

Aula 2: Diodos de Potência

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Conteúdo

Aula	Conteúdo
Aula 1	Conceitos Básicos de Semicondutores
Aula 2	Diodos de potência
Aula 3	Associação de diodos e circuitos RLC chaveados
Aula 4	Retificadores a diodos
Aula 5	Transistores de potência - parte 1
Aula 6	Transistores de potência - parte 2
Aula 7	Conversores c.c./c.c.
Aula 8	Tiristores
Aula 9	Retificadores controlados
Aula 10	Conversores c.c./c.a.
Aula 11	Conversores c.a./c.a.
Aula 12	Conversores ressonantes

Sumário

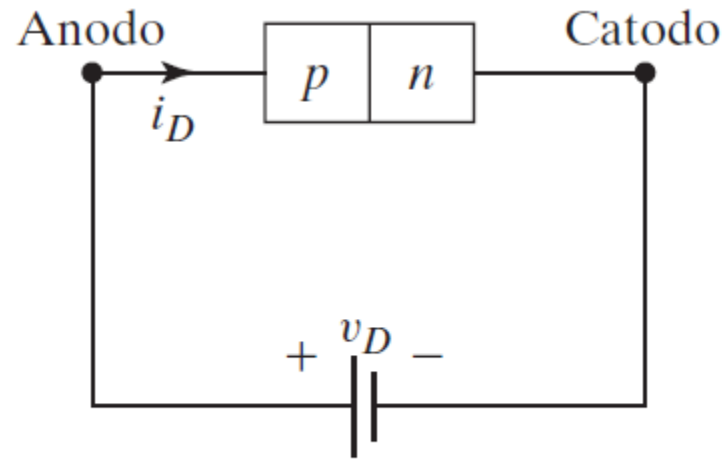
- Diodos de junção PN;
- Características básicas;
- Exemplo de um datasheet.



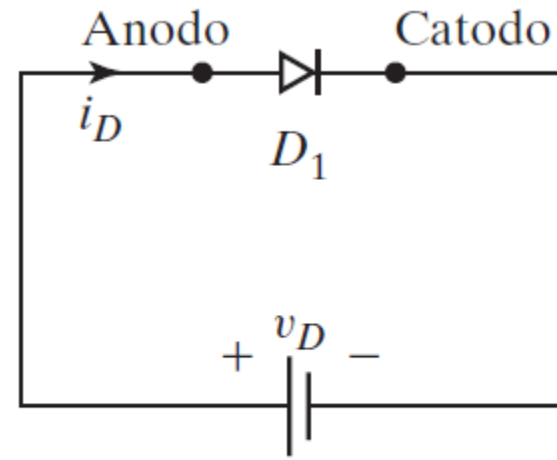
Diodos de junção PN



Diodo PN: Funcionamento básico



(a) *Junção pn*

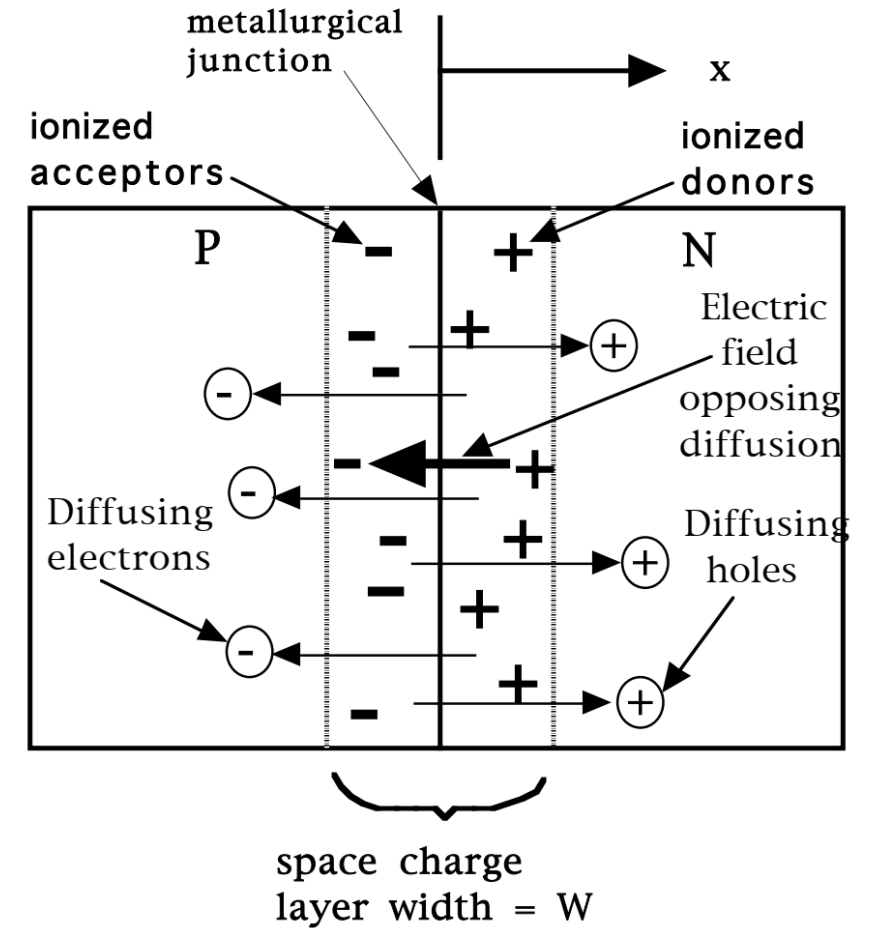


(b) *Símbolo do diodo*

Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

Formação da região de depleção

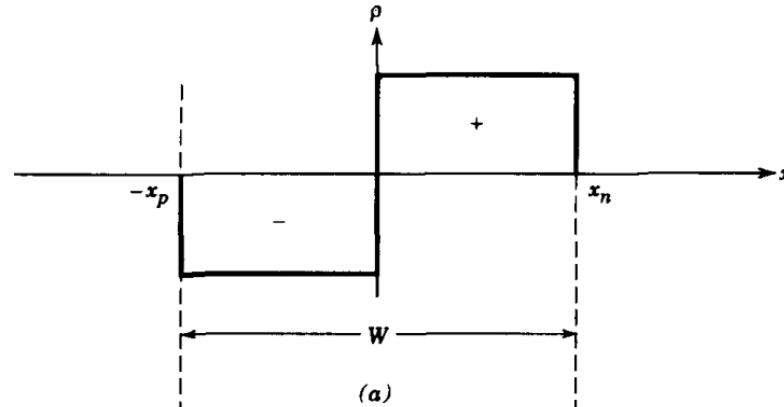
- ❑ Fluxo de elétrons e lacunas por difusão;
- ❑ Impurezas ionizadas formam a zona de depleção;
- ❑ O campo elétrico gerado pela zona de depleção se opõe a difusão
- ❑ Regime permanente: Deriva anula difusão!



