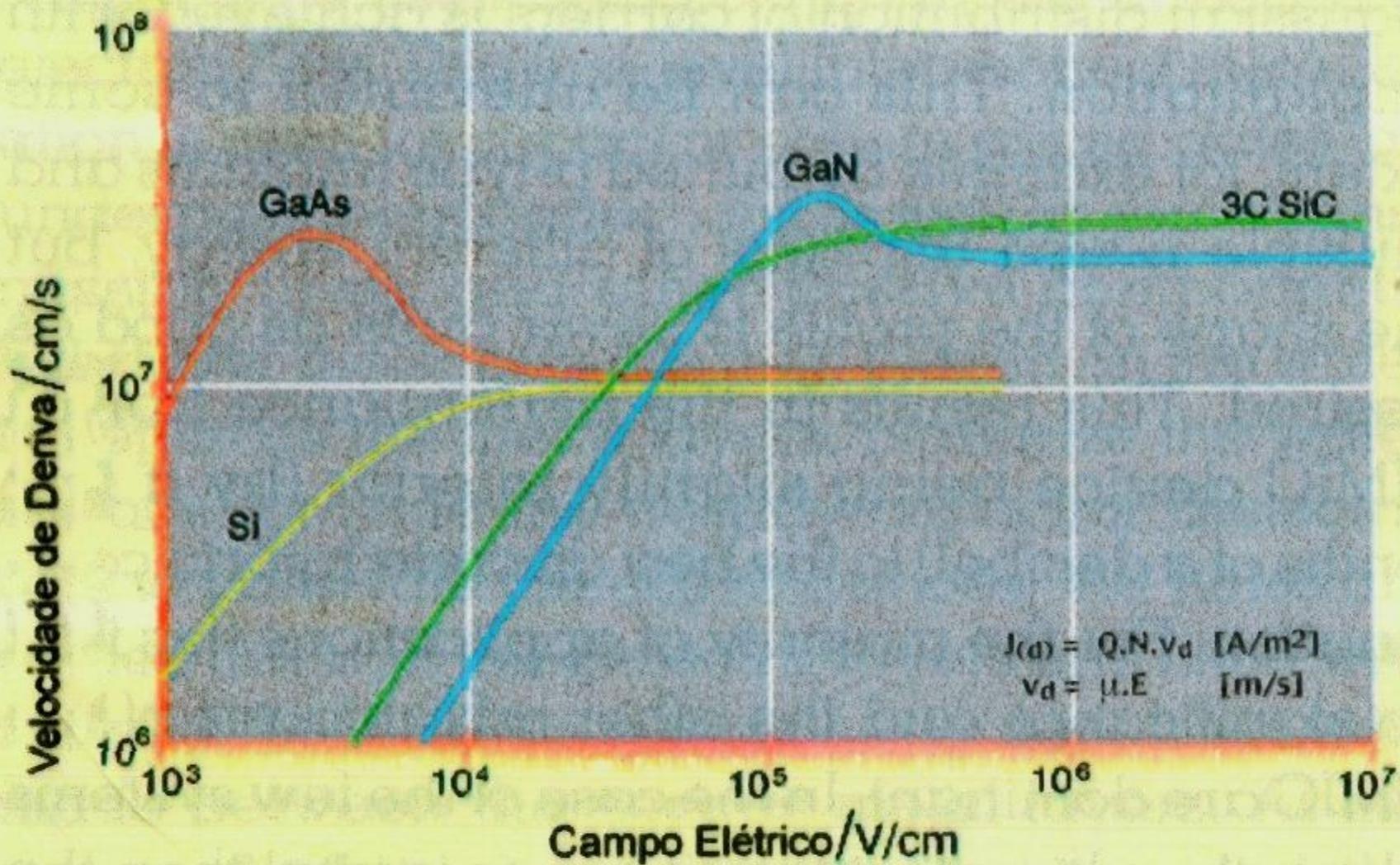
$\mu \cong 0,1 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$

$$v_d \ll v_{th}$$

Materials para Semicondutores

Table 2 Element and Compound Semiconductors

| Element | IV-IV Compounds | III-V Compounds | II-VI Compounds | IV-VI Compounds |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Si | SiC | AlAs | CdS | PbS |
| Ge | | AlSb | CdSe | PbTe |
| | | BN | CdTe | |
| | | GaAs | ZnS | |
| | | GaP | ZnSe | |
| | | GaSb | ZnTe | |
| | | InAs | | |
| | | InP | | |
| | | InSb | | |



Velocidade de deriva dos elétrons para arseneto de gálio, silício, nitreto de gálio e carbeto de silício

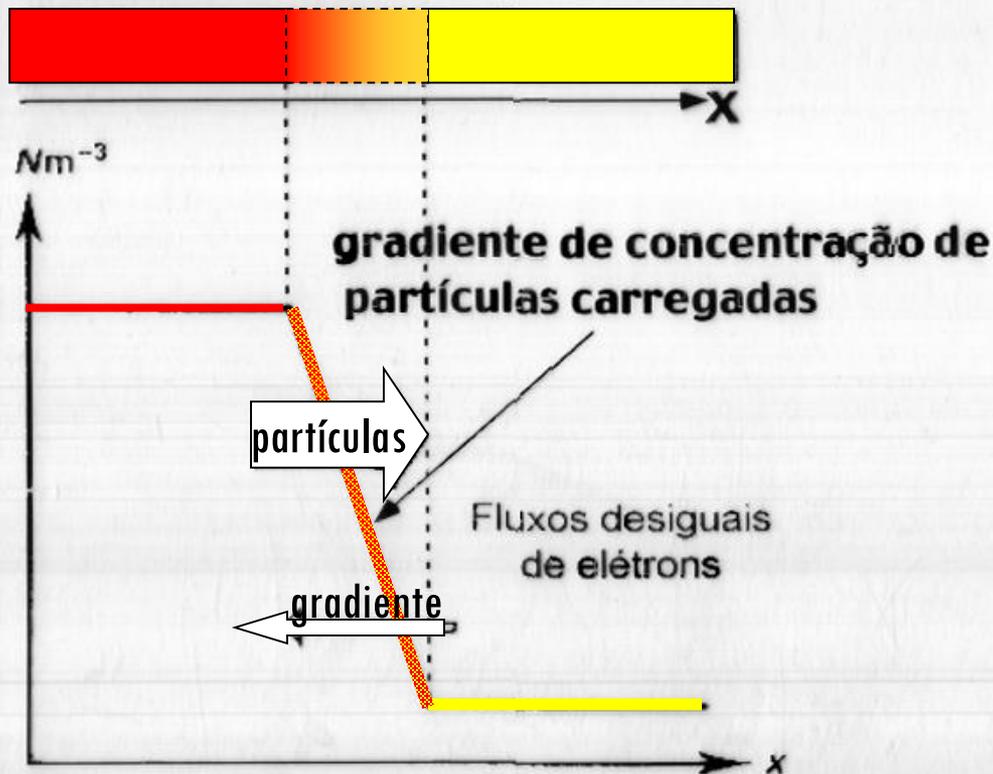
GEC REVIEW, VOL. 13, NO. 2, 1998

A Corrente de Difusão

12

Devido a agitação térmica, as partículas carregadas movem-se aleatoriamente, mesmo na ausência de campo elétrico.

Considere a situação a seguir:



Note:

- a) Há movimento aleatório
- b) Há um gradiente de concentração

A4_11

A Corrente de Difusão

$$\text{Fluxo}_{\text{dif}} = -D \frac{dN}{dx} \quad [1/(m^2.s)]$$

onde D é o coeficiente de difusão das partículas

Logo:

$$J_{\text{dif}} = -qD \frac{dN}{dx} \quad [A/m^2]$$

As Correntes de Deriva e Difusão

Em semicondutores observamos que em condições normais as correntes de deriva e de difusão constituem praticamente toda a corrente que flui no material. Logo:

$$J_{TOTAL} = J_{der} + J_{dif} \quad (\text{vale a lei da superposição!})$$

$$J_{TOTAL} = Q \cdot N \cdot \mu \cdot E - QD \frac{dN}{dx} \quad [\text{A/m}^2]$$

REOF. ELETRÔNICA I (PSI3321) 2o. Semestre de 2016 (assuntos P2)

Livro Texto: Sedra&Smith, K.C. Microeletrônica. Pearson, 2007, (tradução da 5a. Ed. em inglês)

| | | |
|--------------------------|--|---|
| 10 ^a 13/09 | Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação c.c., circuito retificador de meia onda, circuito retificador de onda completa com enrolamento secundário com tomada central, exercícios: 3.22. | Sedra, Cap. 3 p. 106-109 |
| 11 ^a 15/09 | Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro. | Sedra, Cap. 3 p. 109-111 |
| 12 ^a 20/09 | Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9). | Sedra, Cap. 3 p. 112-115 |
| 13 ^a 22/09 | Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28. | Sedra, Cap. 3 p. 115-118 |
| 14 ^a 27/09 | Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios. | texto avulso + Sedra, Cap. 3 p. 117-121 |
| 15 ^a 29/09 | Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios. | texto avulso + Sedra, Cap. 3 p. 121-126 |
| 16 ^a 04/10 | Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios. | texto avulso + Sedra, Cap. 3 p. 127-128 |
| 17 ^a 06/10 | Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção, a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios. | Sedra, Cap. 3 p. 124-125 e p. 128-129 |
| 18 ^a 11/10 | Aula de Exercícios (se estiver em fase) | |

2^a. Semana de Provas (13/10 a 19/10/2016) Data: **a combinar** – Horário: 7:30h??

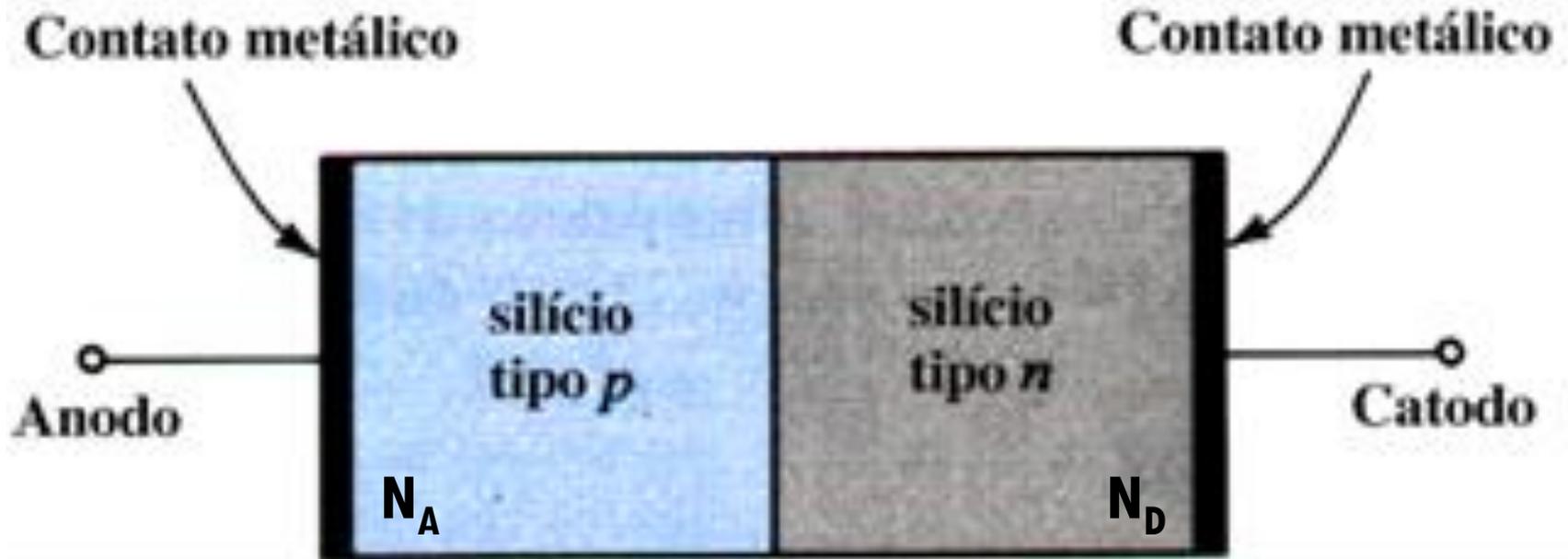
15ª Aula:

Conceitos Básicos de Dispositivos Semicondutores

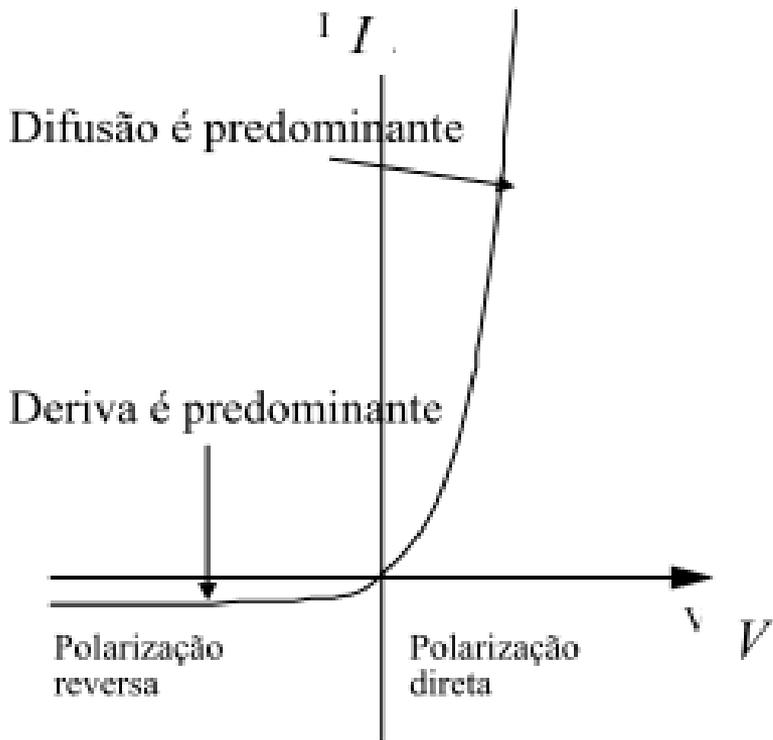
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Olhar a Lei de Ohm do lado de dentro do material, explicando os conceitos de condutividade e mobilidade**
- Explicar, através de conceitos e equações, o que é corrente de deriva e o que é corrente de difusão**
- Explicar o que é silício intrínseco e silício dopado (tipo n e tipo p)**
- Calcular a concentração de portadores em silício tipo n e tipo p**
- Explicar o que ocorre quando se junta um silício tipo n e um p , criando um diodo semiconductor**
- Calcular a barreira de potencial interna e a largura da região de depleção em um diodo semiconductor**

O Diodo



Diodo Semicondutor (Junção PN)



