

Aula 2: Diodos de Potência

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org





Estrutura Interna – Diodo PIN

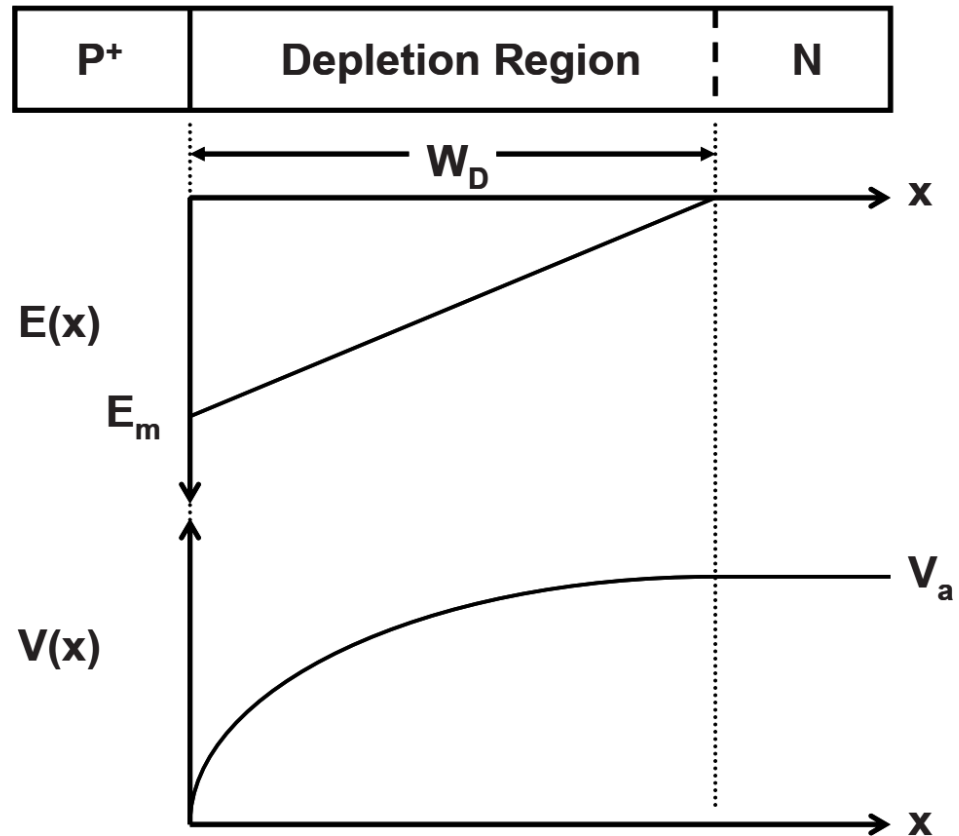


Diodo PN

□ Diodo PN

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

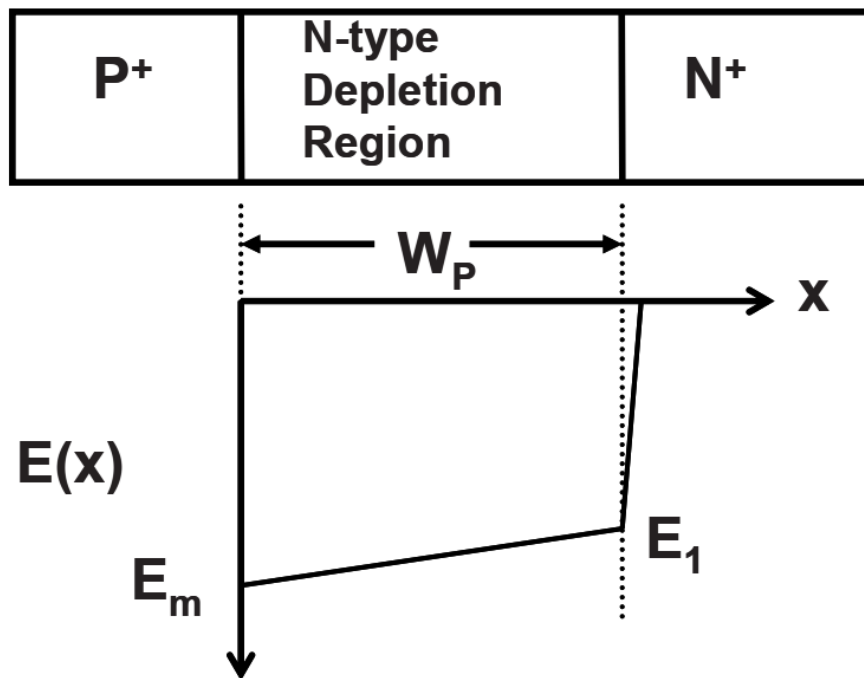
$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_D V_a}{\epsilon_S}}$$



Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

Diodo PIN

□ Diodo PIN

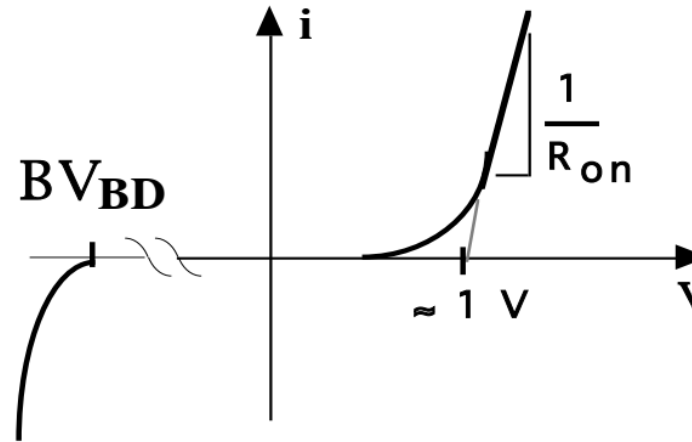
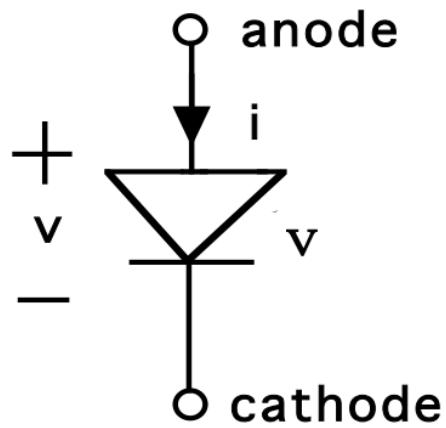
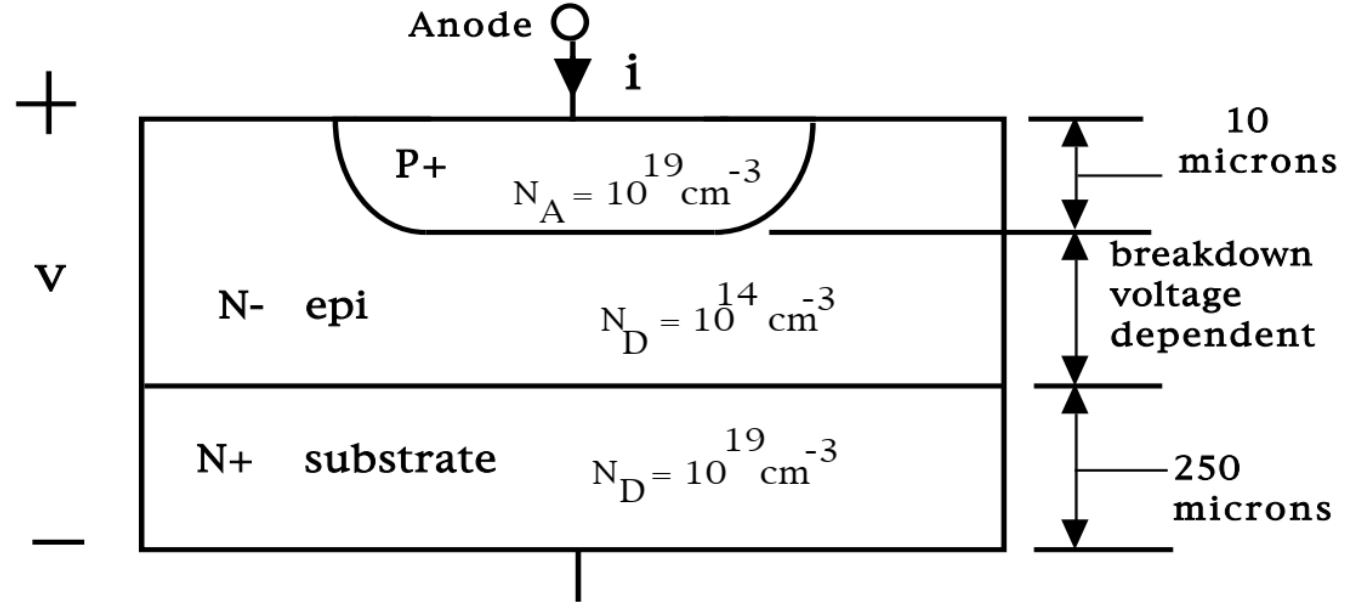


$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_D V_a}{\epsilon_S}}$$

$$E_1 = E_m - \frac{qN_{DP} W_P}{\epsilon_S}$$

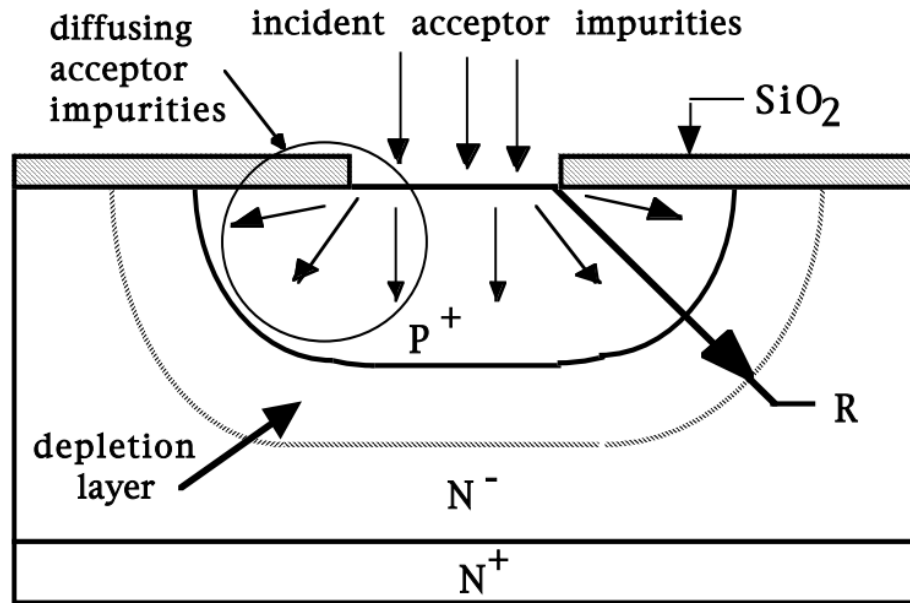
Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