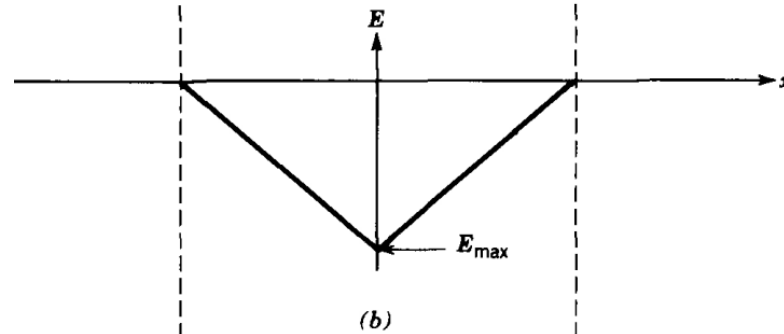
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Barreira de potencial – Junção PN abrupta

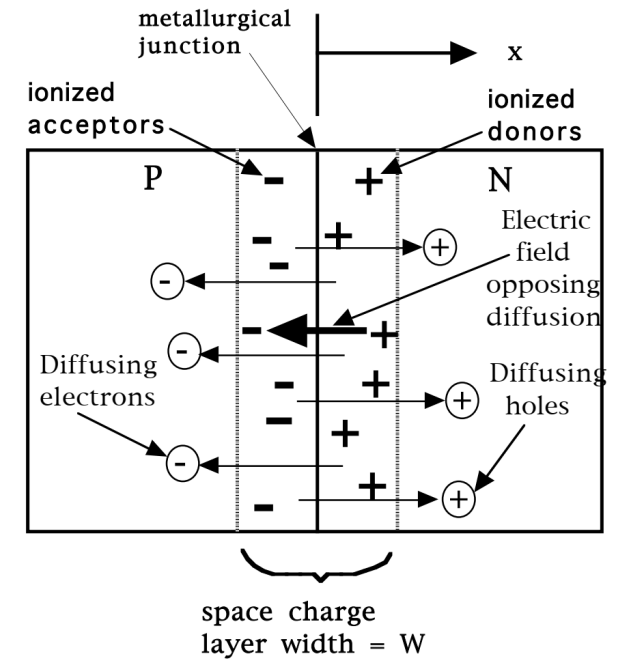
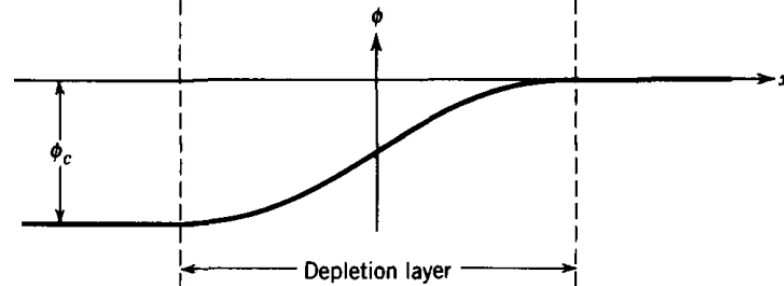
□ Distribuição de carga elétrica