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

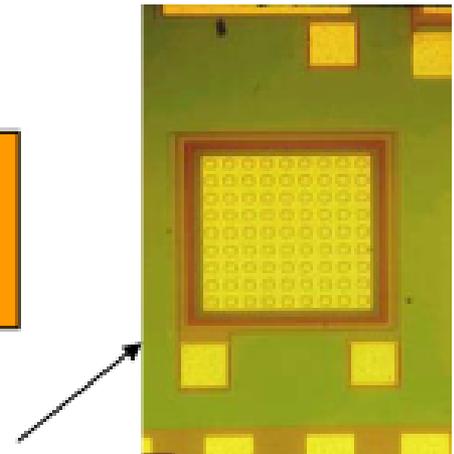
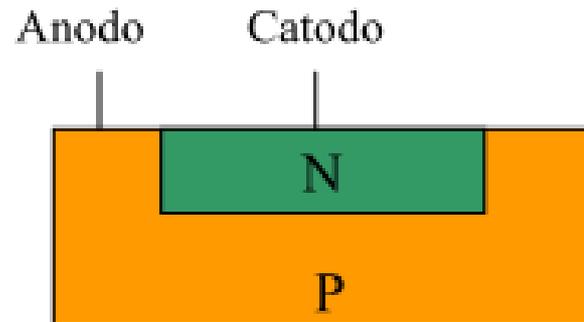
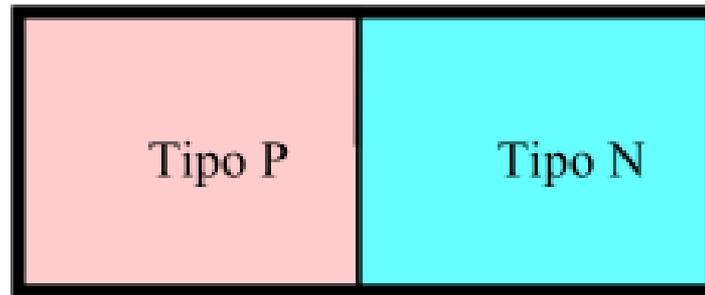
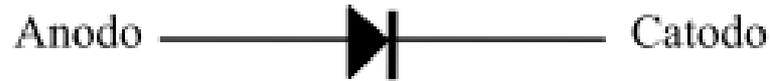
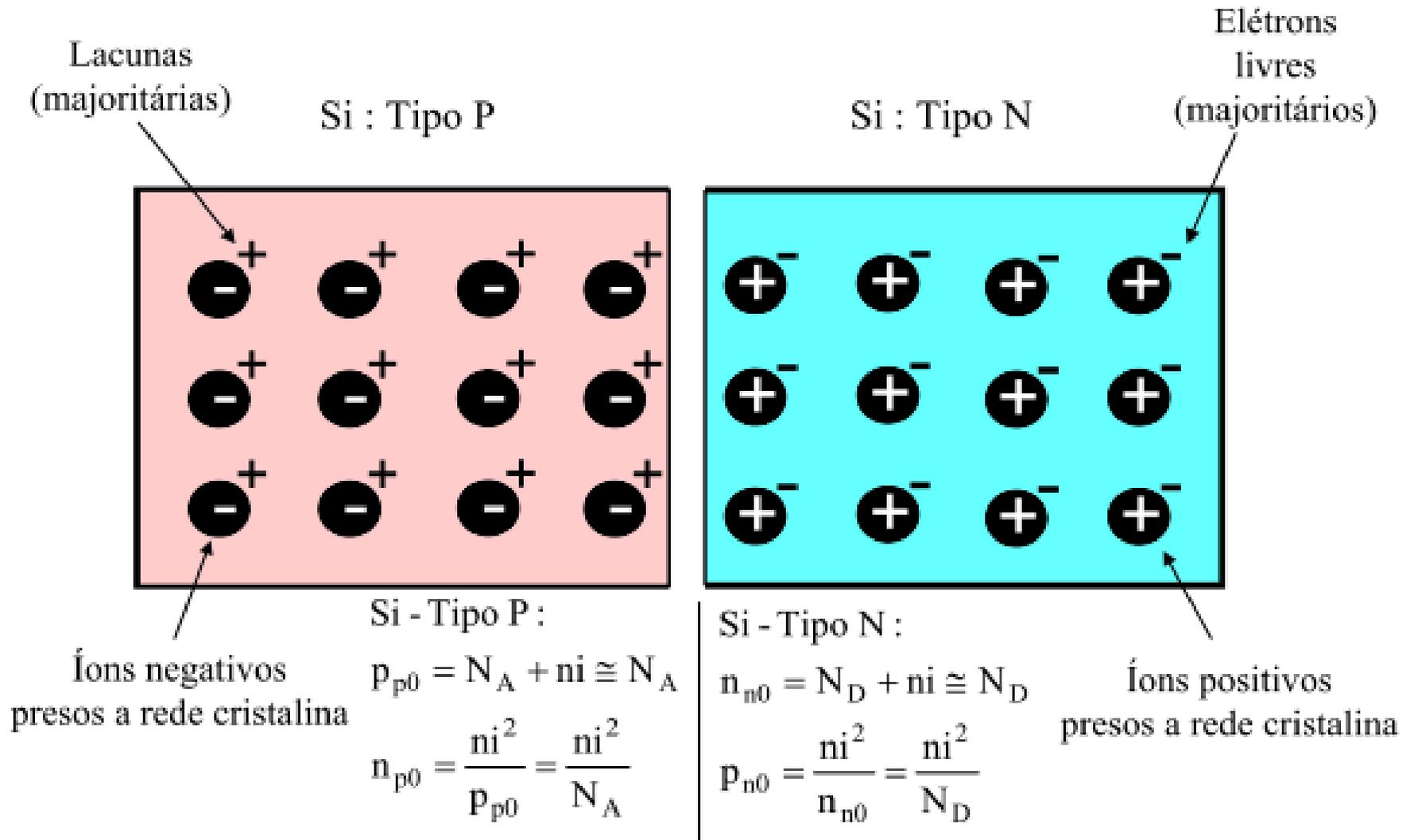


Foto de um diodo construído na EPUSP

JUNÇÃO PN antes do contato (Modelo de cargas)

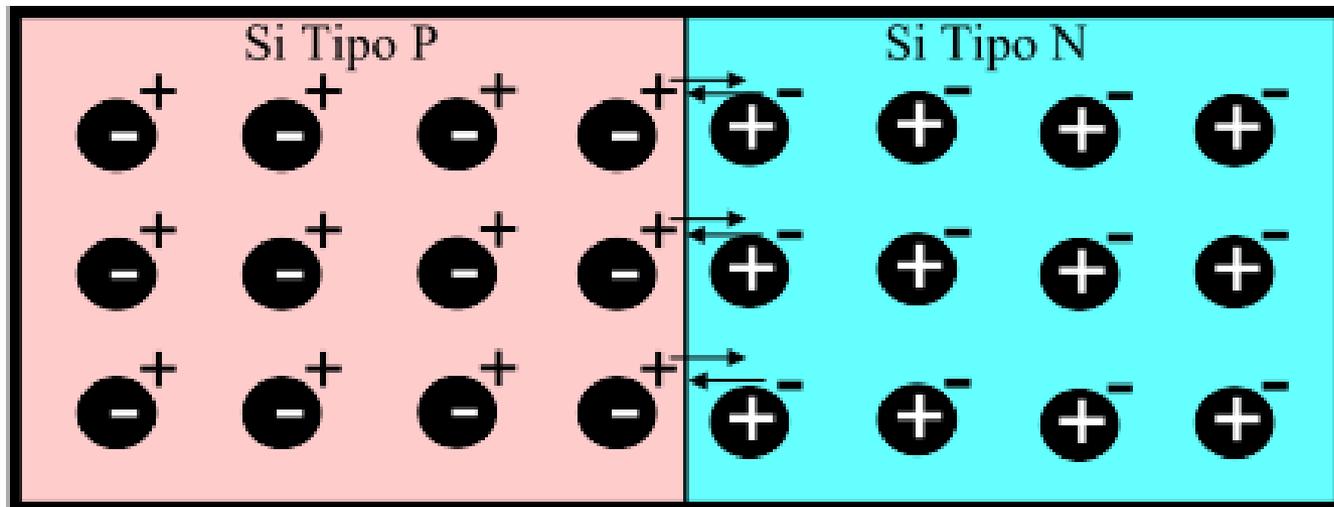


JUNÇÃO PN após o contato (Modelo de cargas)

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.

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

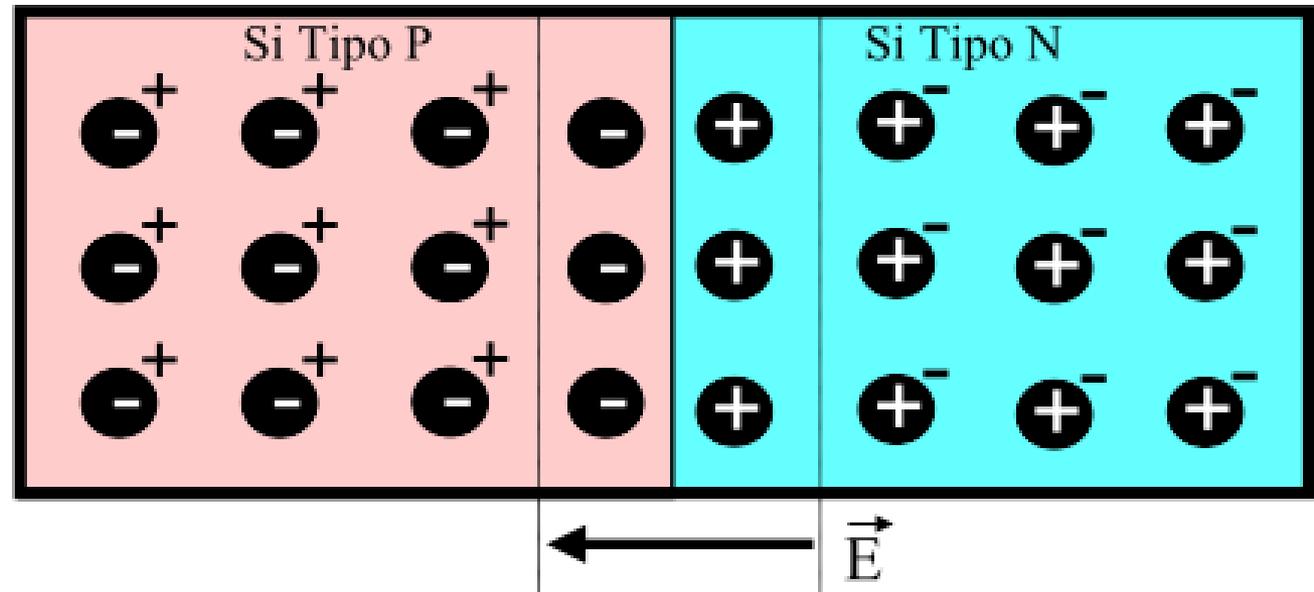


Ao atravessar a junção as lacunas vão se recombinar com os elétrons (desaparece ambos os portadores) formando uma região de carga espacial (região de depleção). Idem para os elétrons que atravessam a junção e se recombinaem com as lacunas.

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.

$$I_{T\ der} = I_S = I_{p\ der} + I_{n\ der} \quad \xrightarrow{\quad} \quad I_{T\ dif} = I_D = I_{p\ dif} + I_{n\ dif}$$