Estrutura interna – Diodo PIN



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

Efeito da curvatura

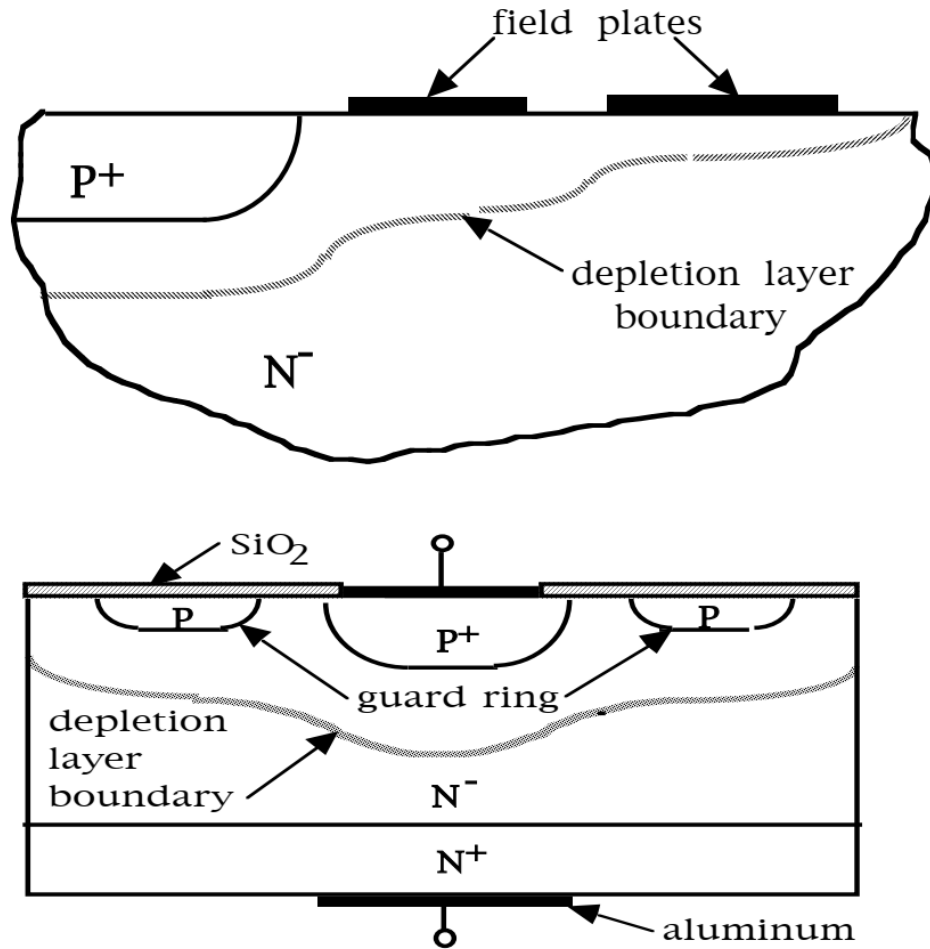


- ❑ As impurezas sofrem difusão vertical e horizontal em velocidades similares;
- ❑ Portanto, a junção apresenta curvatura.

- ❑ Se o raio de curvatura for comparável com a largura da depleção, o campo elétrico não é uniforme;
- ❑ Reduz a tensão máxima de bloqueio;
- ❑ $R > 6W$ resulta em uma redução de 10 % na tensão máxima de bloqueio;
- ❑ Não é fácil manter essa relação para grandes tensões de bloqueio (acima de 1000 V).

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

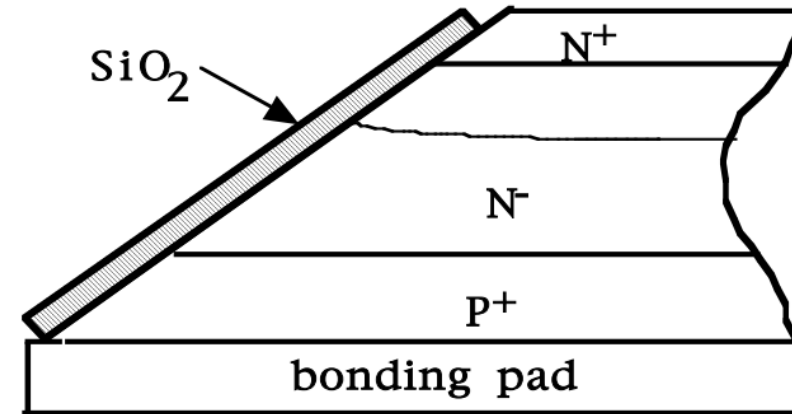
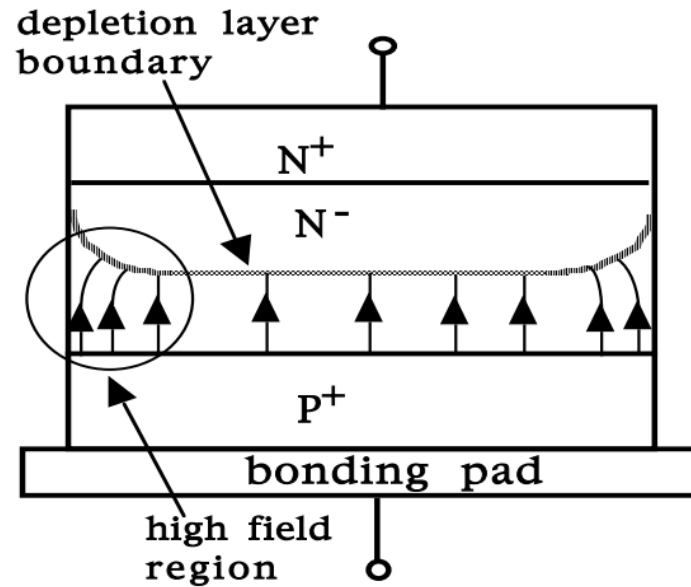
Soluções



- ❑ Condutores isolados eletricamente funcionam como superfícies equipotenciais;
- ❑ Resulta em um aumento do raio de curvatura da região de depleção;
- ❑ Regiões P isoladas eletricamente também contribuem para um aumento do raio de curvatura da região de depleção.