□ Distribuição de campo elétrico

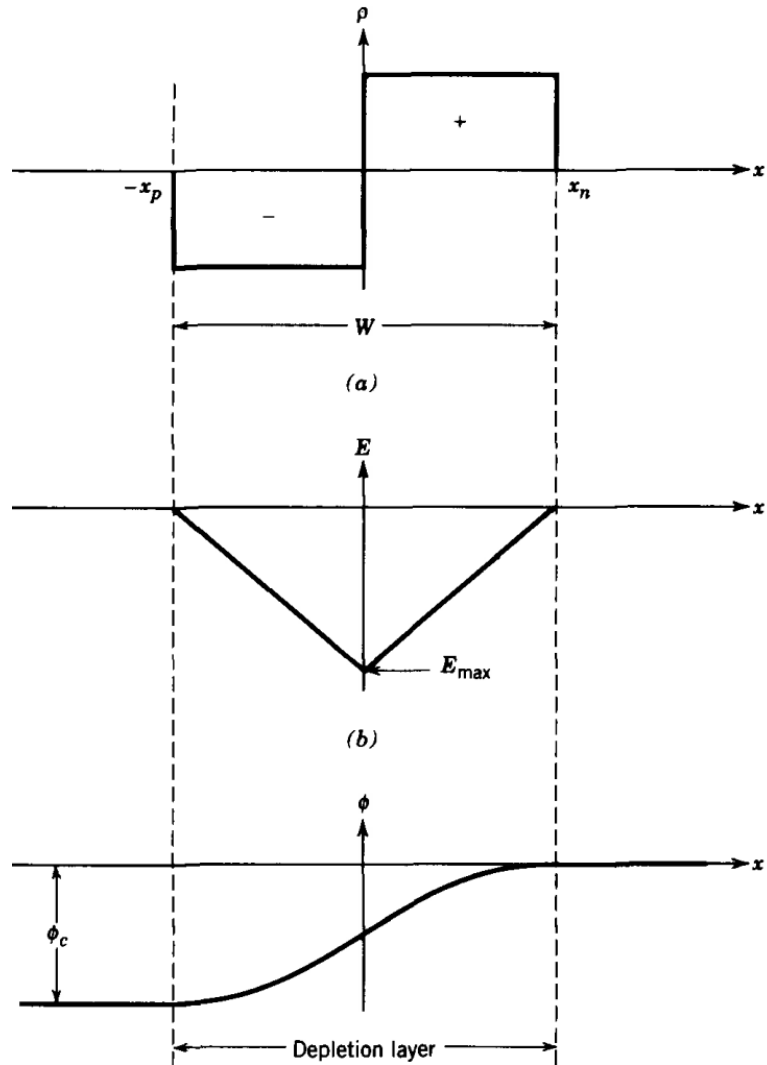


□ Distribuição de potencial elétrico



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Barreira de potencial



□ Equação de Poisson

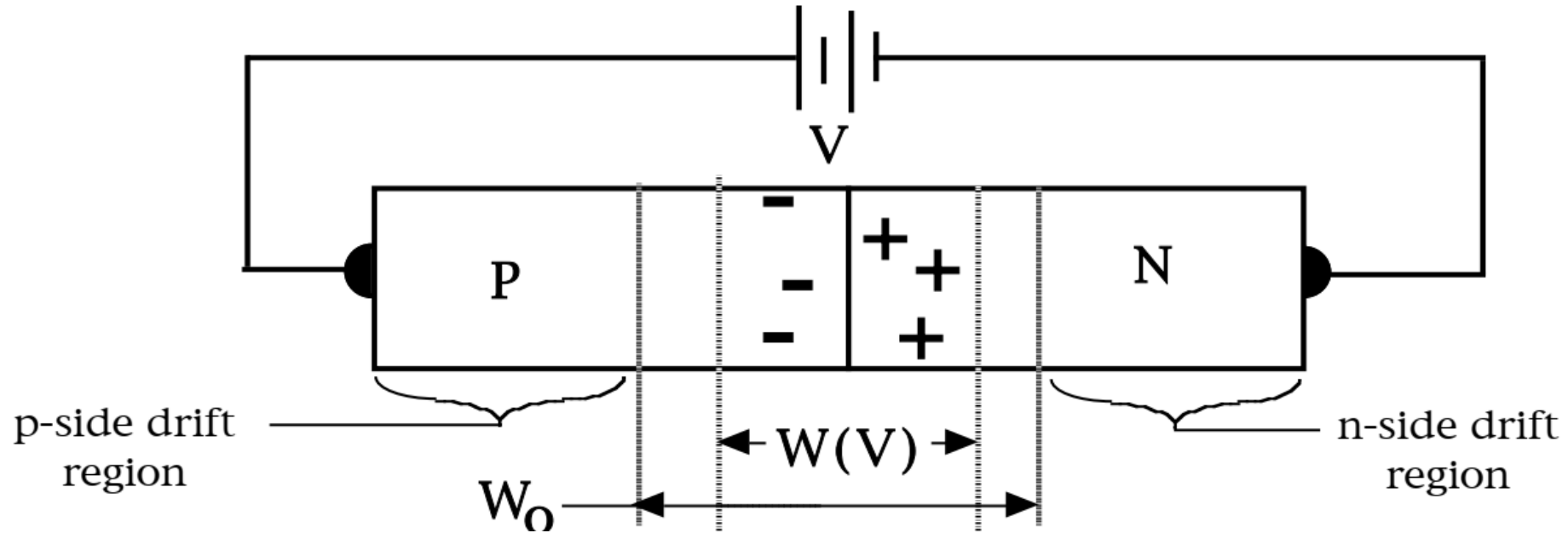
$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{Q(x)}{\epsilon_S} = -\frac{qN_D}{\epsilon_S}$$

□ Largura da região de depleção

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\phi_c(N_a + N_d)}{qN_aN_d}}$$

Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Junção com polarização direta ($V > 0$)



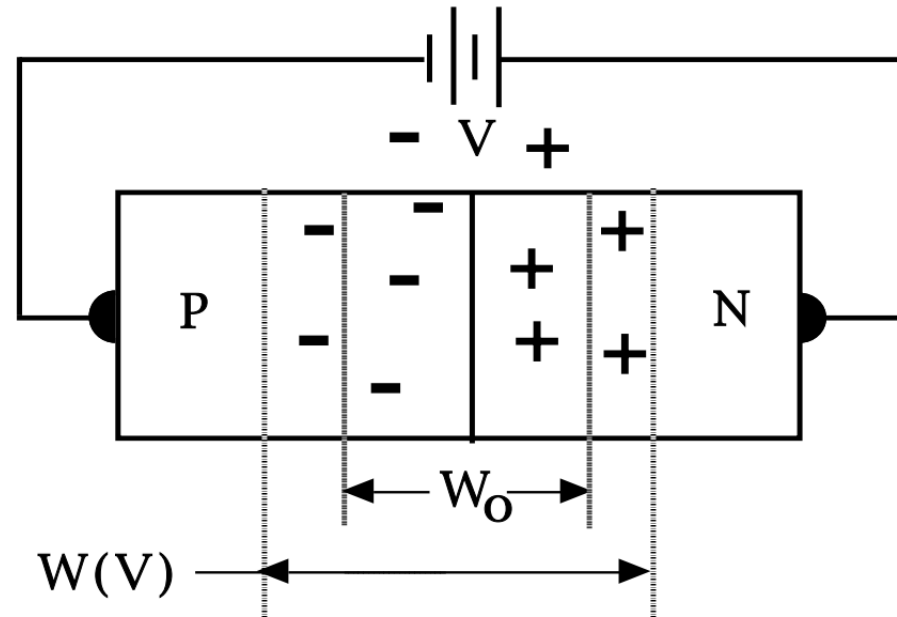
$$W(V) = W_0 \sqrt{1 - \frac{V}{\phi_c}}$$

$$E_{max} = \frac{2\phi_c}{W_0} \sqrt{1 - \frac{V}{\phi_c}}$$

❑ Por que a região de depleção diminui quando diretamente polarizada?

Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Junção com polarização reversa ($V < 0$)



$$W(V) = W_0 \sqrt{1 + \frac{V}{\phi_c}}$$

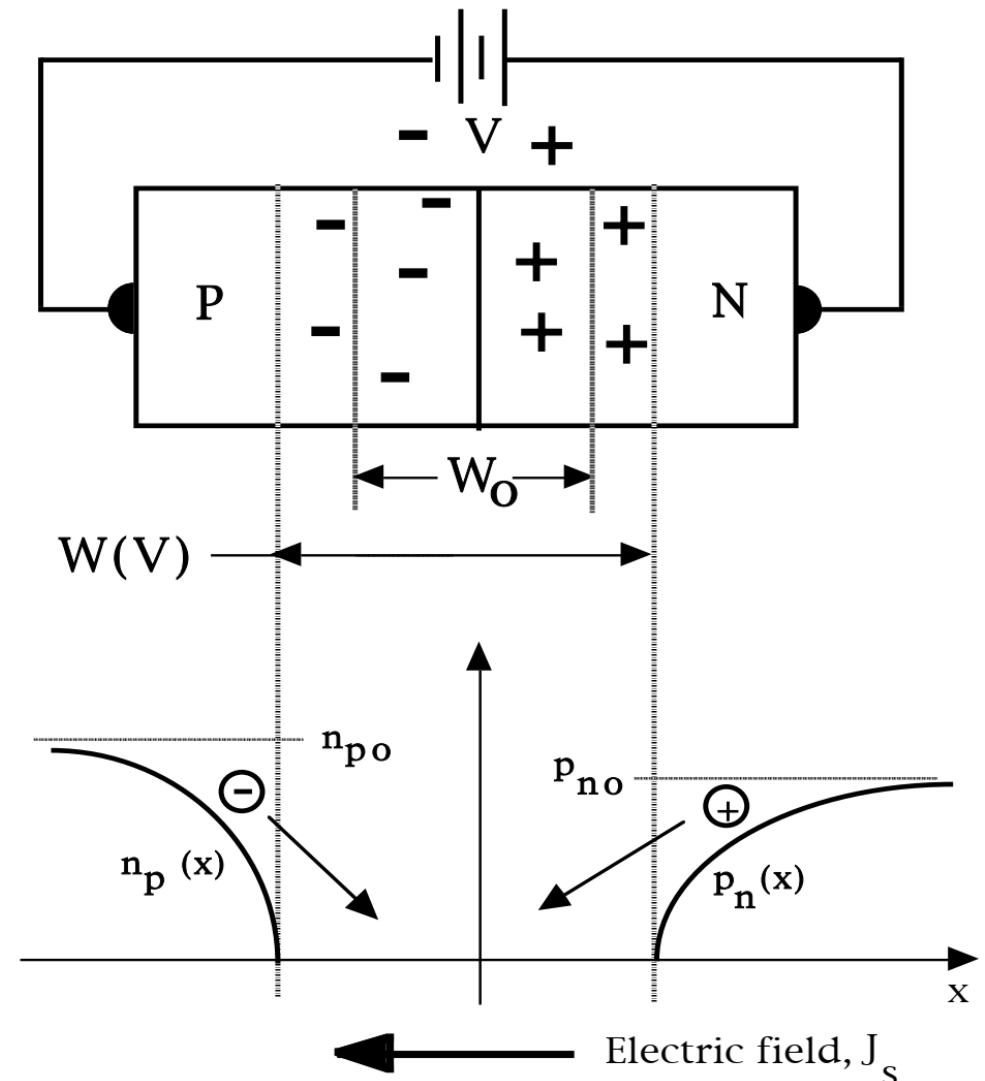
$$E_{max} = \frac{2\phi_c}{W_0} \sqrt{1 + \frac{V}{\phi_c}}$$

❑ Por que a região de depleção aumenta quando reversamente polarizada?

Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Corrente de saturação reversa

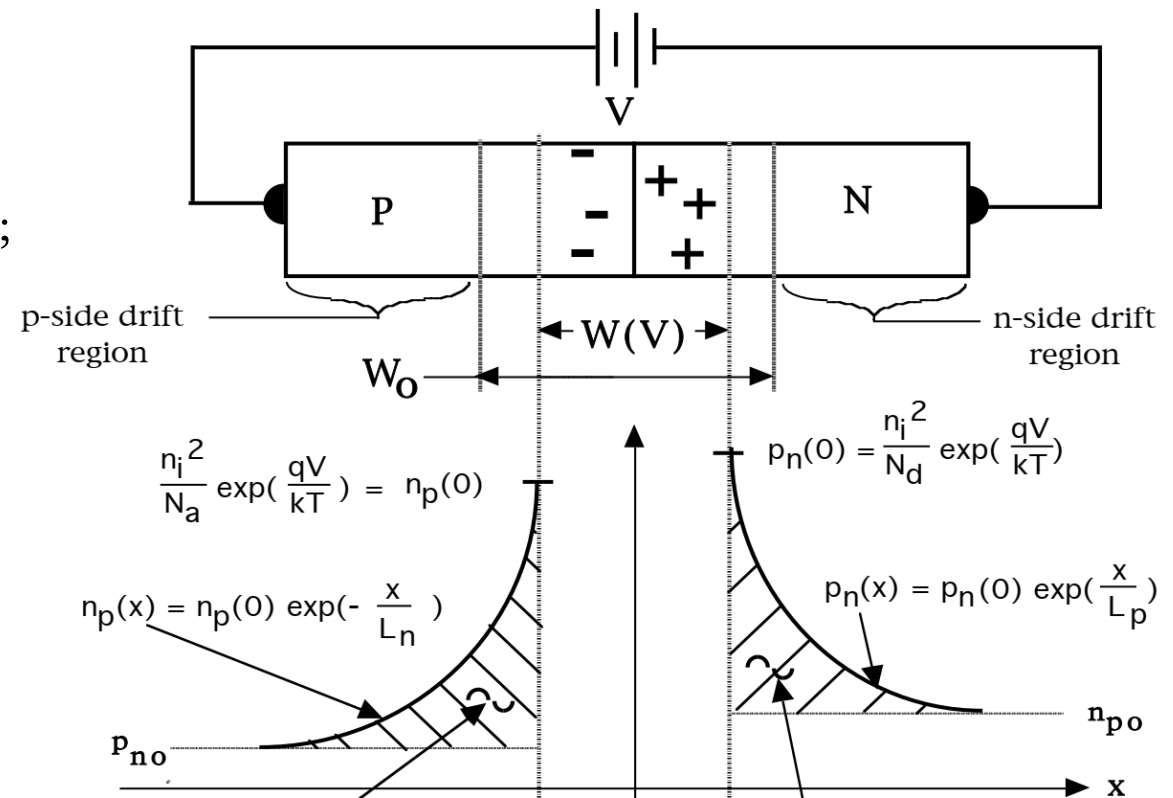
- ❑ Gradiente de n_i adjacente à região de depleção → difusão
- ❑ Os portadores minoritários são acelerados pelo campo elétrico da região de depleção
- ❑ Não depende da tensão aplicada
- ❑ Depende da temperatura porque a densidade de portadores minoritários depende da temperatura



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Portadores minoritários na polarização direta

- ❑ Polarização direta favorece a difusão;
- ❑ Excesso de portadores minoritários nas regiões de deriva;
- ❑ Decaem devido ao processo de recombinação



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.