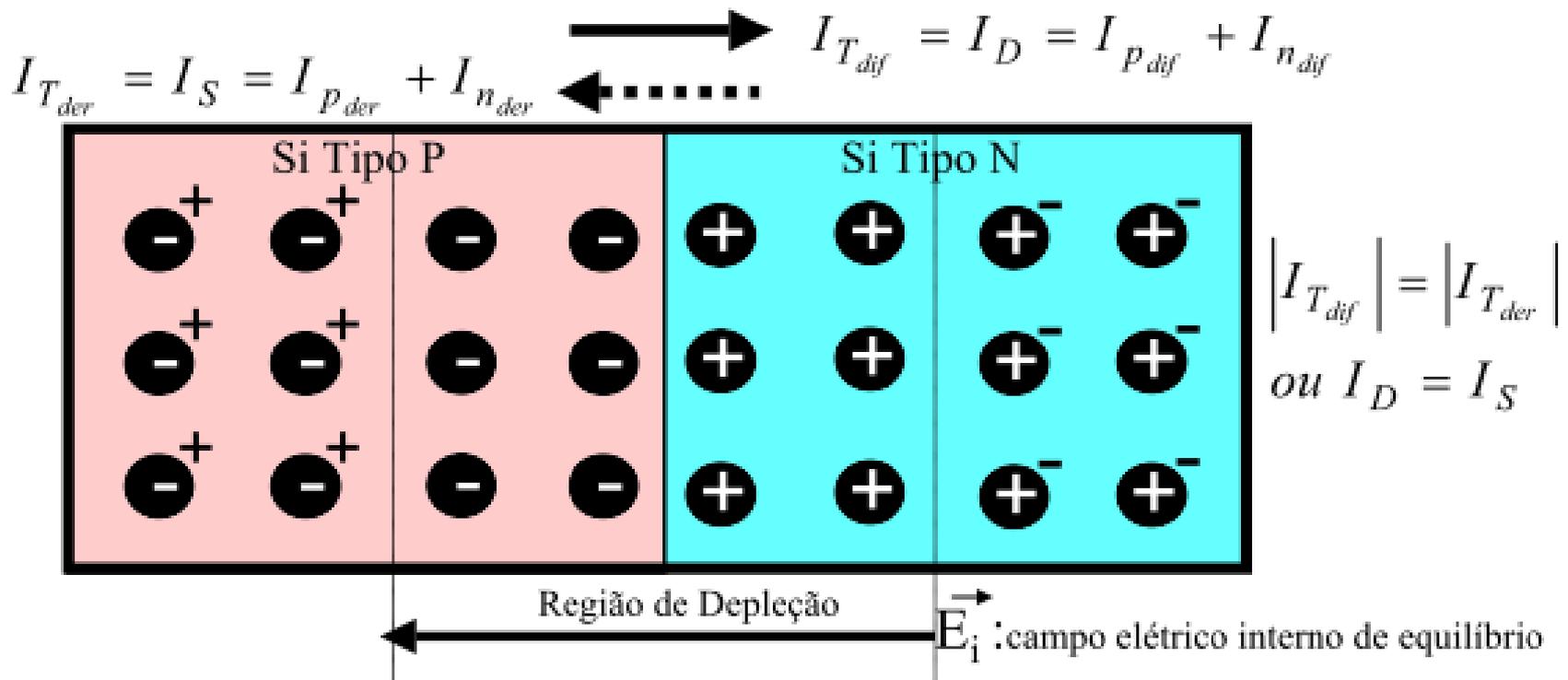


$$|I_{T\ dif}| > |I_{T\ der}|$$

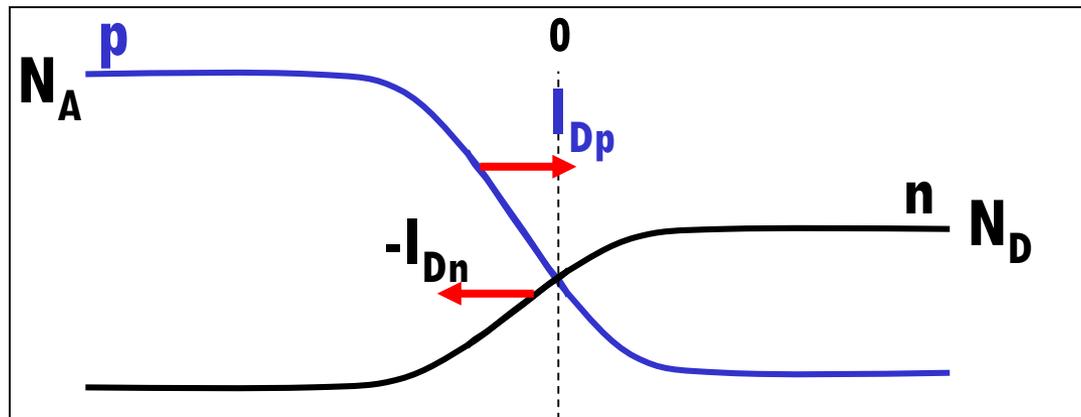
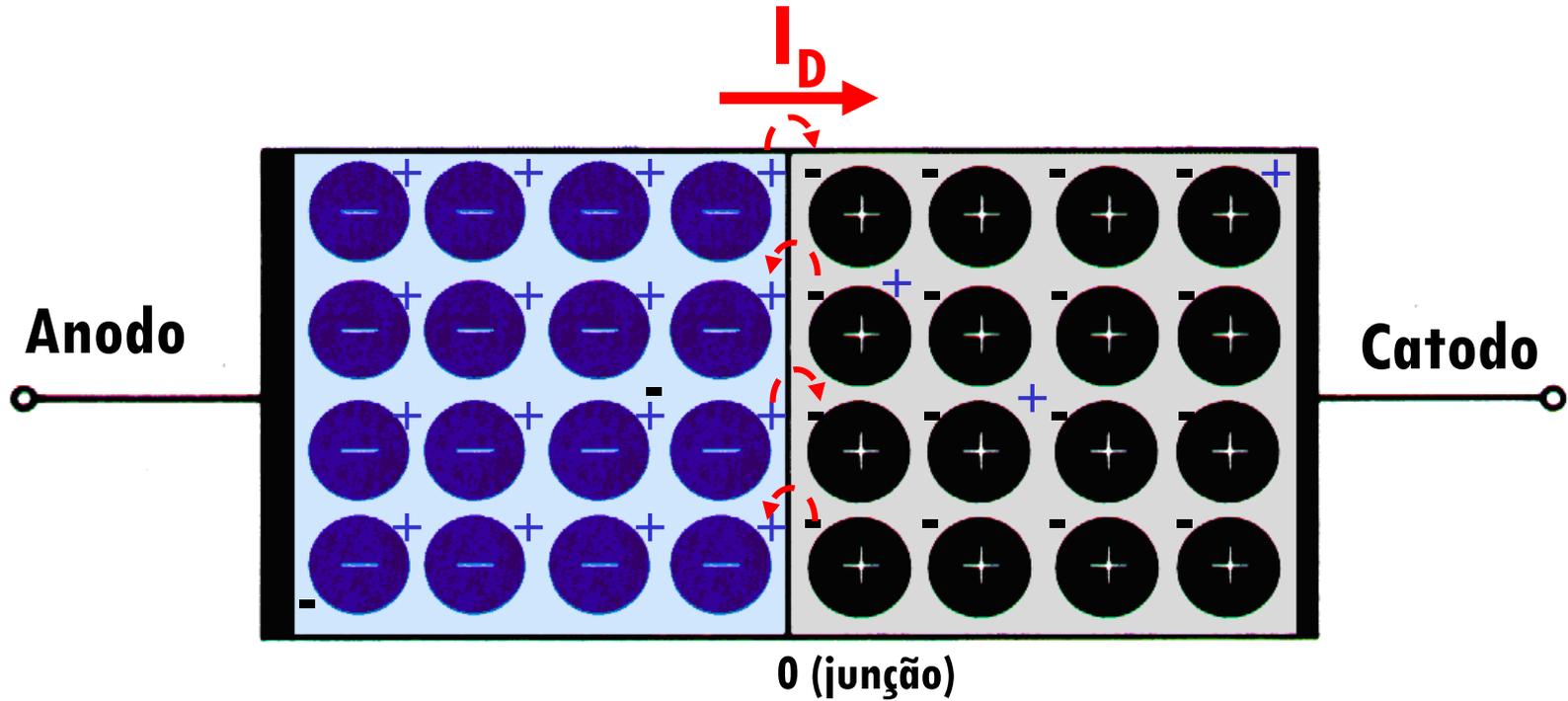
JUNÇÃO PN atingiu o equilíbrio térmico (Modelo de cargas)

Se nenhuma polarização externa for aplicada, as correntes de difusão e de deriva tendem a se anular mutuamente, de forma que em equilíbrio: $I_T = I_T$

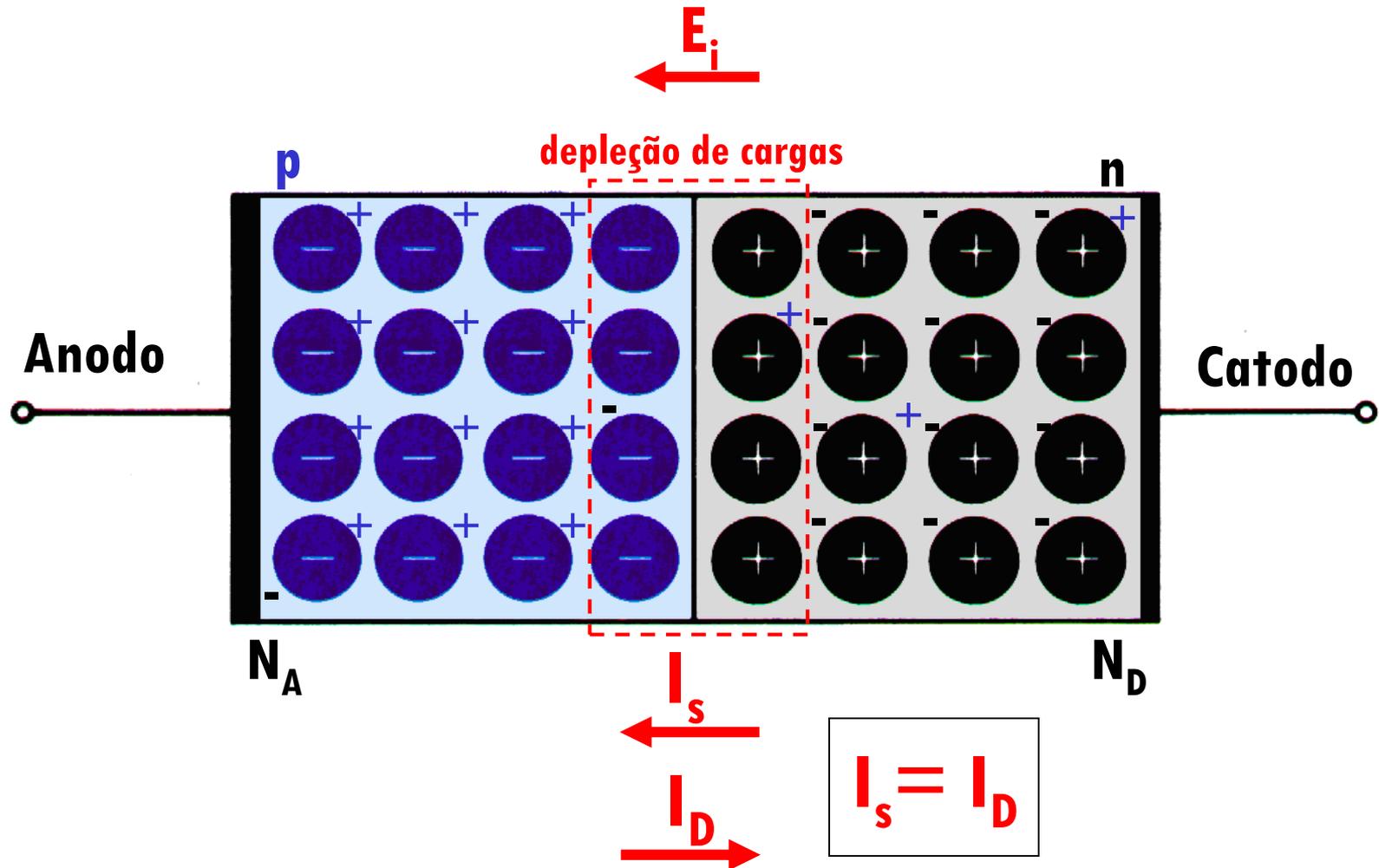
$$I_{T\ dif} + I_{T\ der} = 0 \quad (\text{ou } I_D = I_S)$$



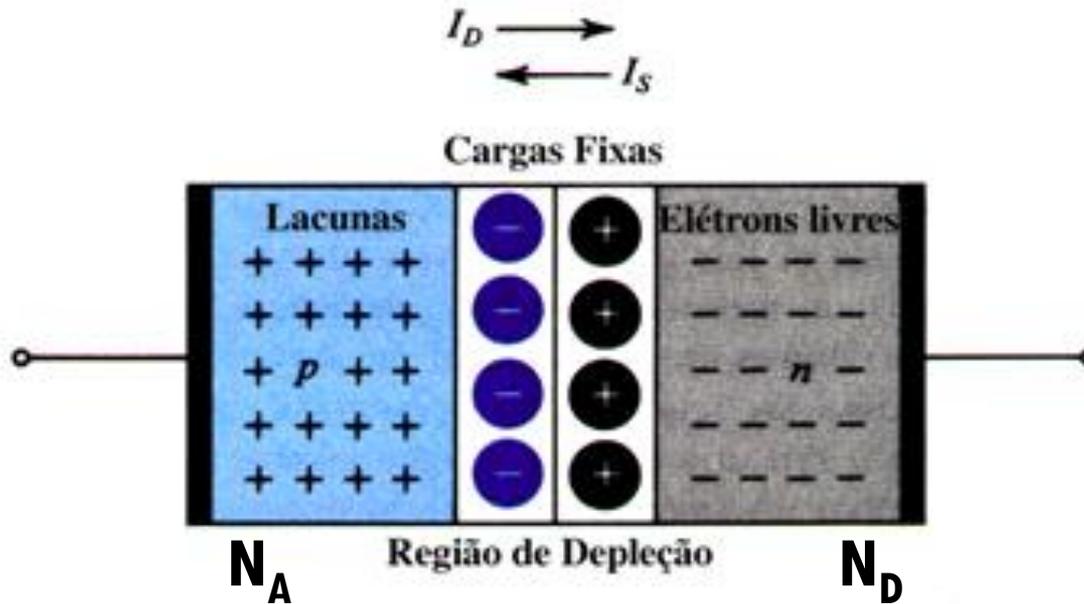
O Diodo



A dinâmica da junção pn em Aberto



O Diodo em Aberto



(a)

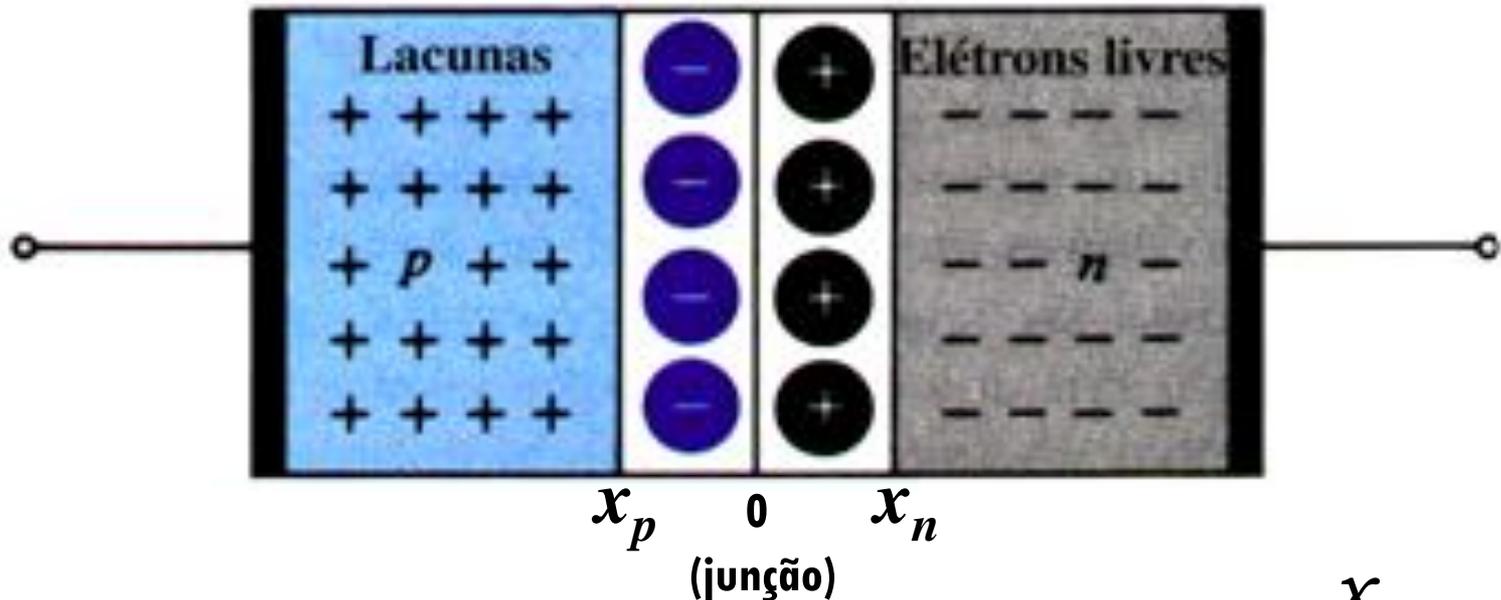


(b)