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

Efeito de borda

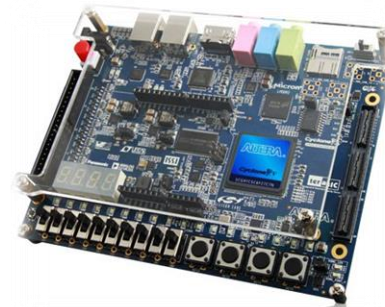


- As diferentes constantes dielétricas do silício e do ar geram um aumento do campo elétrico nas bordas do chip;
- Isto pode reduzir a máxima tensão de bloqueio do diodo;
- Contornos diferentes na superfície diminuem a curvatura da região de depleção;
- Uso de passivação da superfície ajuda a minimizar o aumento do campo elétrico e a atração de impurezas.

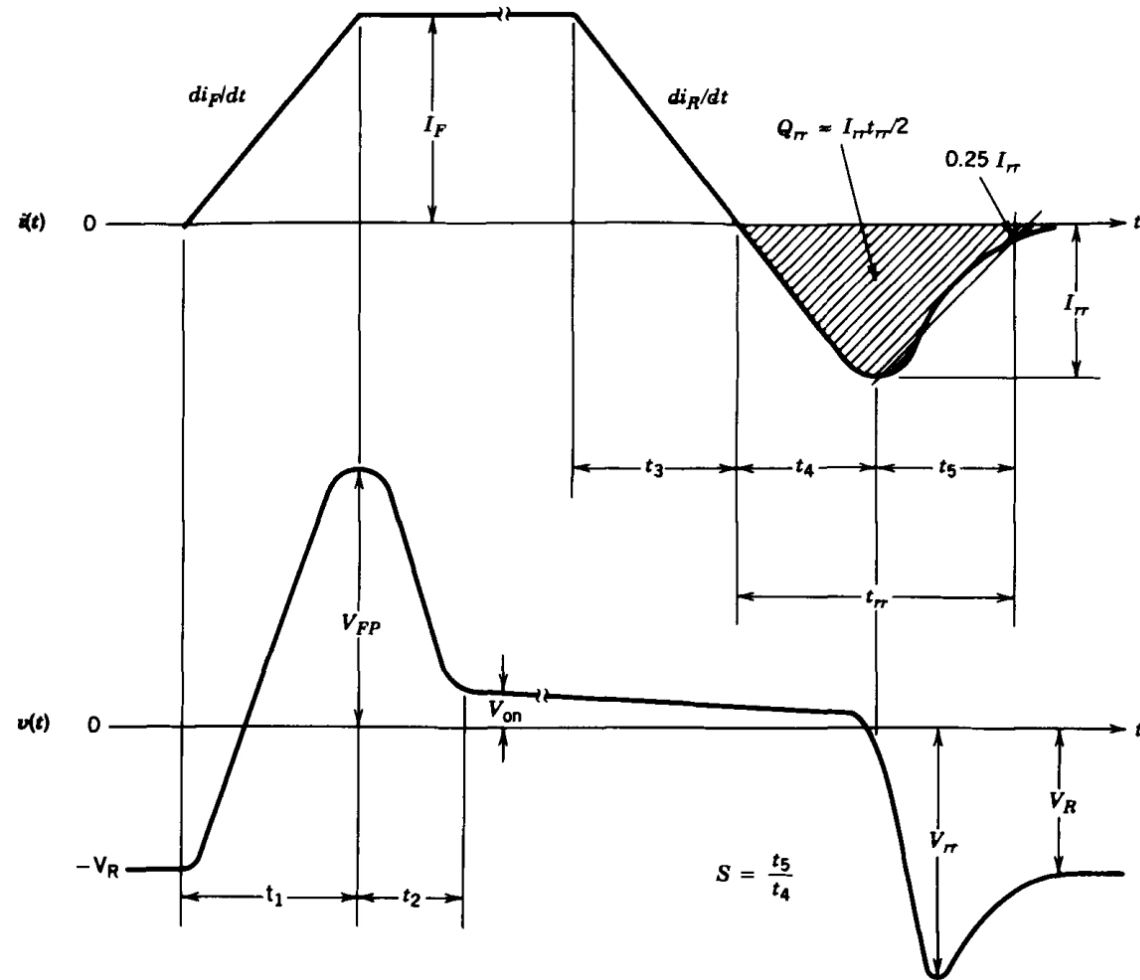
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.



