

Capítulo 2

Diodos semicondutores de potência

Diodos semicondutores de potência

1 - Introdução

Características:

- Chave **não controlada** diretamente (chaveamento depende do circuito)
- Maior capacidade de tensão reversa e corrente direta (quando comparados aos diodos de sinal)
- Menor velocidade de resposta



Diodos semicondutores de potência

2 – Curvas características dos diodos

Diodo de junção PN e seu símbolo

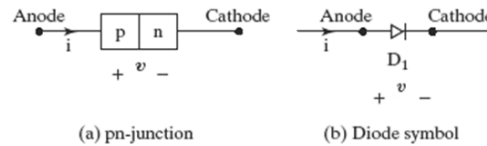


Fig. 2.1

Curva característica para polarização direta e reversa (curva estática)

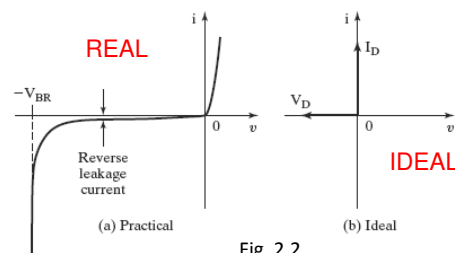


Fig. 2.2

Diodos semicondutores de potência

2 – Curvas características dos diodos

$v > 0 \rightarrow$ Polarização **direta** (pequena queda de tensão)

$v < 0 \rightarrow$ Polarização **reversa** (pequena corrente reversa (μA))

Pode ocorrer ruptura (Efeito zener ou avalanche) $\rightarrow v < -V_{ZK}$ ou $-V_{BR}$

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

$i_D \rightarrow$ corrente através do diodo

$v_D \rightarrow$ tensão do anodo em relação ao catodo

$I_S \rightarrow$ corrente de saturação reversa (10^{-6} a $10^{-15} A$)

$n \rightarrow$ fator de idealidade (entre 1 e 2)

$V_T \rightarrow$ tensão térmica: $V_T = kT/q$

$q \rightarrow$ carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19} C$)

$T \rightarrow$ temperatura em Kelvin

$k \rightarrow$ constante de Boltzman ($1,3806 \times 10^{-23} J/K$)

Para $T = 298K$ ($25^\circ C$) $\rightarrow V_T \approx 25,8mV$

Diodos semicondutores de potência

2 – Curvas características dos diodos

a) Região de polarização direta ($v_D > 0$):

Seja V_{TD} a **tensão de limiar** (*threshold, cut-in, turn-on*) de aproximadamente 0,7V para diodo de silício. Também se utiliza o símbolo V_γ (tensão de joelho)

- Para $v_D < V_{TD} \rightarrow i_D$ é pequena (desprezível)
- Para $v_D > V_{TD} \rightarrow$ diodo em condução plena

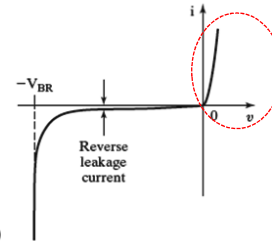
Ex:

Para $v_D = 0,1V$, $n = 1$ e $V_T = 25,8mV$
 $i_D = I_S(48,23-1) \approx 48,23I_S$ (erro de 2,1%)

Para $v_D > 0,1V \rightarrow i_D \gg I_S$, logo

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

com erro **menor** que 2,1%.



Diodos semicondutores de potência

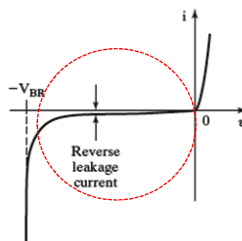
2 – Curvas características dos diodos

b) Região de polarização reversa ($v_D < 0$):

Para $|v_D| \gg V_T$, que ocorre para $v_D < -0,1V$, tem-se

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

onde I_S é a corrente de saturação reversa.



Diodos semicondutores de potência

2 – Curvas características dos diodos

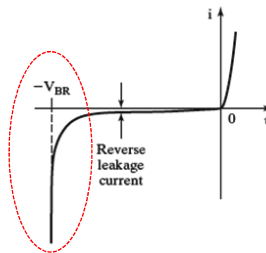
c) Região de ruptura (reversa):

Para tensão reversa muito alta (normalmente $> 1000\text{V}$)

$$v_D < -V_{BR} \text{ (break-down voltage)}$$

ocorre condução plena com corrente muito sensível à tensão.