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

O Diodo em Aberto

Cargas Fixas



$$qx_p N_A A = qx_n N_D A$$

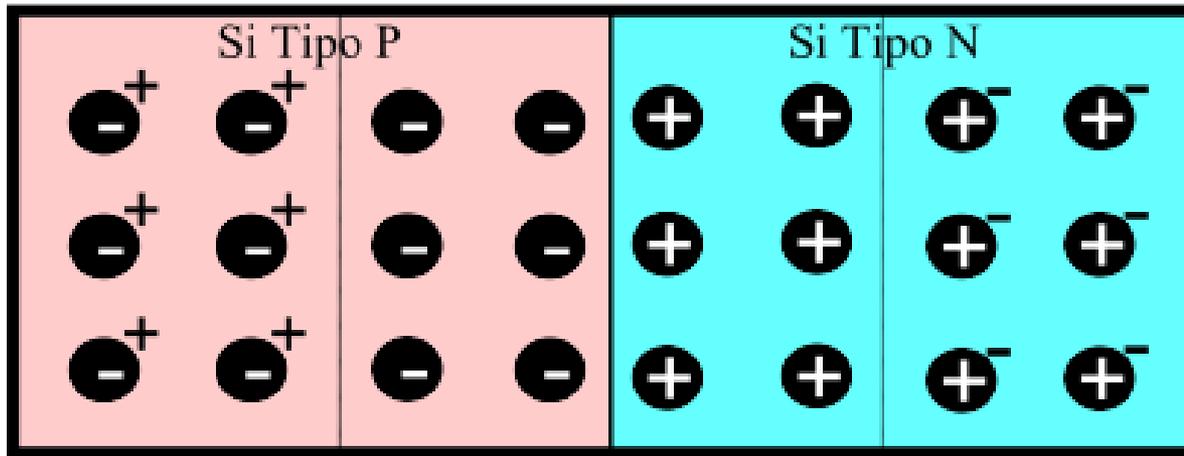
ou

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

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

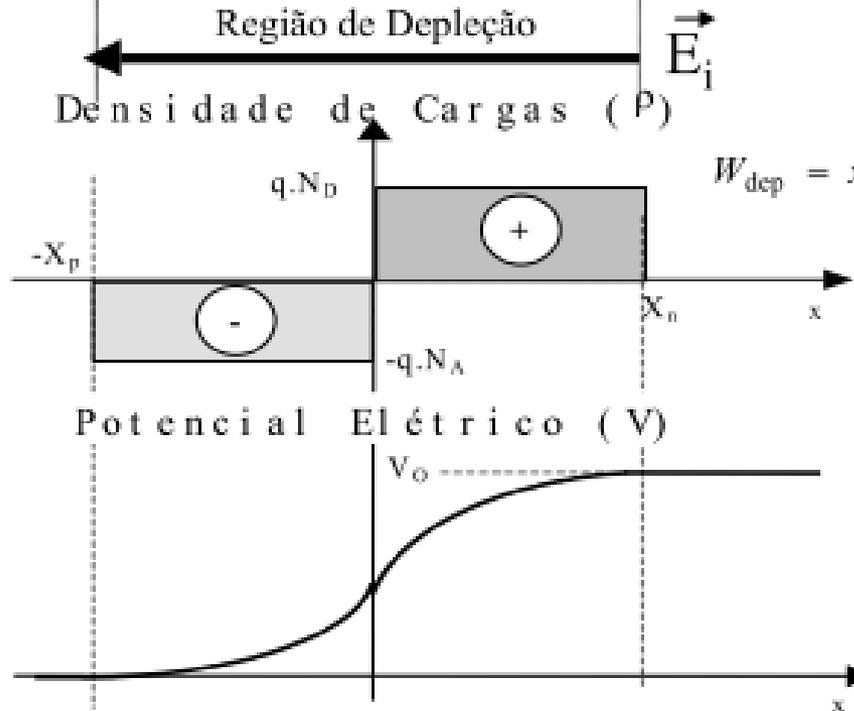
em que ε_s é a permissividade elétrica do silício = $11,7 \varepsilon_0 = 1,04 \times 10^{-12}$ F/cm. Tipicamente, W_{dep} está na faixa de 0,1 a 1 μm .

RESUMO



$$qx_p N_A A = qx_n N_D A$$

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$



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

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

Exercício

3.32 Para uma junção pn com $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$ e $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$ a $T = 300$ K, determine a tensão interna, a largura da região de depleção e as distâncias que ela se estende no lado p e no lado n . Utilize $n_i = 1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$. **SOLUÇÃO**

$$\text{From Eq. (3.48)} \quad \rightarrow \quad V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 25 \ln \left(\frac{10^{17} \cdot 10^{16}}{(1.5 \times 10^{10})^2} \right) = 728 \text{ mV}$$

Width of depletion region is found from Eq. (3.50)

$$W_{\text{dep}} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0} = \sqrt{\frac{2 \times 104 \times 10^{-12}}{1.6 \times 10^{-19}} \left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{10^{16}} \right) 0.728} = \underline{\underline{0.32 \mu\text{m}}}$$

$$\text{Since } W_{\text{dep}} = x_n + x_p \quad \text{where} \quad \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D} = \frac{10^{17}}{10^{16}} = 10 \quad x_n = 10x_p$$

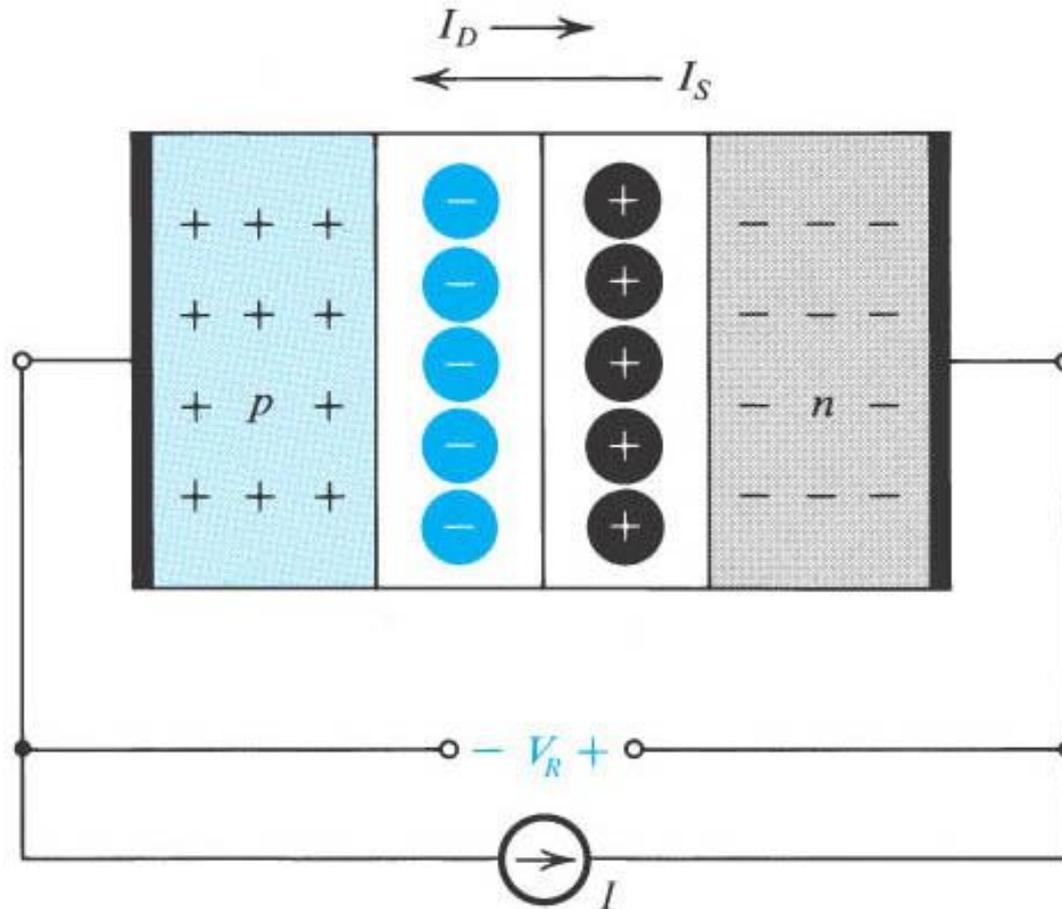
$$\text{If } x_p = 0.32 \mu\text{m} \Rightarrow x_p = \underline{\underline{0.03 \mu\text{m}}}$$

$$1.1x_n = 0.32 \mu\text{m} \Rightarrow x_n = \underline{\underline{0.29 \mu\text{m}}}$$

Resp. 728 mV; 0,32 mm; 0,03 mm e 0,29 mm

O Diodo

Polarizado Reversamente

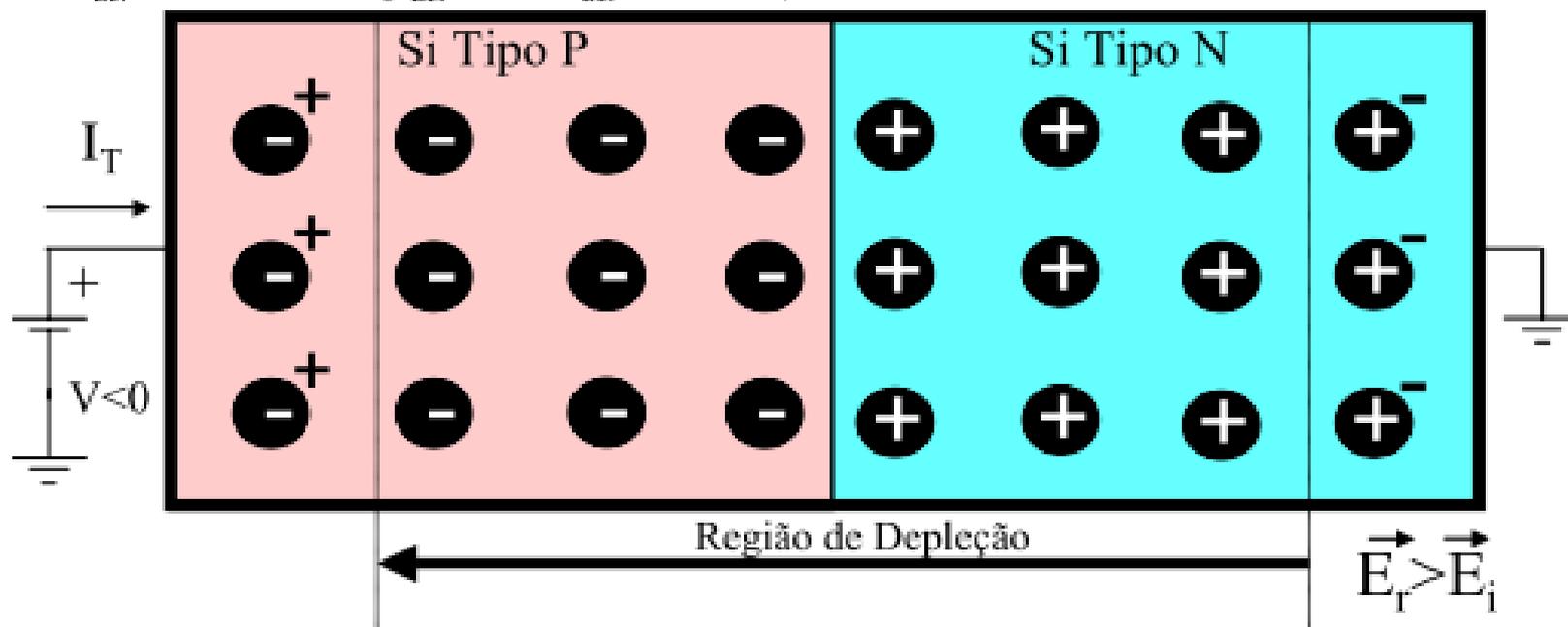


JUNÇÃO PN polarizada reversamente (Modelo de cargas)

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

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

$$I_{T\ der} = I_S = I_{P\ der} + I_{n\ der} \quad \leftarrow \dots \quad \rightarrow \quad I_{T\ dif} = I_D = I_{P\ dif} + I_{n\ dif}$$

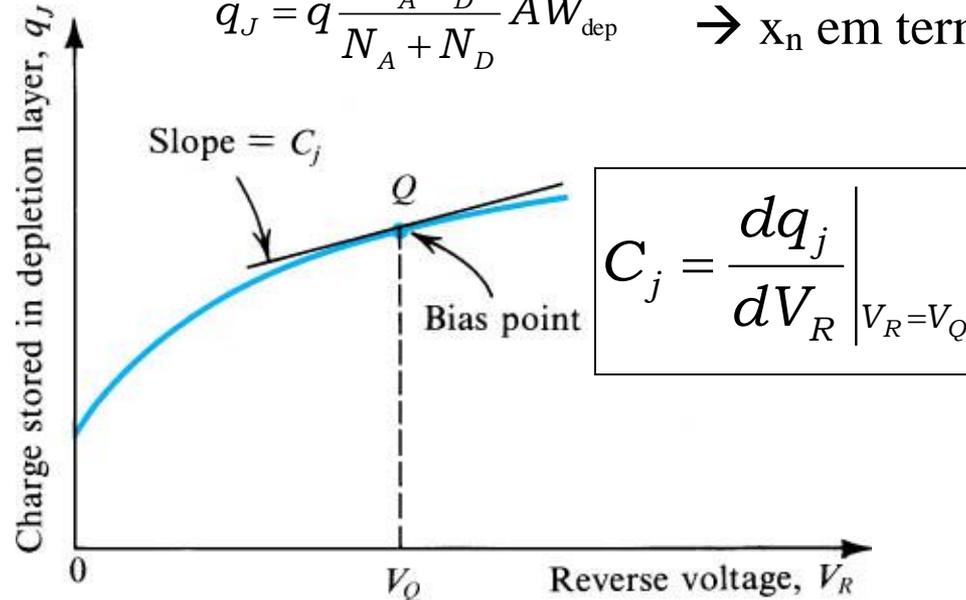


O Diodo Polarizado Reversamente

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

$$q_J = q_N = qN_D x_n A = q_N \text{ do lado n}$$

$$q_J = q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A W_{\text{dep}} \rightarrow x_n \text{ em termos de } W_{\text{dep}}$$



$$q_J = q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{q}\right)\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + V_R)}$$

O Diodo Polarizado Reversamente

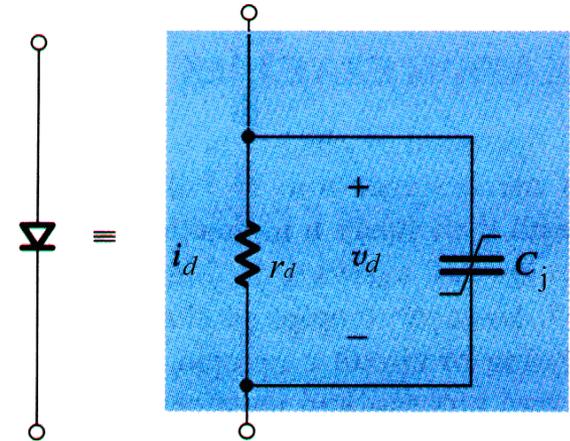
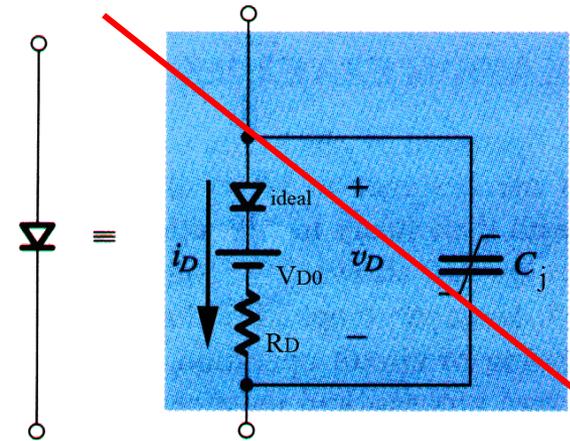
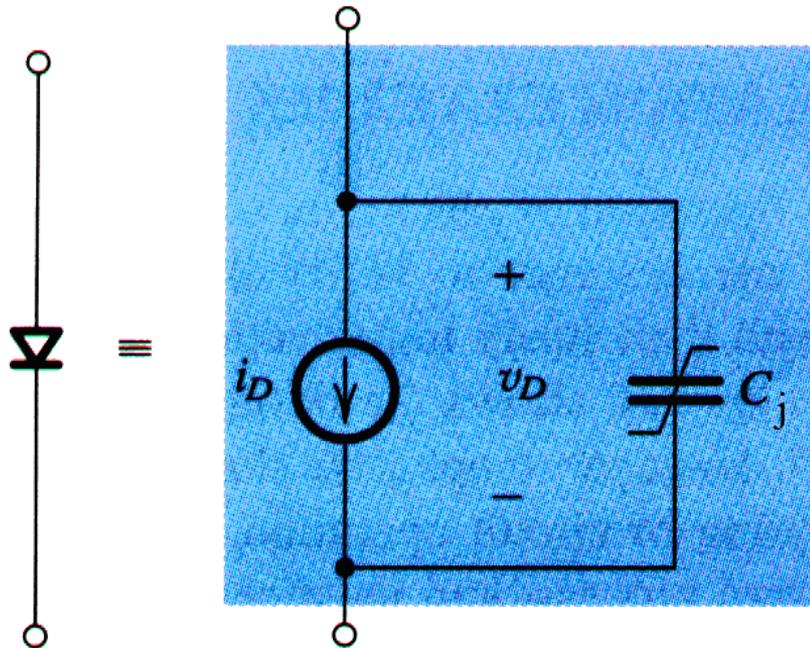
Capacitância de junção $\rightarrow C_j = \left. \frac{dq_j}{dV_R} \right|_{V_R=V_Q}$

$$q_J = q \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{q} \right) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V_R)}$$