Transitórios de um diodo

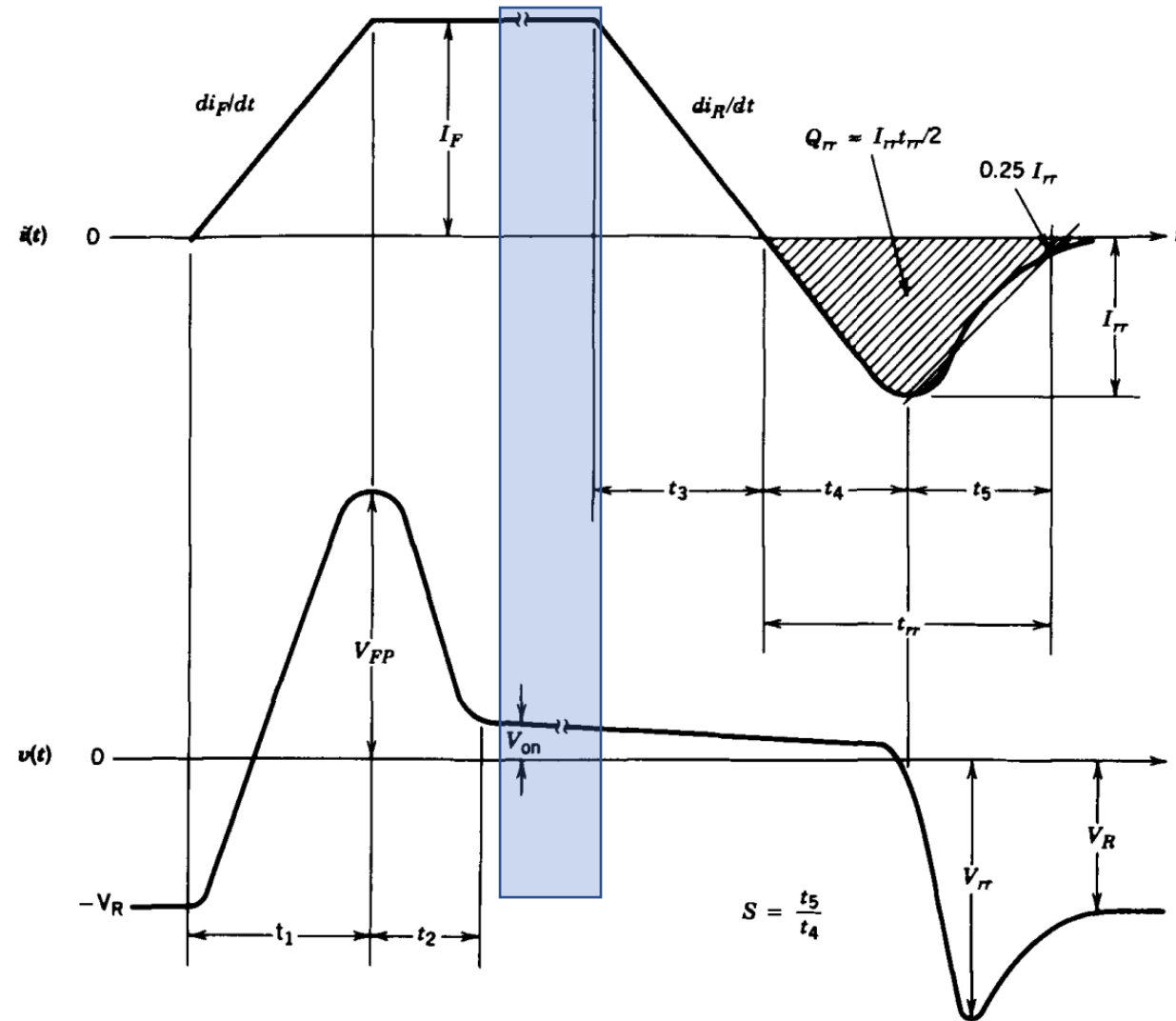


Formas de onda – diodo PIN



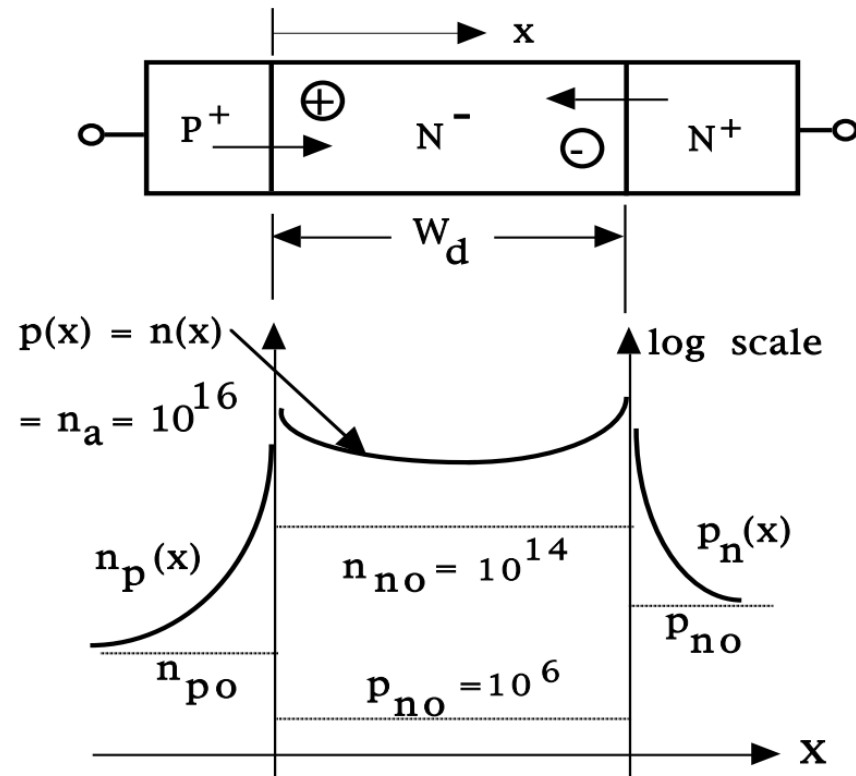
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Formas de onda – diodo PIN