Características básicas dos diodos



Modelo Matemático

□ Equação de Shockley:

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

Onde:

- I_D – corrente através do diodo
- I_S – corrente de fuga ou de saturação reversa 10^{-6} a 10^{-15} A
- V_D – tensão no diodo
- n – constante empírica, depende do material e da construção do diodo. Varia entre 1,1 a 1,8 para diodos comerciais

Modelo Matemático

□ V_T - tensão térmica, dada por:

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

Onde:

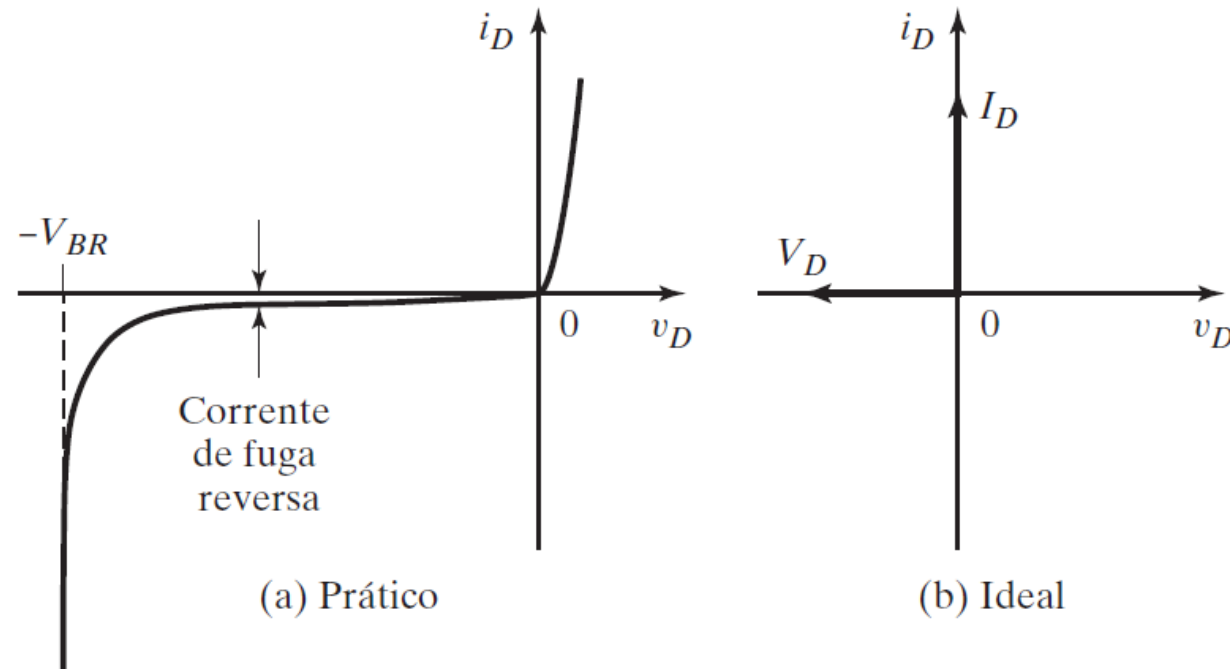
- T – temperatura absoluta em Kelvin
- k – constante de Boltzmann: $k = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- q é a carga do elétron: $q = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$

Portanto,

□ Durante a polarização direta: $I_D \approx I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}}$

□ Durante a polarização reversa: $I_D \approx -I_S$

Curva característica I x V de um diodo



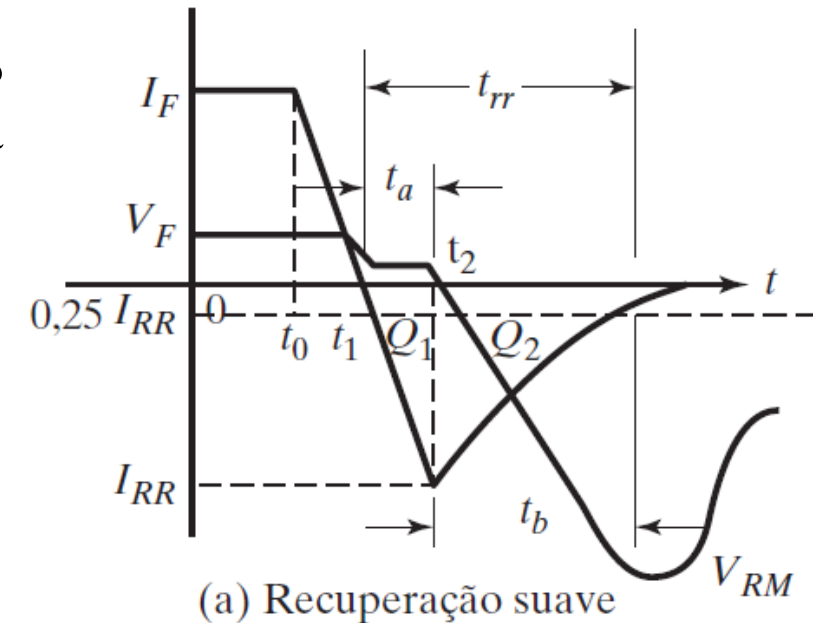
- Queda de tensão durante a polarização direta
- Corrente de fuga durante a polarização reversa
- Tensão de ruptura

Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

Recuperação reversa

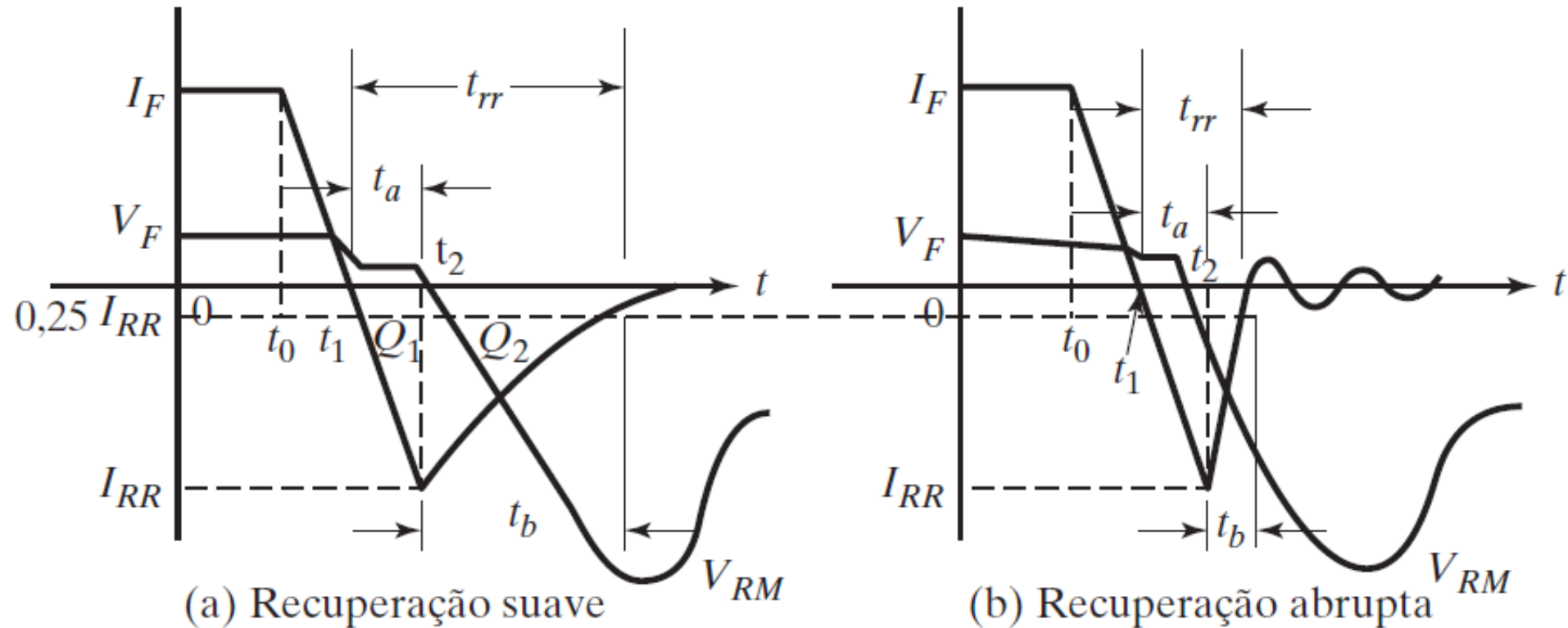
- Portadores minoritários precisam de um tempo para se recombinar
- Esse tempo é chamado de tempo de recuperação reversa
- Processo não linear, dependente da temperatura
- t_{RR} é definido como o tempo em que a corrente passa por zero (condução-bloqueio) e o momento em que a corrente reversa atinge 25% de I_{RRM}
- Fator de suavidade do diodo:

$$FS = \frac{t_b}{t_a}$$



Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

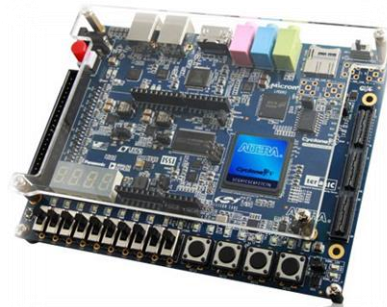
Recuperação reversa



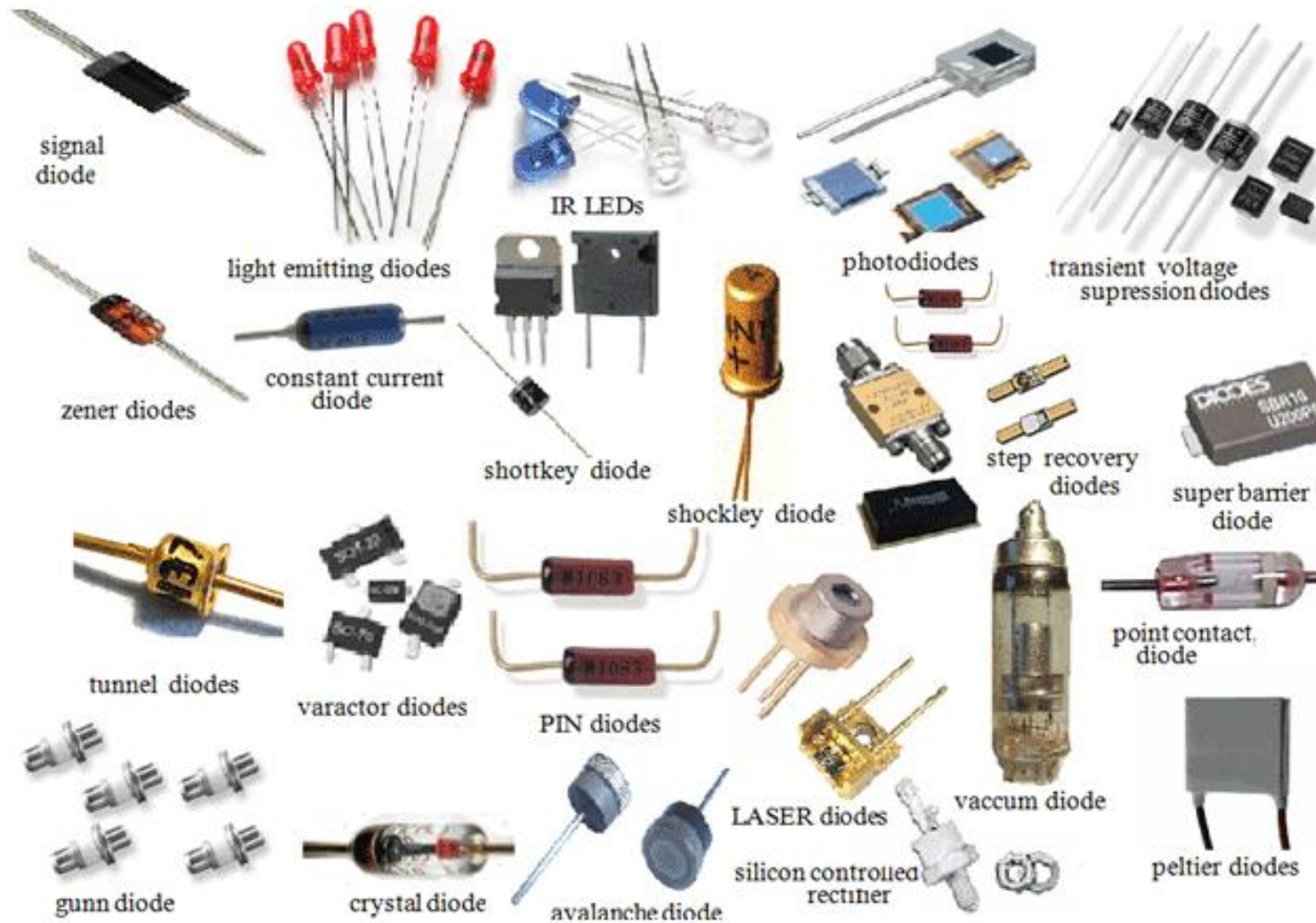
Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)