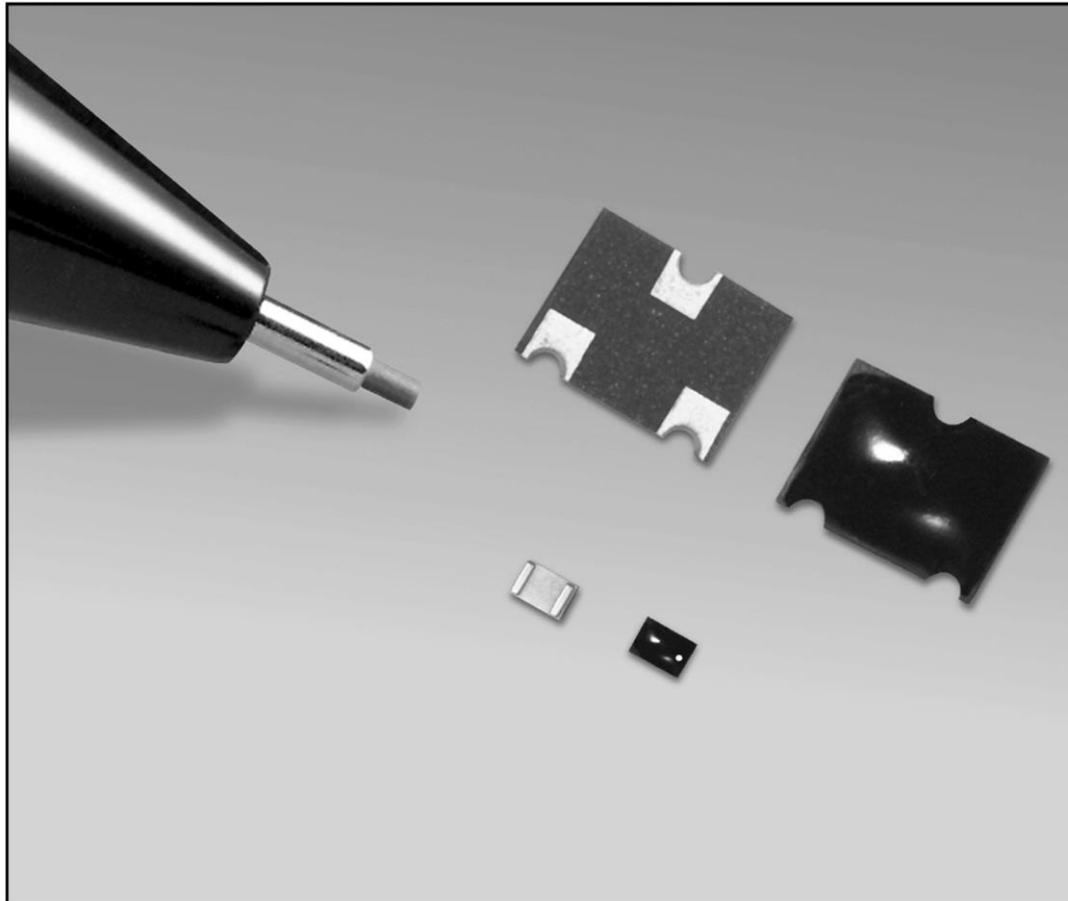
$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}} \quad \text{onde} \quad C_{j0} = A \sqrt{\left(\frac{\epsilon_s q}{2} \right) \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) \left(\frac{1}{V_0} \right)}$$

Na prática $C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_0} \right)^m}$ com $m = 1/3$ a $1/2$

O Diodo Polarizado Reversamente



VARACTOR DIODES



VARACTOR DIODES

SUPER HYPERABRUPT TUNING VARACTOR DIODES

FEATURES

- Mesa epitaxial silicon construction
- Silicon dioxide passivated
- Superior mid range linear characteristics
- High tuning ratios
- High Q
- Available in common cathode style
- Available in chip form (add suffix -000)

APPLICATIONS

- TCXOs, VCXOs
- Low voltage wireless open loop VCOs

- Low voltage wireless phase locked loop VCOs
- Phase shifters

SPECIFICATIONS

Reverse breakdown voltage at 10 μ A DC
(at 25°C): 12 V min

Maximum reverse leakage current at -10 V
(at 25°C): 0.05 μ A DC

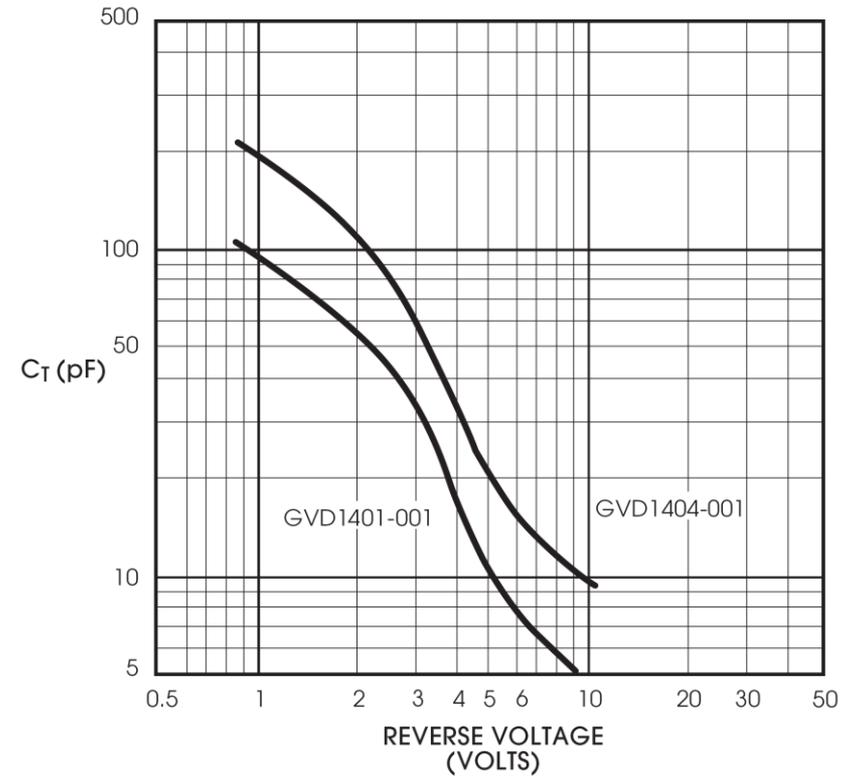
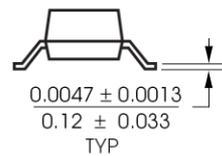
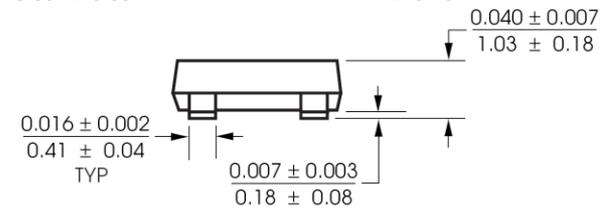
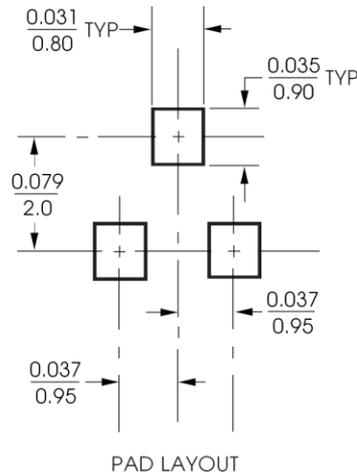
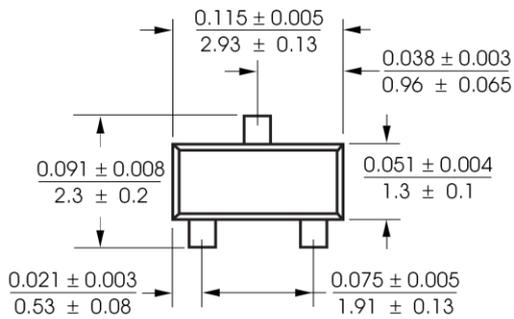
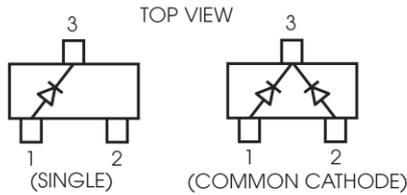
Device dissipation at 25°C: 250 mW (derated
linearly to zero at +125°C)

Operating junction temperature: -55°C to +125°C

Storage temperature: -55°C to +125°C

| Total Capacitance C_T (pF) at -2 V | | Total Capacitance C_T (pF) at -7 V typ | Total Capacitance C_T (pF) at -10 V | | Q min at -2 V (10 MHz) | Model Number | |
|--------------------------------------|-----|---|---------------------------------------|------|--------------------------------|--------------|----------------|
| min | max | | min | max | | Single | Common Cathode |
| 46 | 68 | 6.1 | 4.2 | 5.2 | 75 | GVD1401-001 | — |
| 100 | 150 | 13.0 | 8.6 | 10.6 | 50 | GVD1404-001 | — |

VARACTOR DIODES



Exercício

3.33 Para uma junção pn com $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$ e $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$ operando em $T = 300 \text{ K}$, determine:

- (a) o valor de C_{j0} por unidade de área da junção (mm^2 é uma unidade conveniente) e
(b) a capacitância C_j para uma tensão de polarização reversa de 2 V assumindo uma área de junção de 2500 mm^2 . Considere $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3$, $m = 1/2$ e o valor de V_0 determinado no Exercício 3.13 ($V_0 = 0,728 \text{ V}$).

SOLUÇÃO

(a) From Eq. 3.56 C_{j0} per cm^2 of junction area

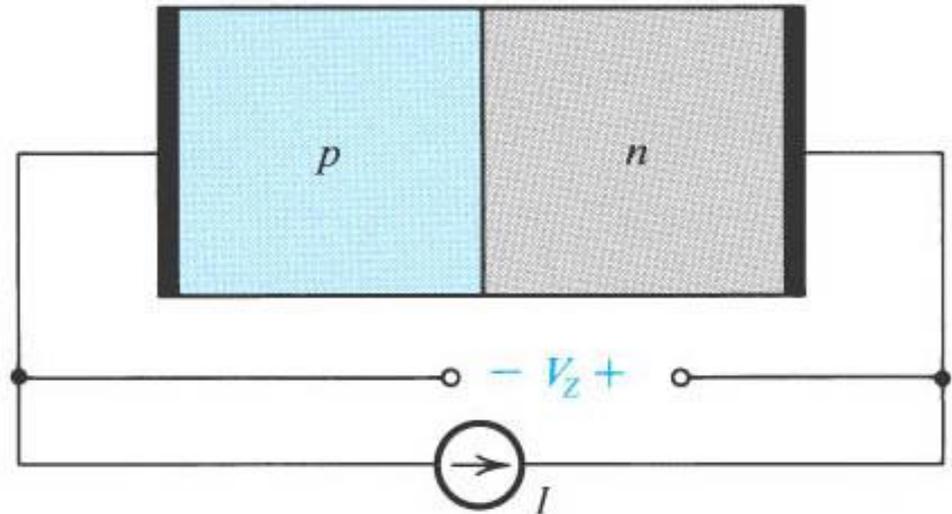
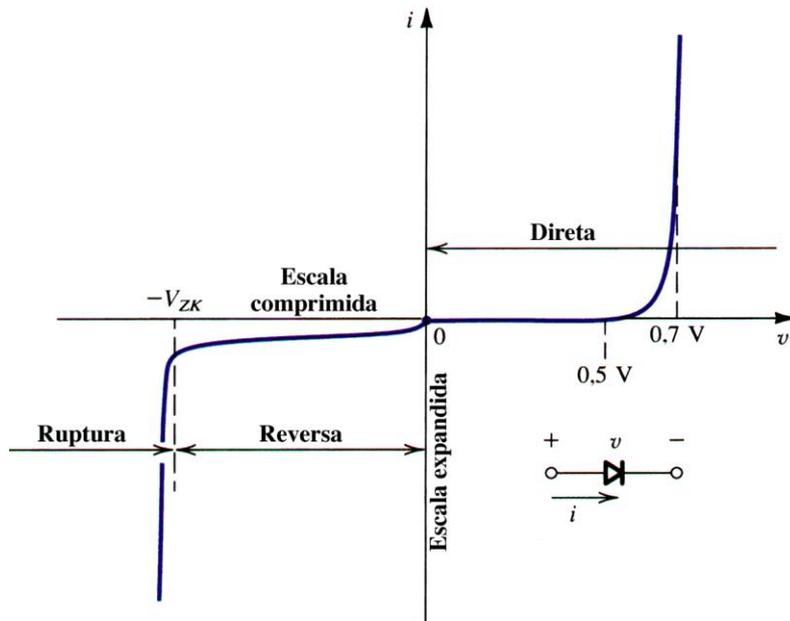
$$= \sqrt{\frac{\epsilon_s q}{2} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot \frac{1}{V_0}} = \sqrt{\frac{1.04 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \cdot \frac{10^{17} \cdot 10^{16}}{10^{17} + 10^{16}} \cdot \frac{1}{0.728}}}$$
$$= 0.32 \times 10^{-7} \text{ F/cm}^2 = 0.32 \times 10^{-7} \times 10^{-8} \text{ F}/\mu\text{m}^2 = \underline{0.32 \text{ fF}/\mu\text{m}^2}$$

$$(b) C_{j0} = 0.32 \times 10^{-13} \times 2500 = 0.8 \text{ pF}$$

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_0}\right)^m} = \frac{0.8}{\left(1 + \frac{2}{0.728}\right)^{1/2}} = 0.41 \text{ pF}$$

Resp. (a) $0,32 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$; (b) $0,41 \text{ pF}$

O Diodo na Região de Ruptura



Quando $I > I_s$ a junção se rompe:

Ruptura por Efeito Zener ($< 5V$): ocorre quando o campo elétrico na camada de depleção aumenta até quebrar ligações covalentes (pares n-p)

Ruptura por Efeito Avalanche ($> 7V$): ocorre quando os portadores minoritários que cruzam a região de depleção quebram as ligações covalentes, e podem em seguida quebrar outras ligações