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

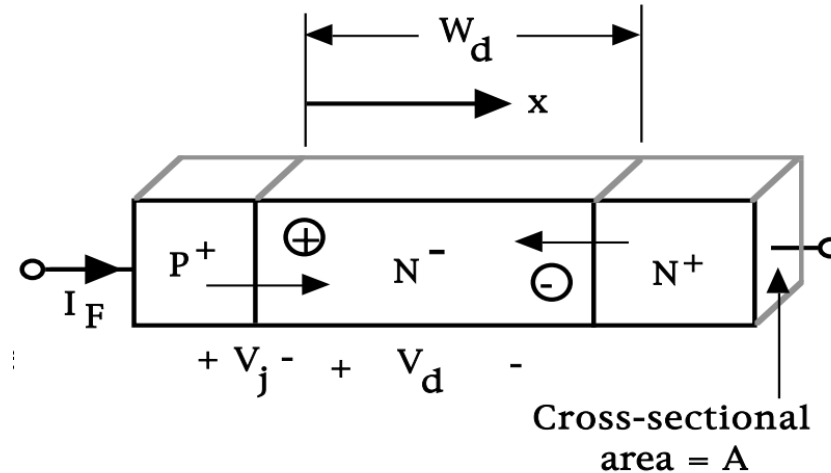
Modulação de condutividade



- ❑ Portadores minoritários são injetadas na região N^- quando o diodo é diretamente polarizado (dupla injeção);
- ❑ Espera-se que a recombinação reduza a densidade de cargas da região;
- ❑ Se o comprimento da região N^- é menor que o comprimento de difusão e a injeção de portadores é maior que n_{no} , a distribuição de cargas é aproximadamente plana.
- ❑ Como a densidade de cargas aumenta, a resistência da região N^- diminui consideravelmente;
- ❑ Este fenômeno é conhecido como modulação de condutividade.

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

Modulação de condutividade

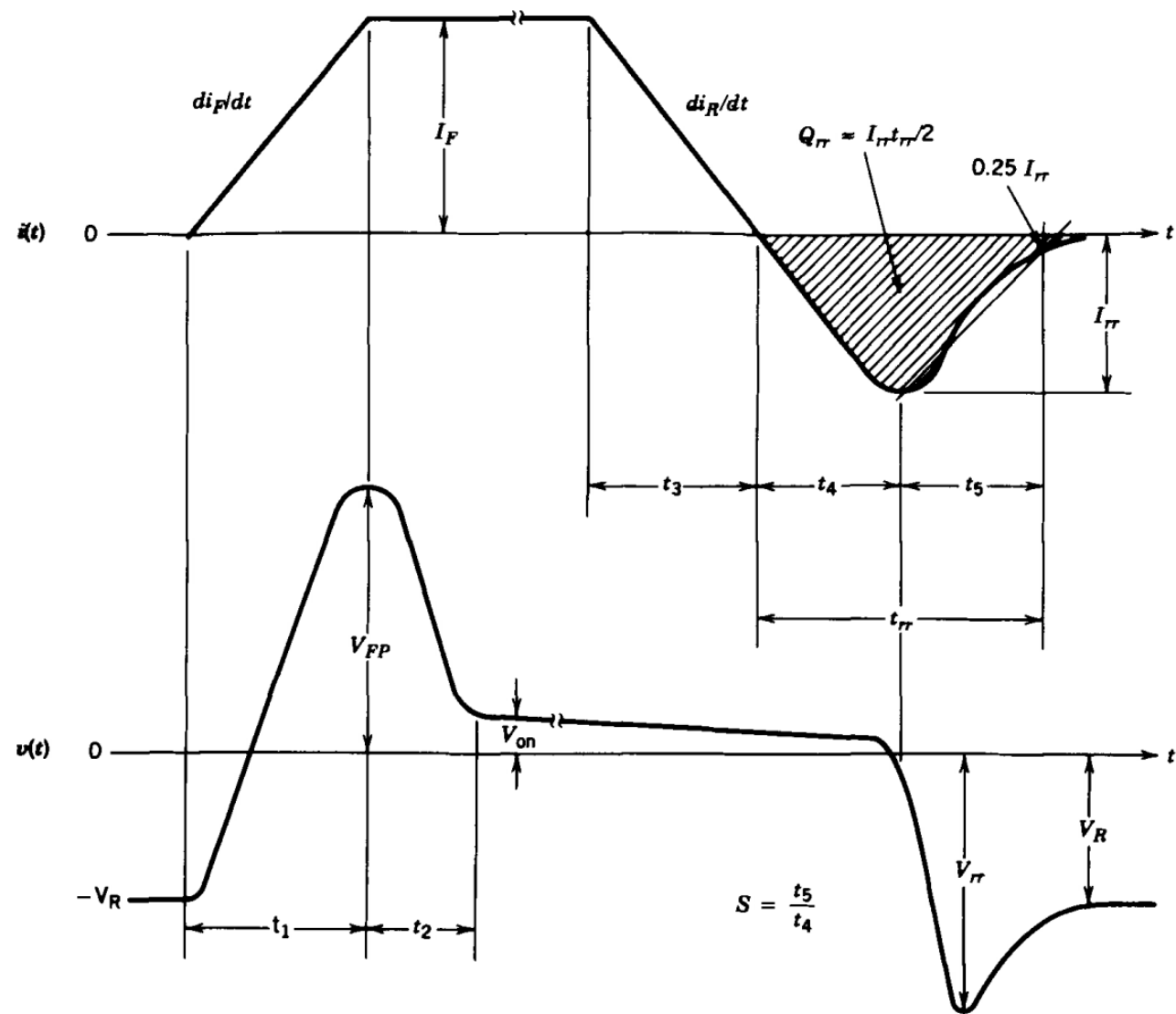


$$V_d \approx \frac{W_d^2}{(\mu_n + \mu_p)\tau}$$

- ❑ Conclusão: A queda de tensão diretamente polarizado reduz com o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários (lifetime);
- ❑ Modulação de condutividade só acontece em dispositivos baseados em portadores minoritários (bipolares). Por isso IGBTs são comercialmente disponíveis para tensões maiores que MOSFETs (dispositivo unipolar).