Tipos de diodos



Tipos de diodo



Types of Diode

Fonte: <https://www.instructables.com/id/Types-of-Diodes/>

Tipos de diodo

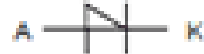
Generic



Schottky



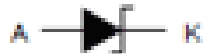
Shockley



Constant current



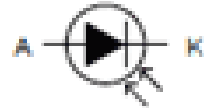
Zener



Light-emitting



Photo-



Step recovery



Tunnel



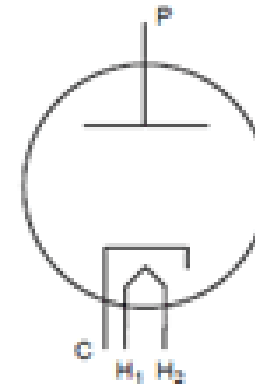
Varactor



PIN



Vacuum tube



A = Anode
K = Cathode

Various symbols of Diode

Fonte: <https://www.instructables.com/id/Types-of-Diodes/>

Diodo Padrão ou de Uso Geral

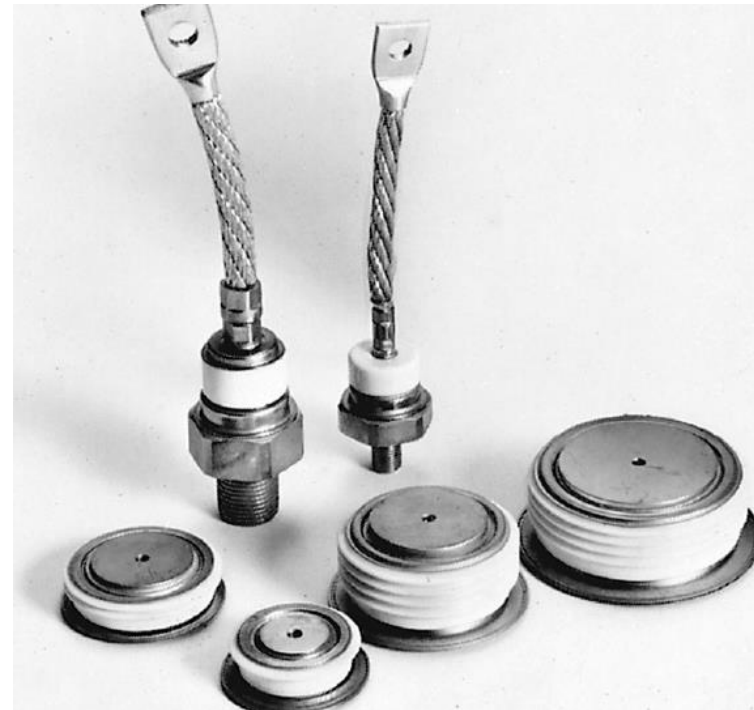
- ❑ Faixa de aplicação até 6.000V – 4500 A
- ❑ Tempo de recuperação de 25 μ s
- ❑ Em máquinas de solda são diodos de junção fundida, por serem mais baratos e mais robustos
- ❑ Dispositivo bipolar



Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

Diodo de recuperação rápida

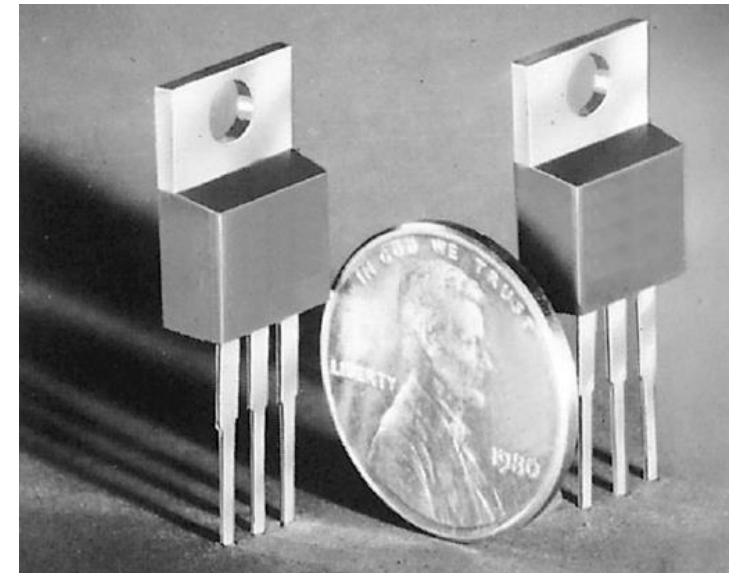
- ❑ Faixa de aplicação até 6.000V – 1100 A
- ❑ Tempo de recuperação de 0,1 a 5 μ s
- ❑ Acima de 400 V feitos por difusão
- ❑ Abaixo de 400 V crescimento epitaxial
- ❑ Dispositivo bipolar



Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

Diodo Schottky

- ❑ Faixa de aplicação até 100V – 300 A;
- ❑ Queda de tensão de 0,5 a 1,2V;
- ❑ Tempo de recuperação de nanosegundos;
- ❑ Armazenamento de carga é reduzido através de uma barreira de potencial com um contato entre um metal e um semicondutor;
- ❑ Aplicações em fonte de alimentação;
- ❑ Baixa tensão de condução;
- ❑ Corrente de fuga maior;
- ❑ Dispositivo unipolar!



Diodos Schottky duais de 20 e 30 A

Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

Diodo Schottky de Carbeto de Silício

- ❑ O carbeto de silício (SiC) é um novo material para a eletrônica de potência;
- ❑ Suas propriedades físicas superam as do Si e as do GaAs;
- ❑ Permite construir diodos Schottky de alta tensão. Vantagens:
 - baixas perdas de condução;
 - não possuem tempo de recuperação reversa;
 - a temperatura não influencia na comutação.