10^a-11^a Aulas:

Conceitos Básicos de Dispositivos Semicondutores

Na aula passada vimos:

- A junção pn em aberto, aprendemos como explicar o seu comportamento, distinguindo a corrente de difusão e a corrente de deriva. Aprendemos a calcular a barreira de potencial e a largura da região de depleção**
- A junção pn reversamente polarizada. Vimos que intensificamos a barreira de potencial interna (E_i) e que passa a fluir uma corrente I_s devido a deriva. Calculamos a carga da região de depleção em função da tensão reversa aplicada e determinamos a chamada capacitância de depleção, colocando-a em nosso modelo de diodo**
- Nesta aula vamos nos dedicar a entender a junção quando polarizada diretamente, calculando uma outra capacitância importante.**

11^a Aula:

A junção pn Diretamente polarizada

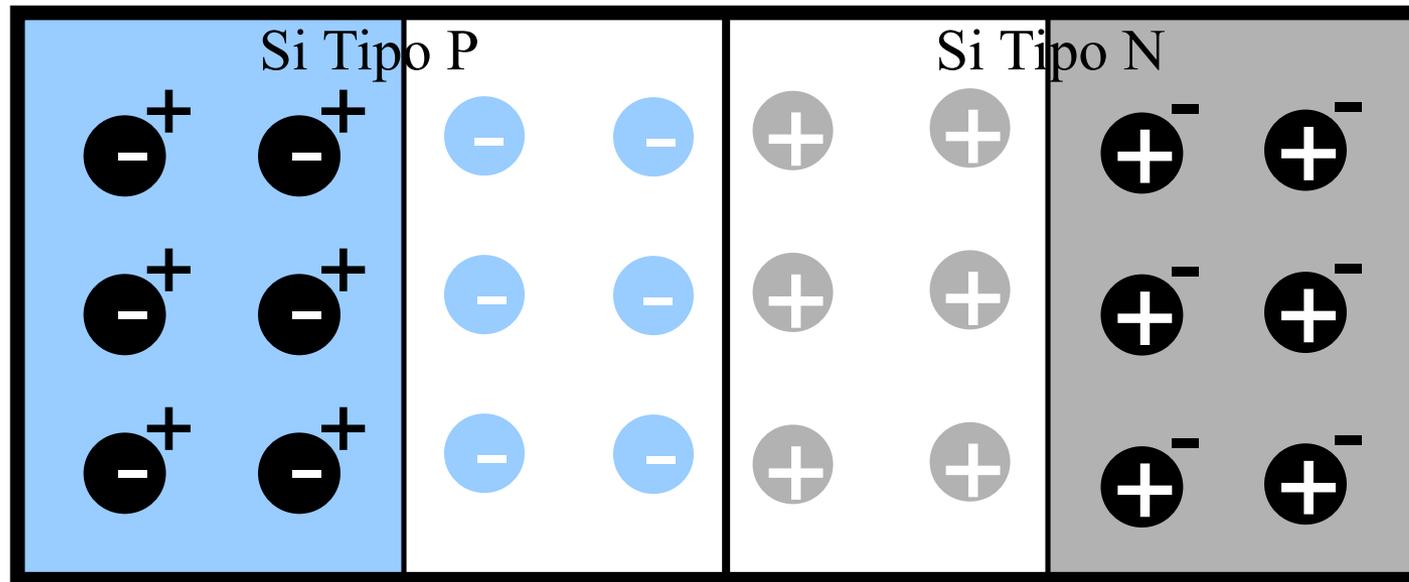
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Olhar a Lei de Ohm do lado de dentro do material, explicando os conceitos de condutividade e mobilidade**
- Explicar, através de conceitos e equações, o que é corrente de deriva e o que é corrente de difusão**
- Explicar o que é silício intrínseco e silício dopado (tipo n e tipo p)**
- Calcular a concentração de portadores em silício tipo n e tipo p**
- Explicar o que ocorre quando se junta um silício tipo n e um p , criando um diodo semiconductor**
- Calcular a barreira de potencial interna e a largura da região de depleção em um diodo semiconductor**

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

$$I_{T_{der}} = I_S = I_{p_{der}} + I_{n_{der}} \quad \longleftrightarrow \quad I_{T_{dif}} = I_D = I_{p_{dif}} + I_{n_{dif}}$$

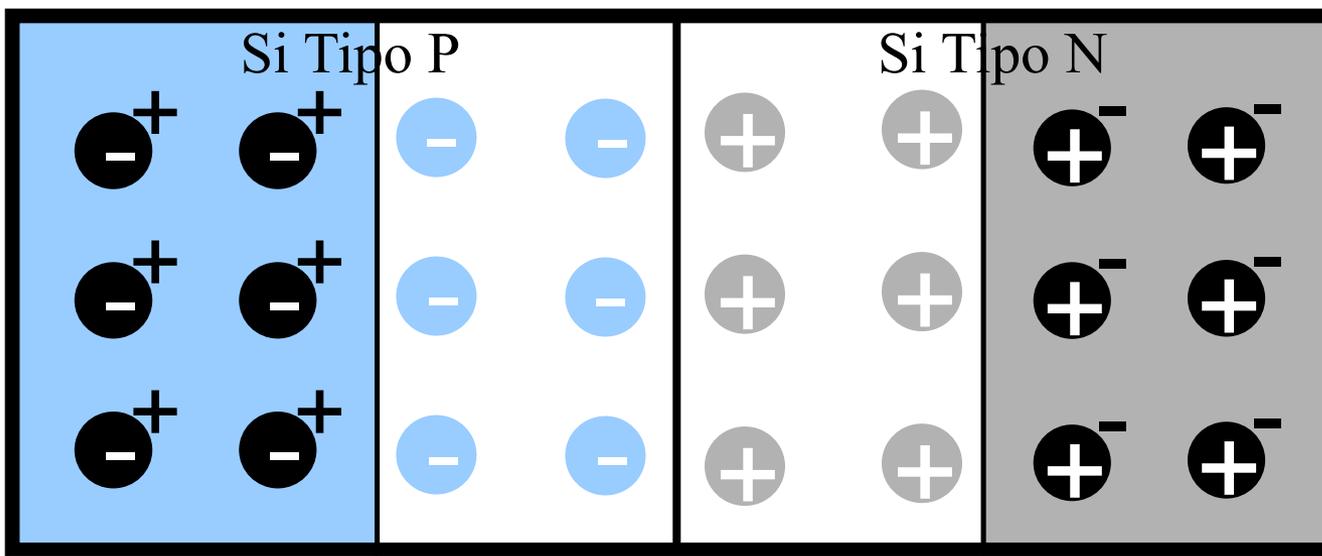


$$|I_{T_{dif}}| = |I_{T_{der}}|$$

$$\text{ou } I_D = I_S$$

Região de Depleção

E_i : campo elétrico interno de equilíbrio



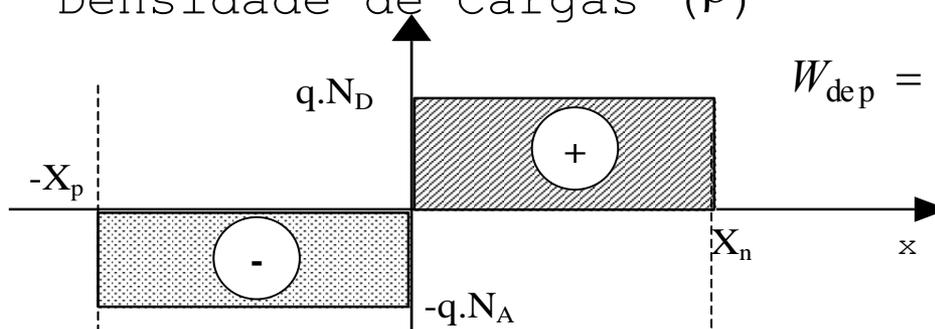
$$qx_p N_A A = qx_n N_D A$$

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

Região de Depleção

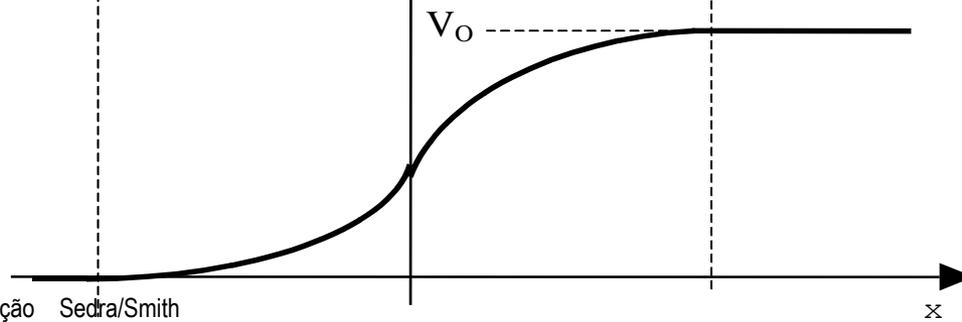
\vec{E}_i

Densidade de Cargas (ρ)



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

Potencial Elétrico (V)



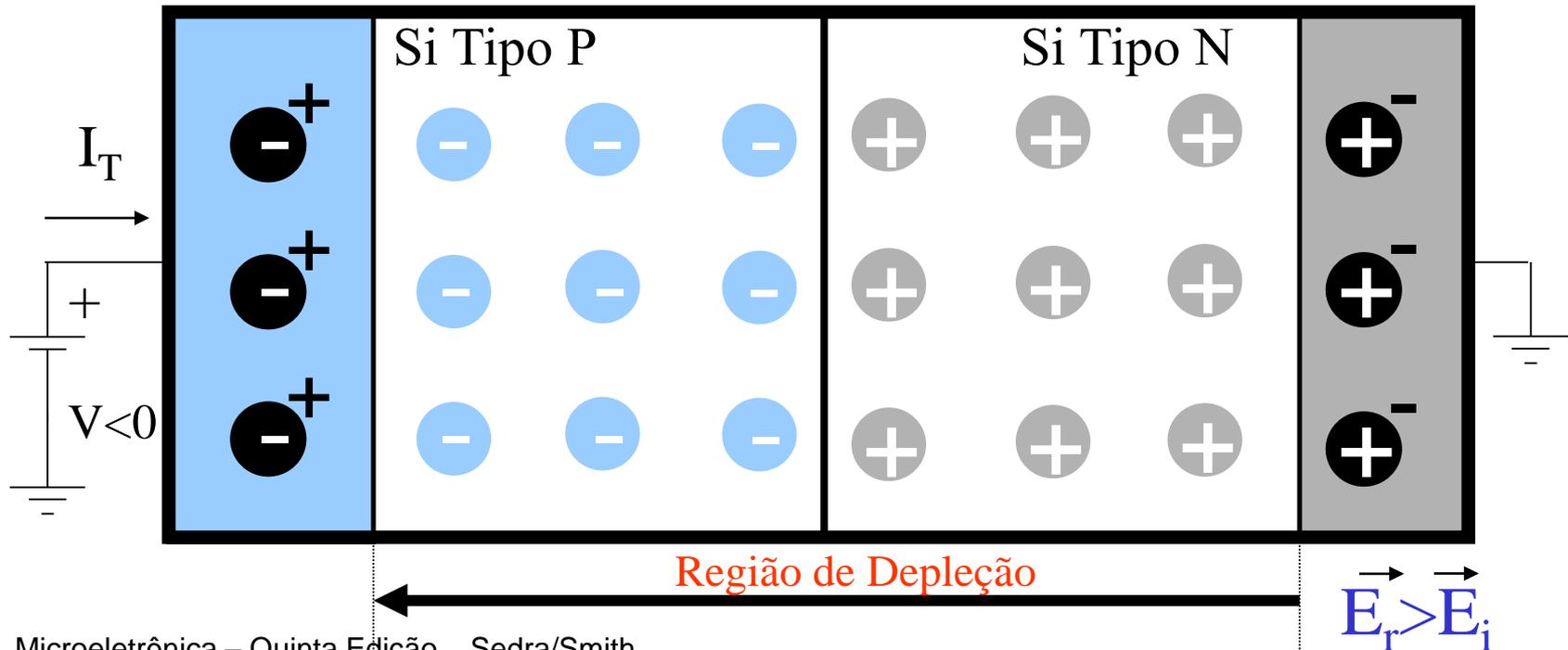
$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

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

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

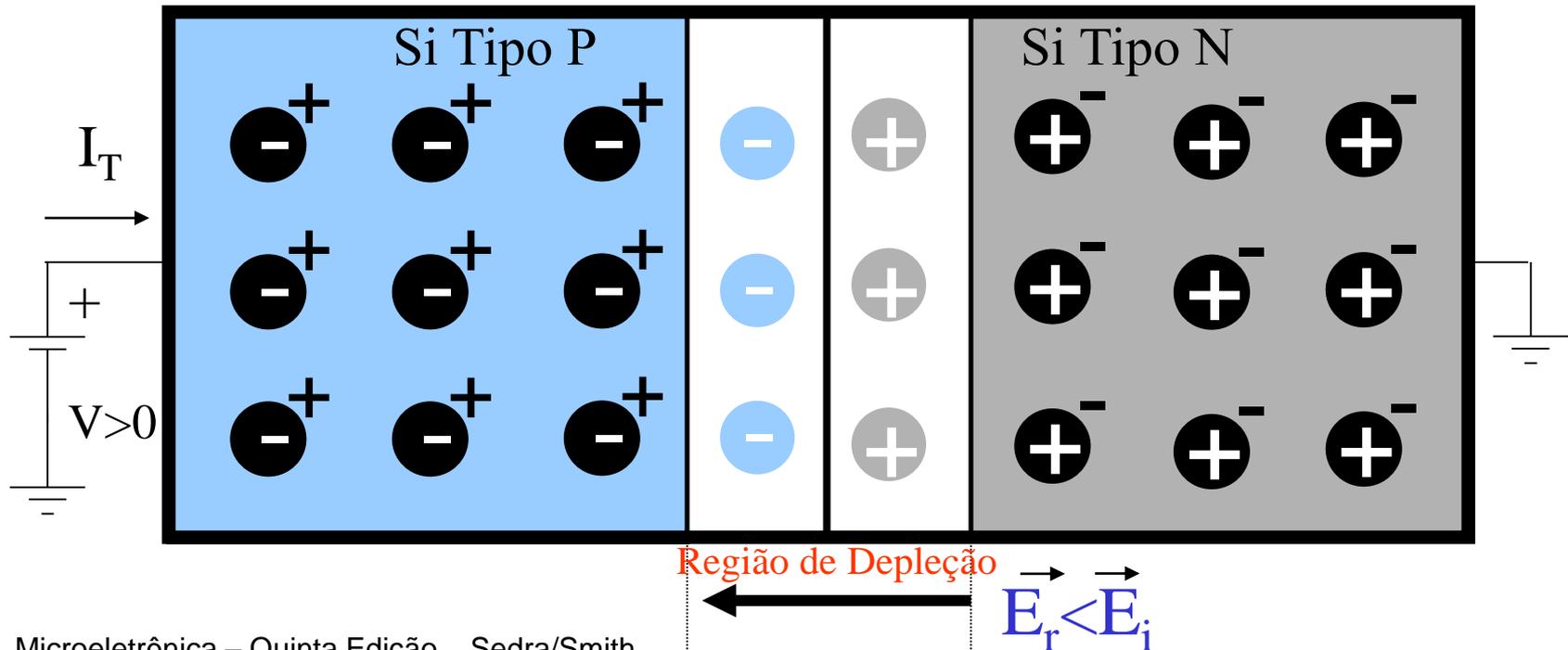
$$I_{T\ der} = I_S = I_{p\ der} + I_{n\ der} \quad \leftarrow \dots \rightarrow \quad I_{T\ dif} = I_D = I_{p\ dif} + I_{n\ dif}$$