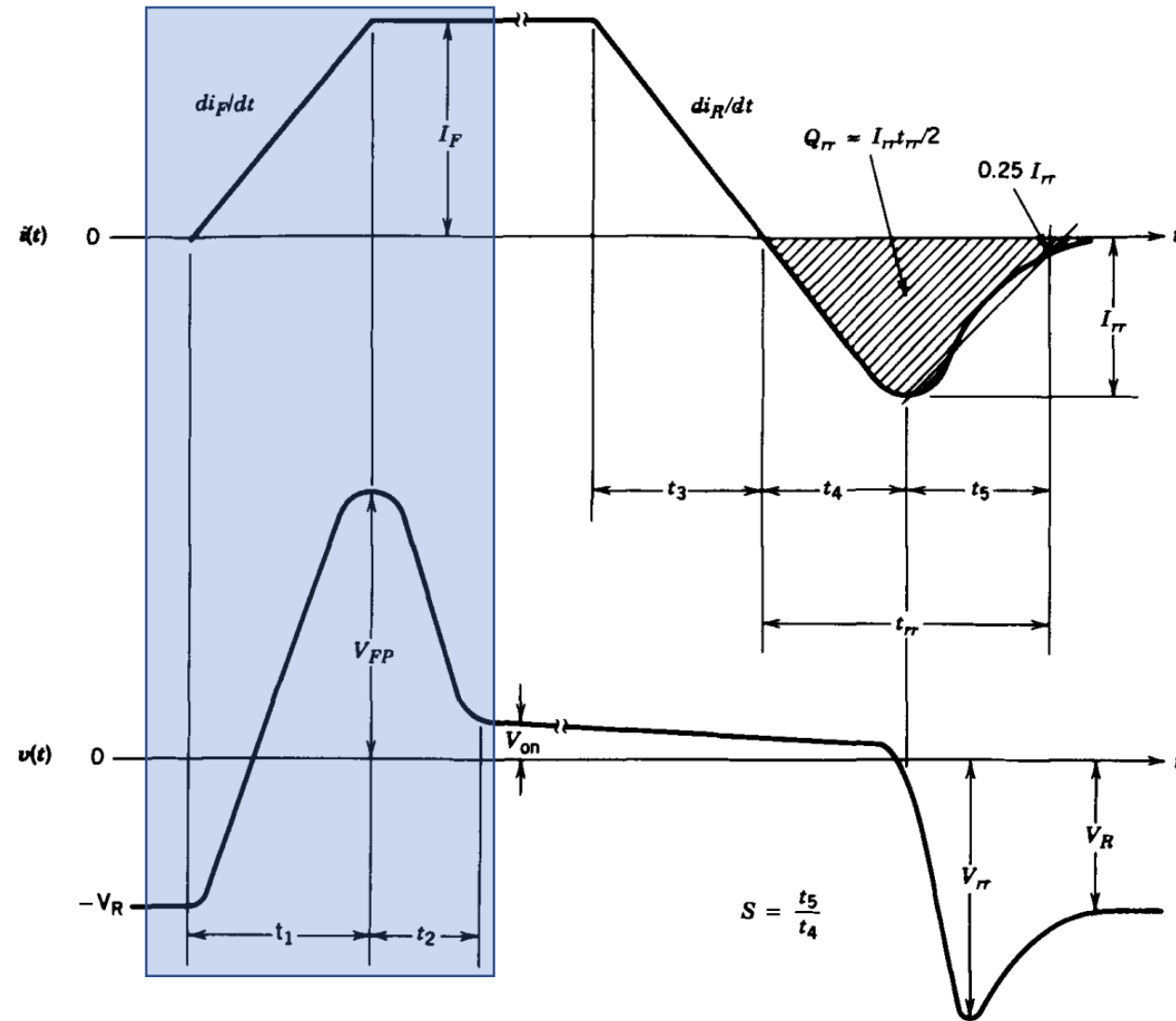
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Formas de onda – diodo PIN



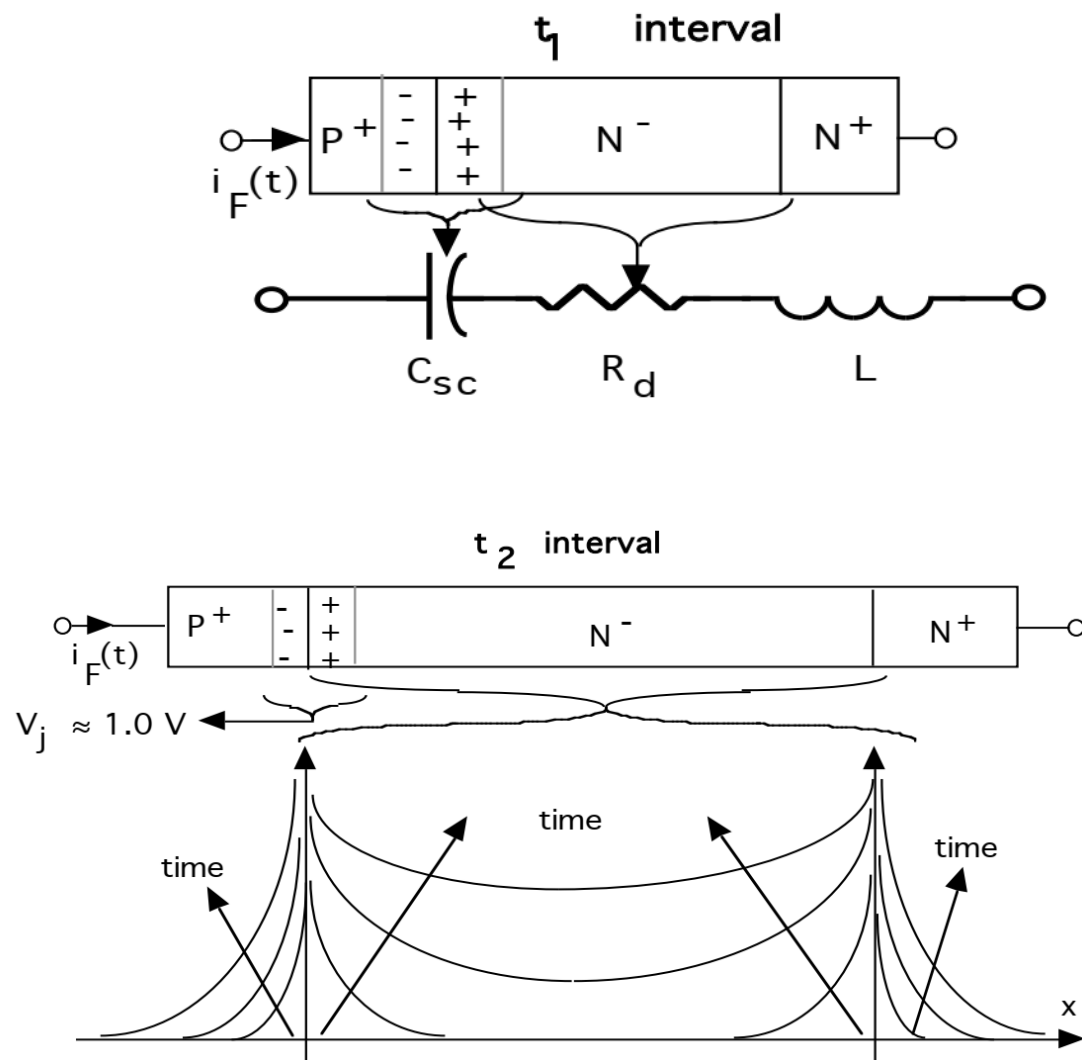
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Formas de onda – diodo PIN