Fonte: <https://www.wolfspeed.com/power/products/sic-mosfets>

Si versus SiC

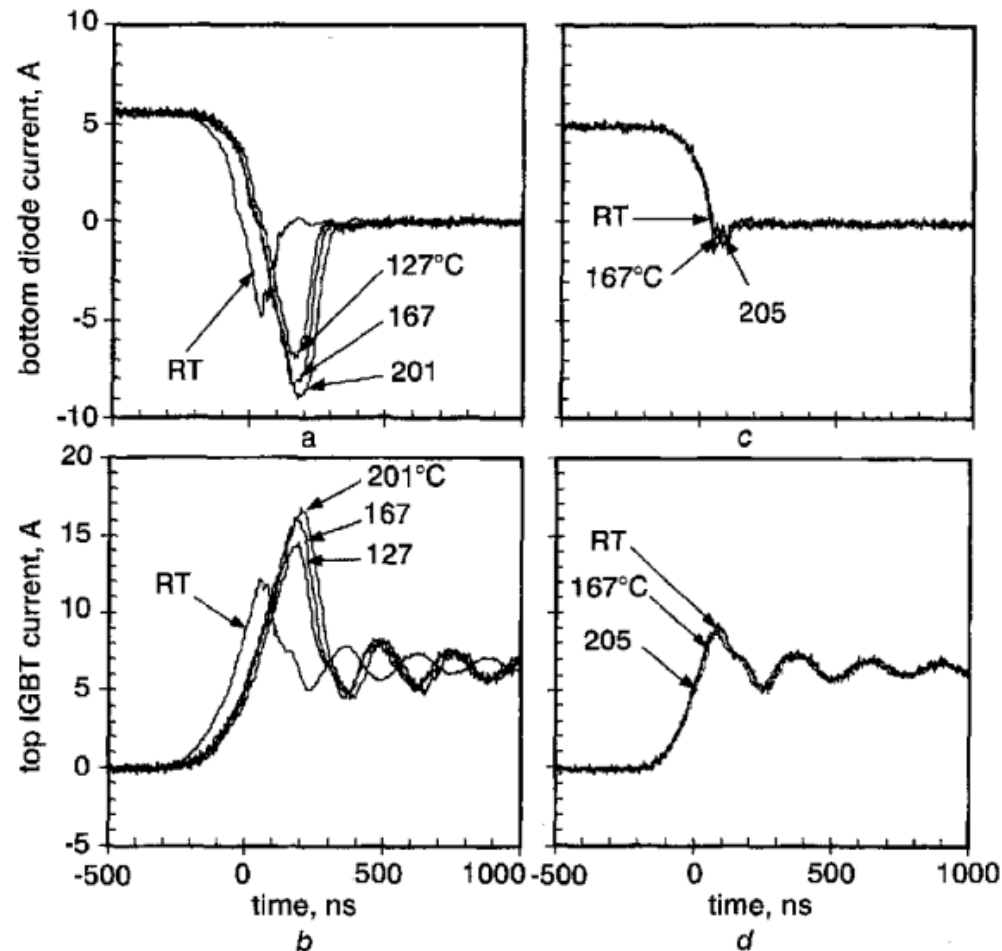
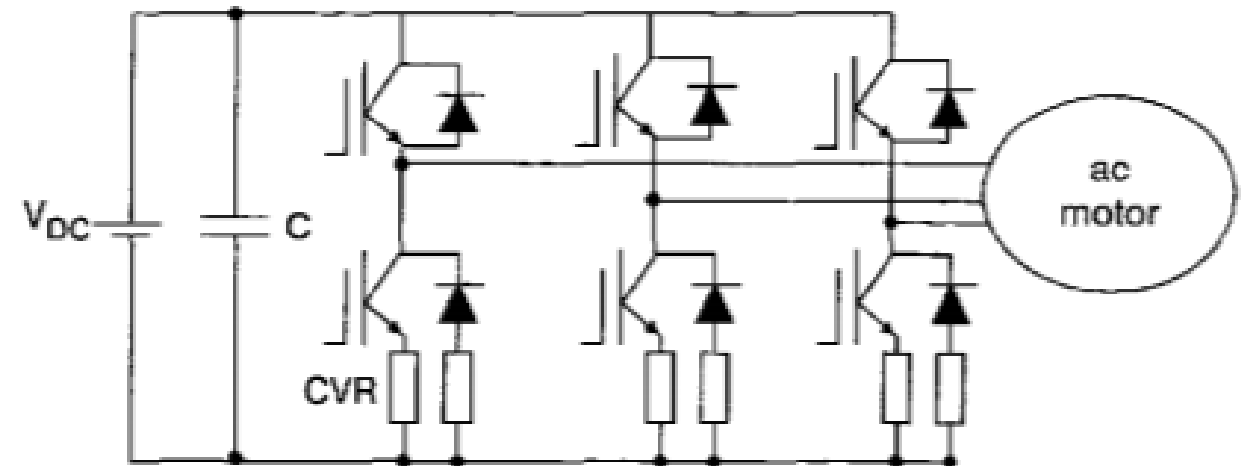


Fig. 3 Comparative current waveforms for lower freewheeling diode and upper Si IGBT for one of three phases when using either Si diodes or SiC JBS diodes

Square wave frequency is 60 Hz. DC bus voltage is 100 V and dc current is 6.0 A

- a With Si diode
- b With Si diode
- c With SiC diode
- d With SiC diode

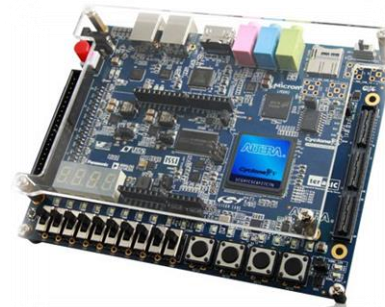


□ Por que a performance do diodo SiC é superior?

Fonte: W. Wright, J. Carter, P. Alexandrov, M. Pan, M. Weiner and J. H. Zhao, "Comparison of Si and SiC diodes during operation in three-phase inverter driving ac induction motor," in Electronics Letters, vol. 37, no. 12, pp. 787-788, 7 June 2001, doi: 10.1049/el:20010535.



Datasheet



Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>