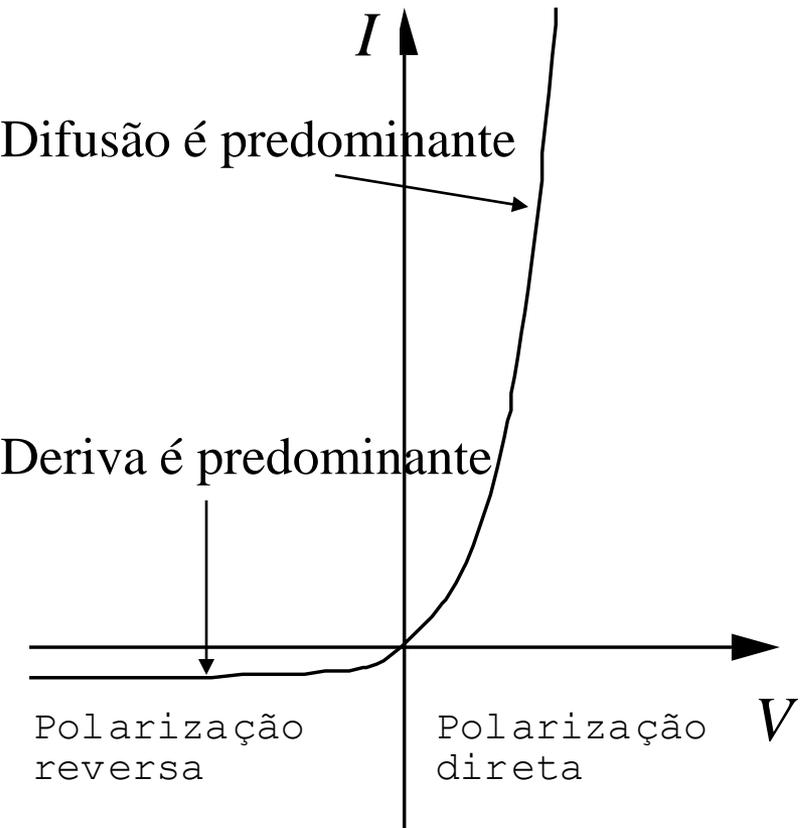
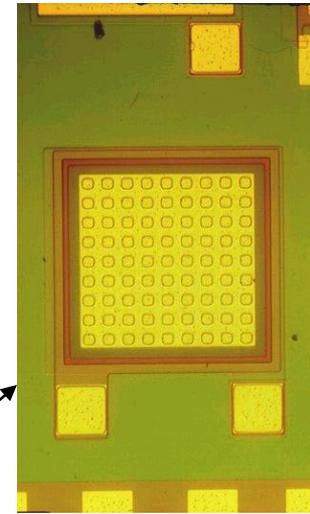
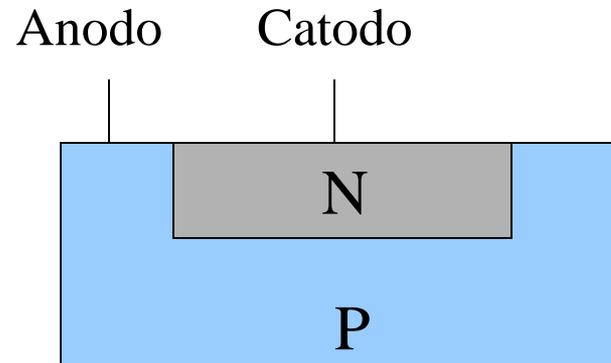
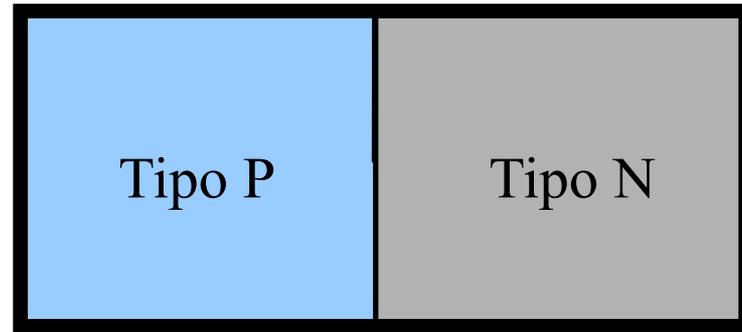
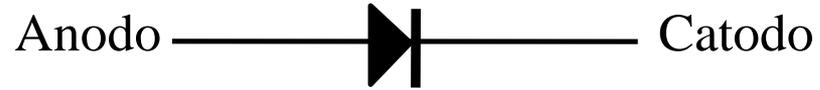
JUNÇÃO PN polarizada diretamente (Modelo de cargas)

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: $I_T = I_{T dif} + I_{T der} > 0$ (ou $I_D > I_S$)

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



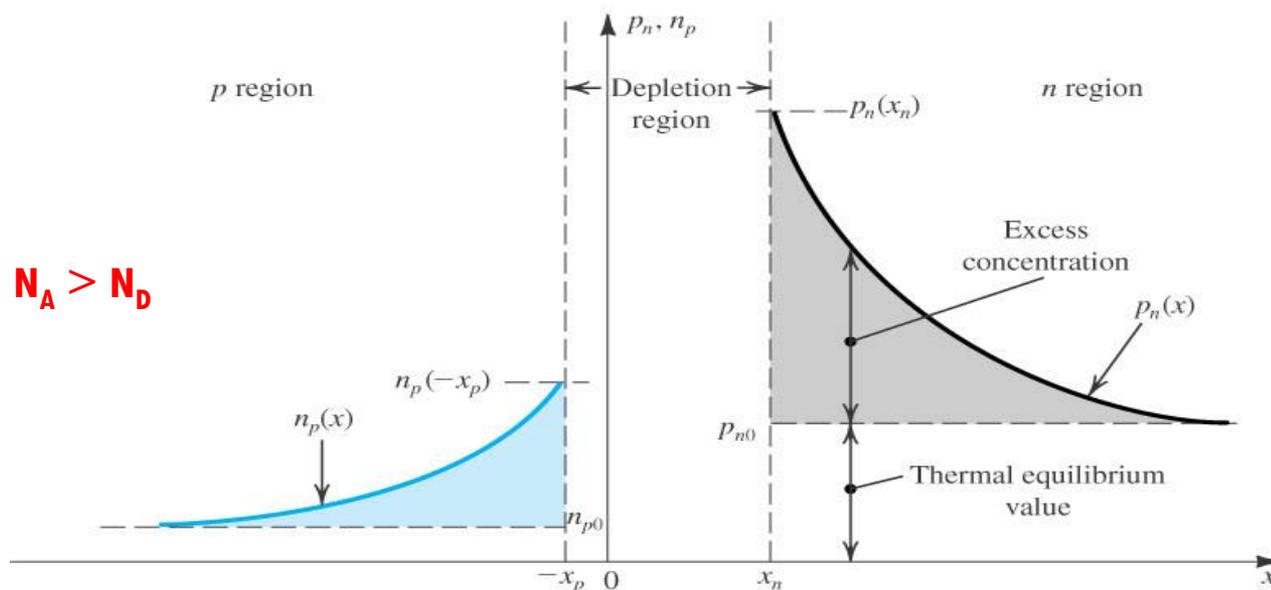
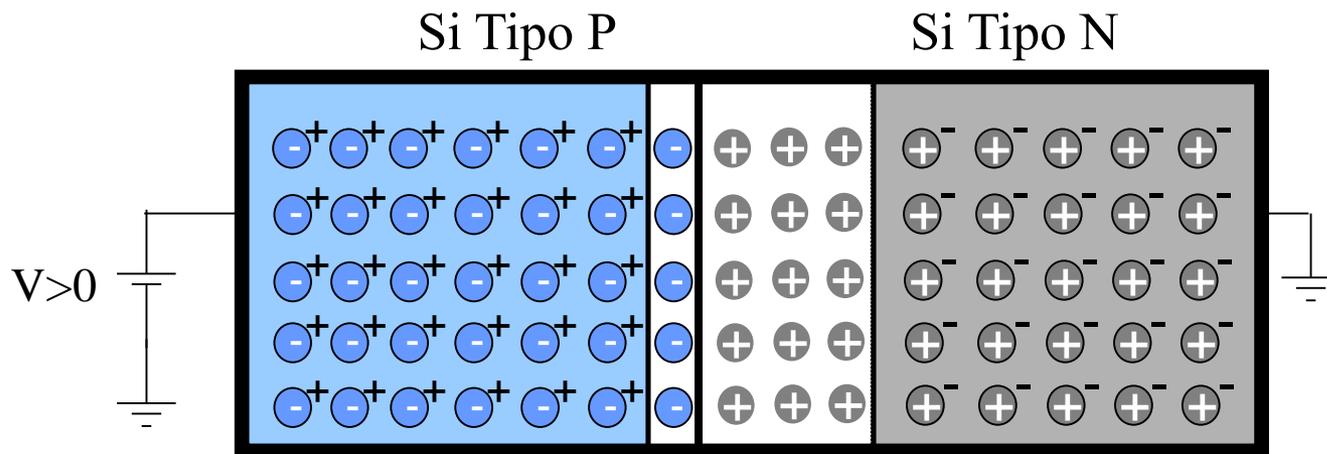
Diodo Semicondutor (Junção PN)



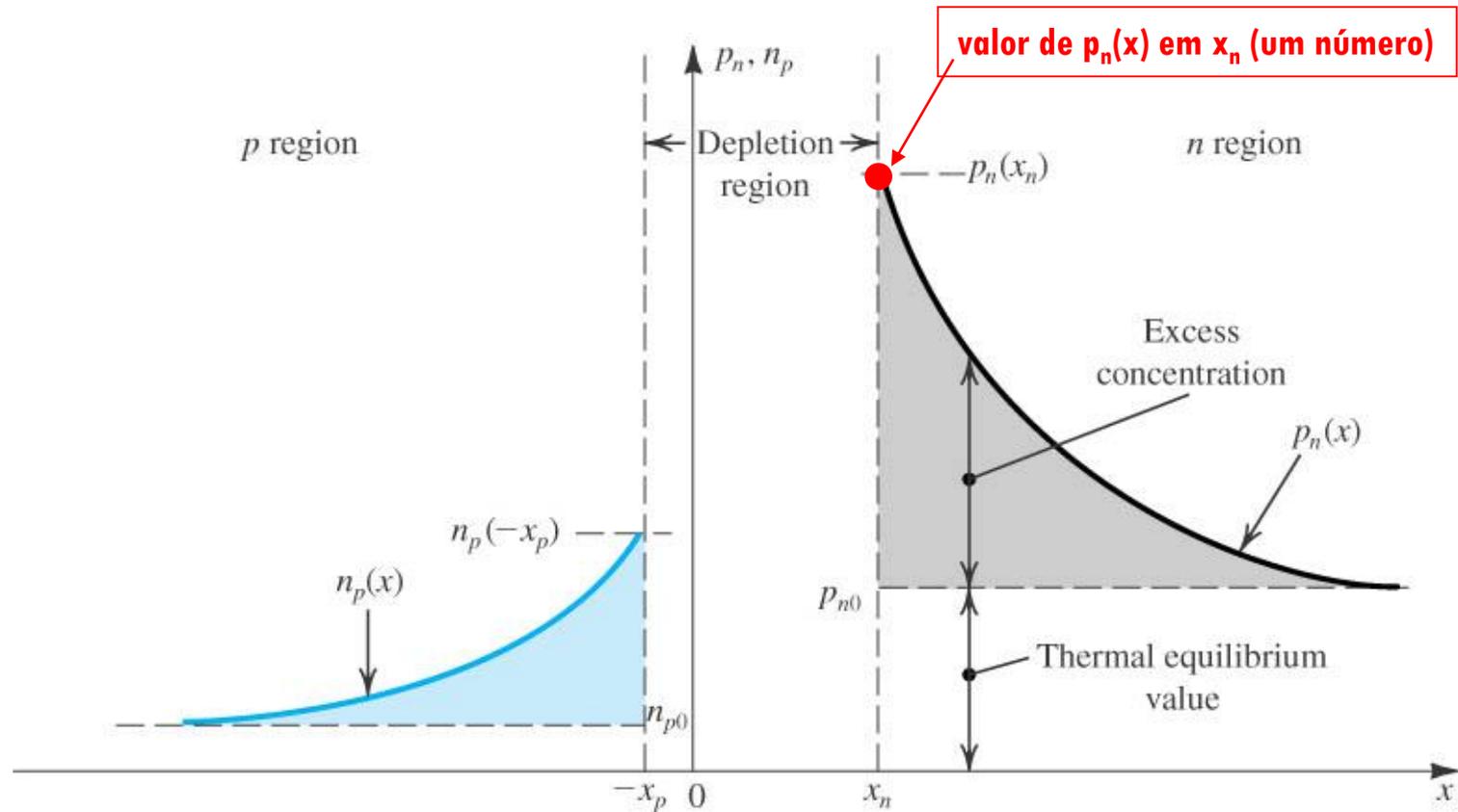
$$I = I_S (e^{V/nV_T} - 1)$$

Foto de um diodo construído na EPUSP

Distribuição de Portadores Minoritários na Junção PN Diretamente Polarizada



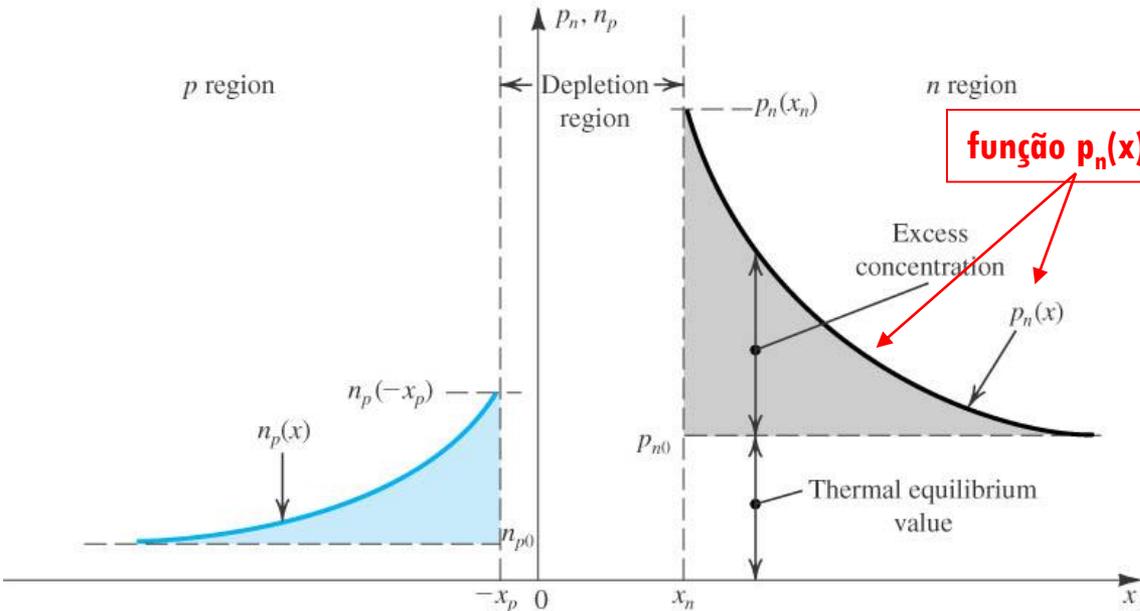
O Diodo Polarizado Diretamente



$p_n(x_n)$, da física de semicondutores, é igual a:

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

O Diodo Polarizado Diretamente



$p_n(x)$?