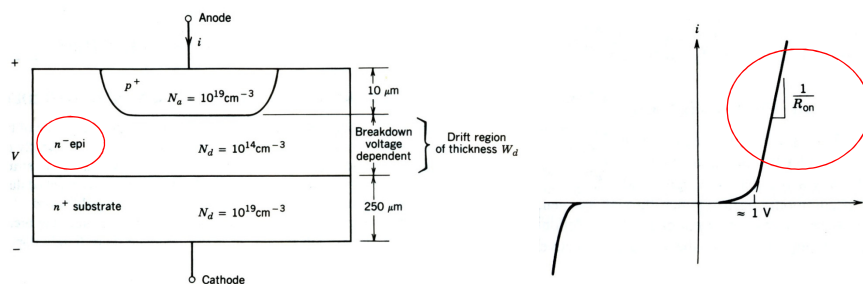
Essa operação não é destrutiva se a limitação de corrente (pelo circuito externo ao diodo) não causar dissipação de potência no diodo além de certo limite especificado.



Diodos semicondutores de potência

2 – Curvas características dos diodos

Comparação com o diodo de sinal



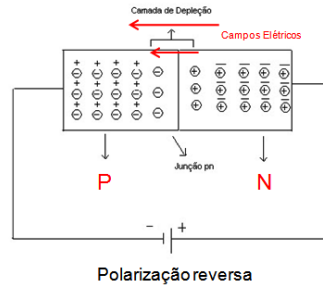
Diferenças básicas em relação ao diodo de sinal:

- Tem-se a camada n^-
- A região de depleção no lado n fica confinada na região n^-
- A tensão de *break down* depende da dopagem da região n^-
- Para polarização direta com alta corrente uma resistência ôhmica mascara a curva exponencial



Diodos semicondutores de potência

3 – Curvas características de recuperação reversa

**Diodo polarizado diretamente:**

- Corrente devida aos portadores minoritários injetados em ambos os lados da junção

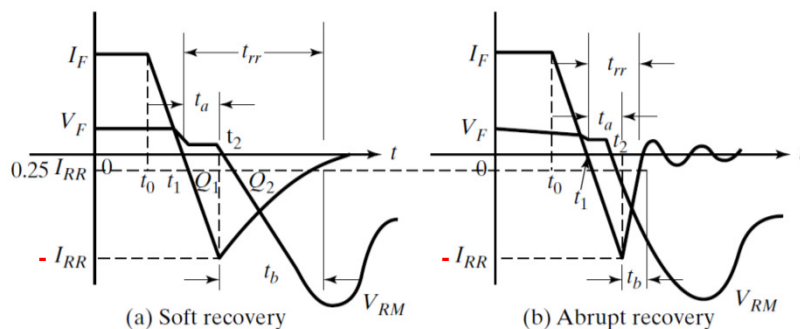
Ao se reverter a polarização:

- As regiões devem ser descarregadas de seus portadores minoritários (isso leva um certo tempo) → Tempo de recuperação reversa



Diodos semicondutores de potência

3 – Curvas características de recuperação reversa

Tempo de recuperação reversa

Normalmente
 $t_a \gg t_b$

$t_{rr} \rightarrow$ de 0 a 25% de I_{RR}

$t_a \rightarrow$ armazenamento de cargas na região depleção

$t_b \rightarrow$ armazenamento de cargas no material semicondutor

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

Fator de suavidade (softness factor):

$$SF = t_b / t_a$$



Diodos semicondutores de potência

3 – Curvas características de recuperação reversa

Pela figura tem-se pico de corrente:

$$I_{RR} = t_a \left| \frac{di}{dt} \right|$$

t_{rr} depende da:

- temperatura da junção
- taxa de decaimento da corrente direta
- corrente direta antes da comutação (I_F).