- é uma queda exponencial com constante τ
- valor inicial = $p_n(x_n)$
- valor final = p_{n0}

De Cálculo: $p_n(x) = p_{nFINAL} + [p_{nINICIAL} - p_{nFINAL}]e^{-(x-x_n)/\tau}$

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

comprimento de difusão

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

Tempo de vida (médio) dos portadores minoritários (no caso lacunas)

O Diodo Polarizado Diretamente

$$\begin{aligned} J_p &= D_p \frac{\partial p_n(x)}{\partial x} \\ &= D_p \frac{\partial \left\{ p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}] e^{-(x-x_n)/L_p} \right\}}{\partial x} \\ &= q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p} \end{aligned}$$

válido do lado n, fora da região de depleção ($x \geq x_n$)

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

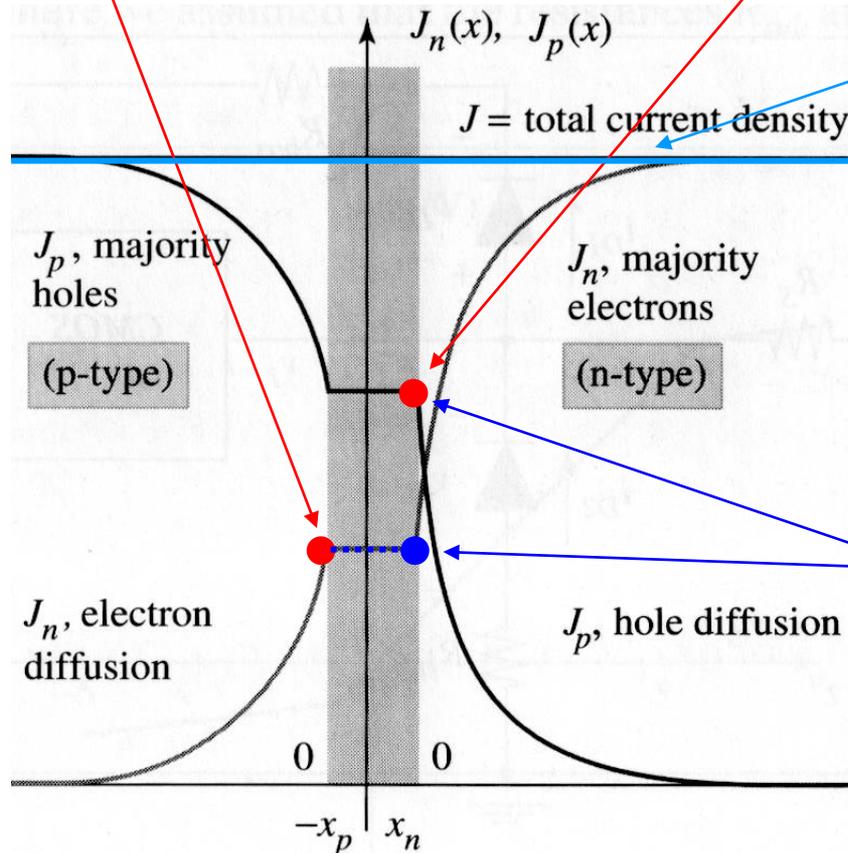
O Diodo Polarizado Diretamente

Em $x = -x_p$

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

...Em $x = x_n$

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



$$J_{\text{TOTAL}} = J_p + J_n \text{ (em qualquer ponto)}$$

Fora da região de depleção o campo elétrico é praticamente nulo, portanto tanto J_p como J_n são devidos apenas à parcela de difusão

Em $x = x_n$ podemos somar o valor J_p e J_n que determinamos pois J_n calculado em $-x_p$ é o mesmo em x_n pois na região de depleção não “perdemos” cargas

O Diodo Polarizado Diretamente

$$\begin{aligned} \text{Logo } J_{TOTAL} &= J_p^{DIF} + J_n^{DIF} \\ &= q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (e^{V/V_T} - 1) \\ &= \left\{ q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right\} (e^{V/V_T} - 1) \end{aligned}$$

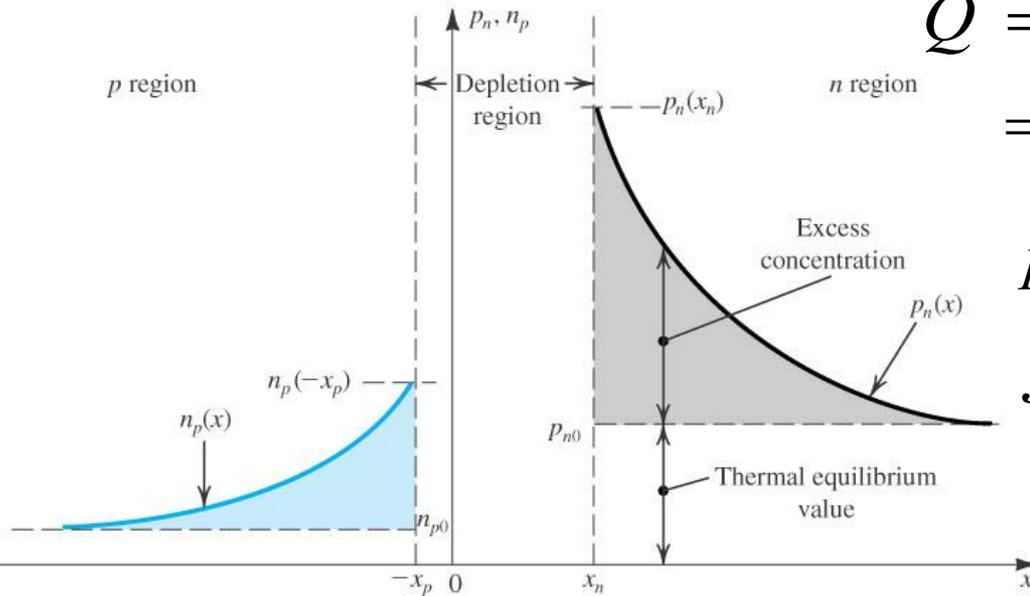
$$\text{Logo } I_{TOTAL} = A \left\{ q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right\} (e^{V/V_T} - 1)$$

$$\text{Logo } I_{TOTAL} = I_S (e^{V/V_T} - 1)$$

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

O Diodo Polarizado Diretamente

A Capacitância de Difusão



$$Q = Aq \times \text{área embaixo da exponencial } pn(x)$$

$$= Aq \times [p_n(x_n) - p_{n0}]L_p$$

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

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

$$Q_p = \frac{L_p^2}{D_p} I_p$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$$Q_p = \tau_p I_p$$

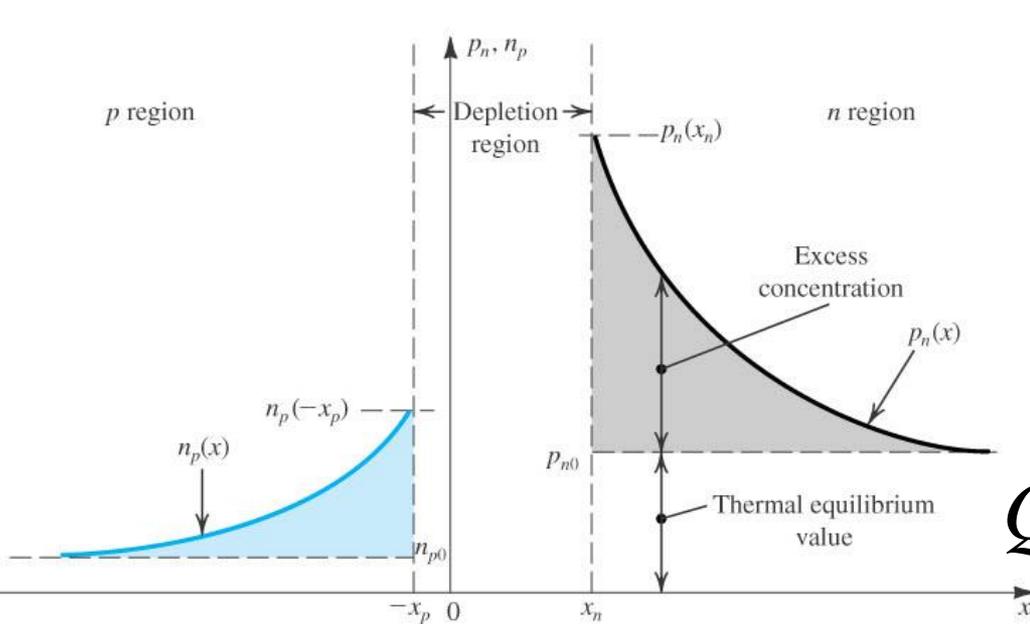
$$Q_n = \tau_n I_n$$

$$Q = \tau_p I_p + \tau_n I_n$$

$$Q = \tau_T I_D$$

O Diodo Polarizado Diretamente

A Capacitância de Difusão



$$Q_p = \frac{L_p^2}{D_p} I_p$$

$$Q_p = \tau_p I_p$$

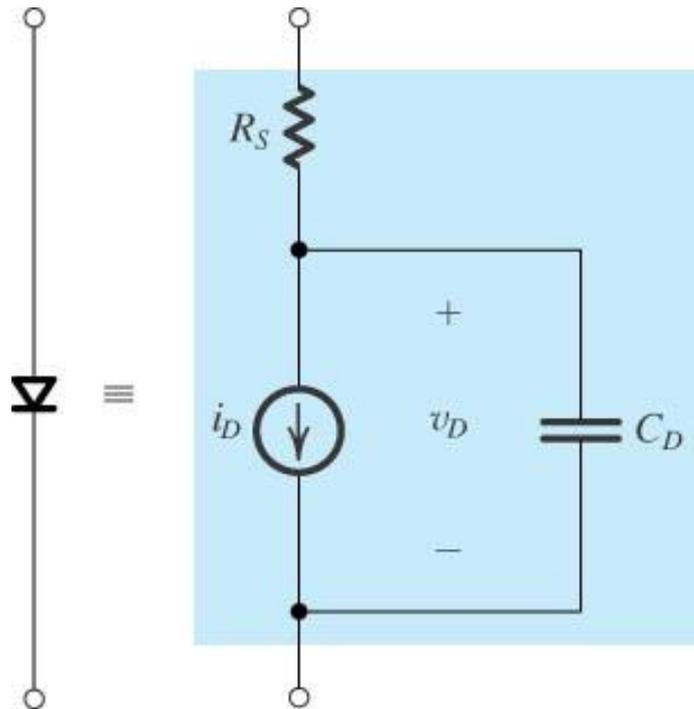
$$Q_n = \tau_n I_n$$

$$Q = \tau_p I_p + \tau_n I_n$$

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

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

O Modelo para o Diodo

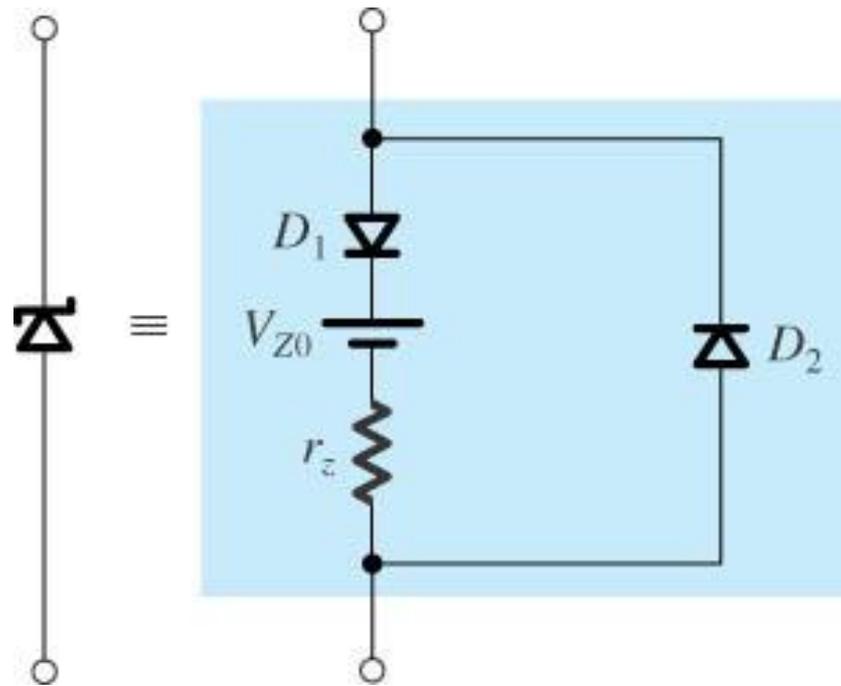


$$i_D = I_S (e^{v_D/nV_T} - 1)$$

$$C_D = C_d + C_j = \frac{\tau_T}{V_T} I_S e^{v_D/nV_T} + C_{j0} / \left(1 - \frac{v_D}{V_0}\right)^m$$

Figura 3.51 The SPICE diode model.

E para o Zener?



Exercício 3.34 (pg 128)

3.34 Um diodo tem $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$, $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$, $n_i = 1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$,
 $L_p = 5 \mu\text{m}$, $L_n = 10 \mu\text{m}$, $A = 2500 \mu\text{m}^2$, D_p (na região n) = $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, e D_n (na região p) = $18 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.
O diodo está diretamente polarizado e conduzindo uma corrente $I = 0,1 \text{ mA}$.

Calcule:

- (a) I_s
- (b) A tensão de polarização direta V
- (c) A componente da corrente devida à injeção de lacunas e aquela devida à injeção de elétrons através da junção
- (d) τ_p e τ_n
- (e) a carga Q_p do excesso de lacunas na região n e a carga Q_n do excesso de elétrons na região p ; e a carga total Q de portadores minoritários armazenada, e o tempo de trânsito τ_T
- (f) A capacitância de difusão.

Resp. (a) $2 \times 10^{-15} \text{ A}$; (b) $0,616 \text{ V}$; (c) $91,7 \mu\text{A}$, $8,3 \mu\text{A}$; (d) 25 ns , $55,6 \text{ ns}$;
(e) $2,29 \text{ pC}$, $0,46 \text{ pC}$, $2,75 \text{ pC}$, $27,5 \text{ pC}$; (f) 110 pF

18ª Aula: Exercícios