Diodos semicondutores de potência

3 – Curvas características de recuperação reversa

Carga de recuperação reversa: Q_{RR} (carga armazenada depende de I_F)

$$Q_{RR} \cong \frac{1}{2} I_{RR} t_a + \frac{1}{2} I_{RR} t_b = \frac{1}{2} I_{RR} t_{rr} \longrightarrow I_{RR} = \frac{2Q_{RR}}{t_{rr}}$$

$$t_a \left| \frac{di}{dt} \right| = \frac{2Q_{RR}}{t_{rr}} \longrightarrow t_a t_{rr} = \frac{2Q_{RR}}{\left| \frac{di}{dt} \right|}$$

Se $t_b \ll t_a \rightarrow t_{rr} \approx t_a$

$$\boxed{t_{rr}} = \sqrt{\frac{2Q_{RR}}{\left| \frac{di}{dt} \right|}} \quad I_{RR} = \sqrt{2Q_{RR} \left| \frac{di}{dt} \right|}$$

Obs. I_{RR} , Q_{RR} e SF : especificações do fabricante



Diodos semicondutores de potência

3 – Curvas características de recuperação reversa

Ex: No caso da recuperação reversa:

Se $t_{rr} = 3 \mu\text{seg}$ e $|di/dt| = 30 \text{ A}/\mu\text{seg}$, $Q_{RR} = 135 \mu\text{C}$ e $I_{RR} = 90 \text{ A}$

Enquanto o diodo está **reversamente polarizado** tem-se a **corrente de fuga**.

- Obs. Esta corrente depende de portadores minoritários gerados (termicamente) na região de depleção e fugas, propriamente ditas.

Ao passar para a **polarização direta** surge o **tempo de recuperação direta** (*forward recovery time*):

- devido ao processo de difusão dos portadores minoritários
- a taxa de crescimento da corrente deve ser limitada, para não danificar o diodo.



Diodos semicondutores de potência

4 - Tipos de diodos de potência

Diodos **padrão** ou **genéricos**

- Usados em retificadores e conversores de baixa frequência (até 1kHz)
- t_{rr} da ordem de 25 μs
- Correntes de 1A a milhares de amperes e tensão reversa de 50V a 5kV

Diodos de recuperação **rápida**

- t_{rr} baixo, da ordem de 5 μs
- Corrente de 1A a centenas de amperes e tensão reversa de 50V a 3kV.

Diodos **Schottky**

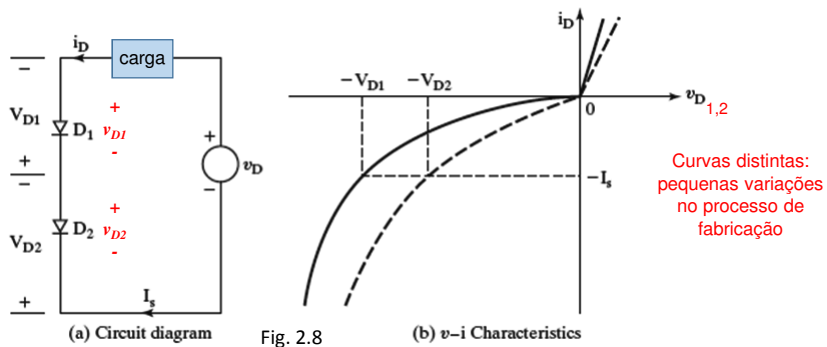
- Com junção metal-semicondutor
- Corrente devido a portadores majoritários
- Tem apenas um efeito capacitivo próprio
- Queda de tensão no sentido direto pequena
- Maior corrente de fuga
- Tensão reversa até 100V e correntes de 1 a 300A



Diodos semicondutores de potência

6 - Diodos conectados em série – polarização reversa

Necessidade: aumentar a capacidade de tensão de bloqueio reverso.



Polarização direta:

D_1 e D_2 c/ as mesmas correntes diretas (tensões diretas quase iguais)

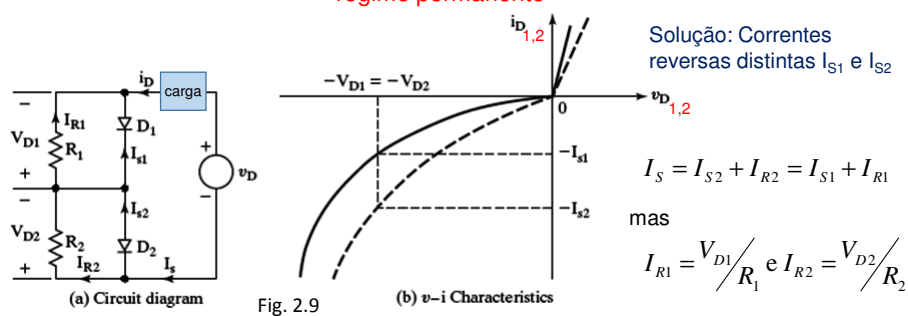
Polarização reversa:

D_1 e D_2 c/ as mesmas correntes de fuga ($-I_S$), mas c/ grandes diferenças nas tensões de bloqueio (V_{D1} e V_{D2})



Diodos semicondutores de potência

Diodos conectados em série – com correção em regime permanente



$$\rightarrow I_{S1} + V_{D1}/R_1 = I_{S2} + V_{D2}/R_2$$

$$\text{Se } R_1 = R_2 = R \begin{cases} I_{S1} + V_{D1}/R = I_{S2} + V_{D2}/R \\ V_{D1} + V_{D2} = V_D \end{cases}$$

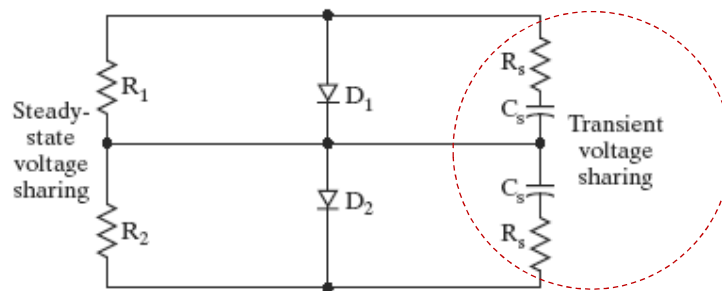
Obs. Faz-se com que I_{R1} e $I_{R2} \gg$ que I_{S1} e I_{S2} ($\approx I_S$ dos diodos), respectivamente.

Tem-se ligeiramente: $V_{D1} \cong V_{D2}$



Diodos semicondutores de potência

Diodos conectados em série – com correção em regime permanente e transitório



Para divisão de tensão em condições transitórias.

$R_s \rightarrow$ limita a taxa de crescimento da tensão de bloqueio.

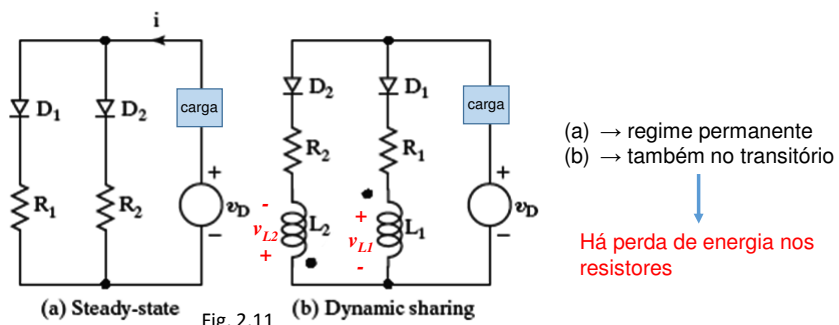
Fig. 2.10



Diodos semicondutores de potência

Diodos conectados em paralelo

Necessidade: aumentar a capacidade de corrente direta.



$$\text{Se } i_{D1} \uparrow \Rightarrow L \frac{di_{D1}}{dt} \uparrow \Rightarrow V_{L1} \uparrow \Rightarrow V_{L2} \uparrow \text{ (em sentido oposto)} \Rightarrow i_{R2} \uparrow \Rightarrow i_{D1} \downarrow$$



Diodos semicondutores de potência

Modelo do diodo no SPICE

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

Temos uma fonte de corrente controlada por tensão.

- R_S : Resistência do material
- C_D : Capacitância (depleção e difusão)
- R_D : resistência incremental

Fig. 2.12