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

Recuperação direta



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

Recuperação direta

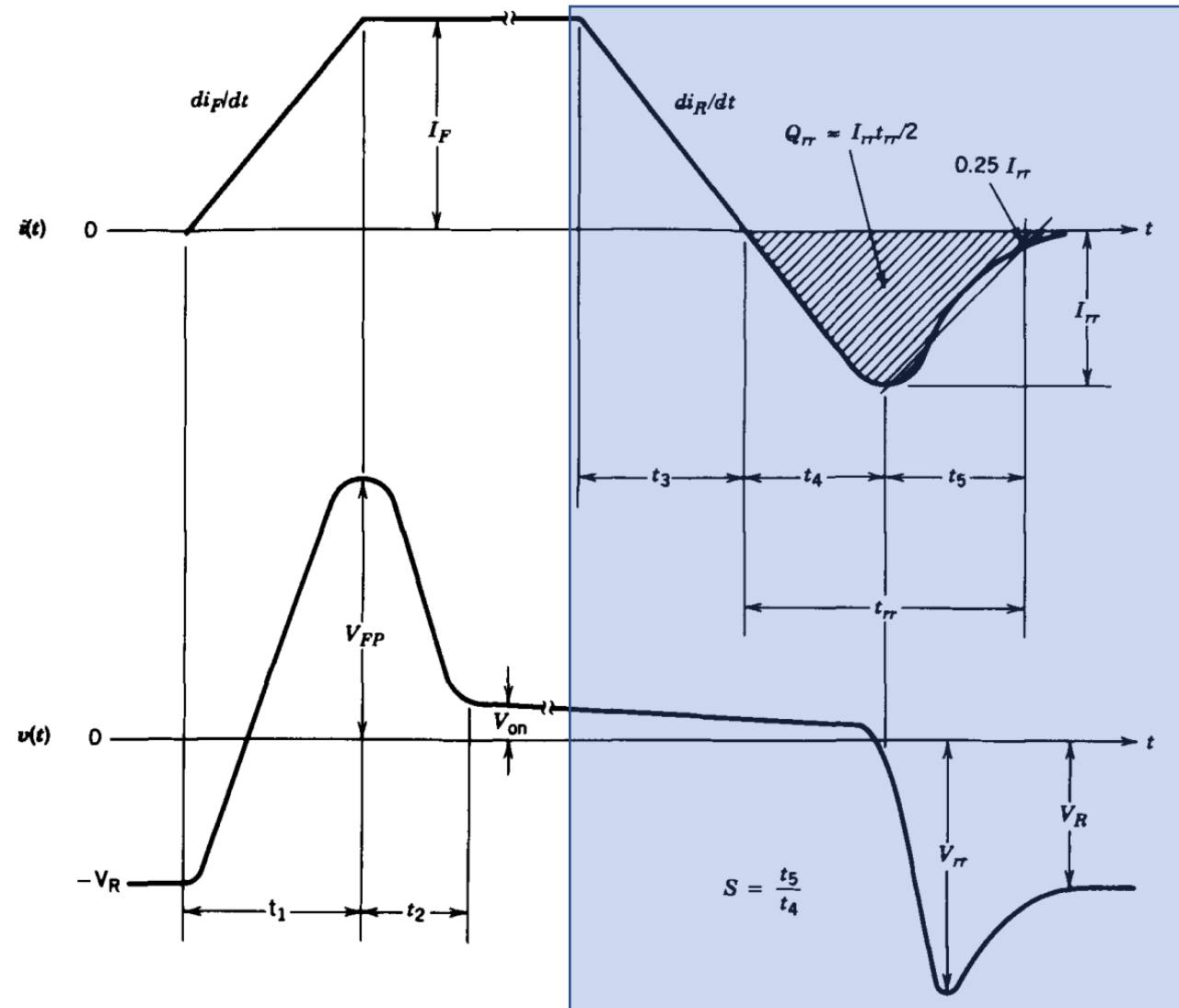
- ❑ Durante o tempo t_1 , a carga armazenada na região de depleção é removida. Este fenômeno pode ser interpretado como a descarga de uma capacitância;

- ❑ O sobressinal é causado por dois fenômenos:
 - A resistência elétrica da região N^- só reduz após a formação da distribuição de carga (modulação de condutividade leva tempo);
 - As conexões internas do diodo apresentam indutâncias parasitas.

- ❑ t_1 : Tipicamente na faixa de centenas de nanosegundos;

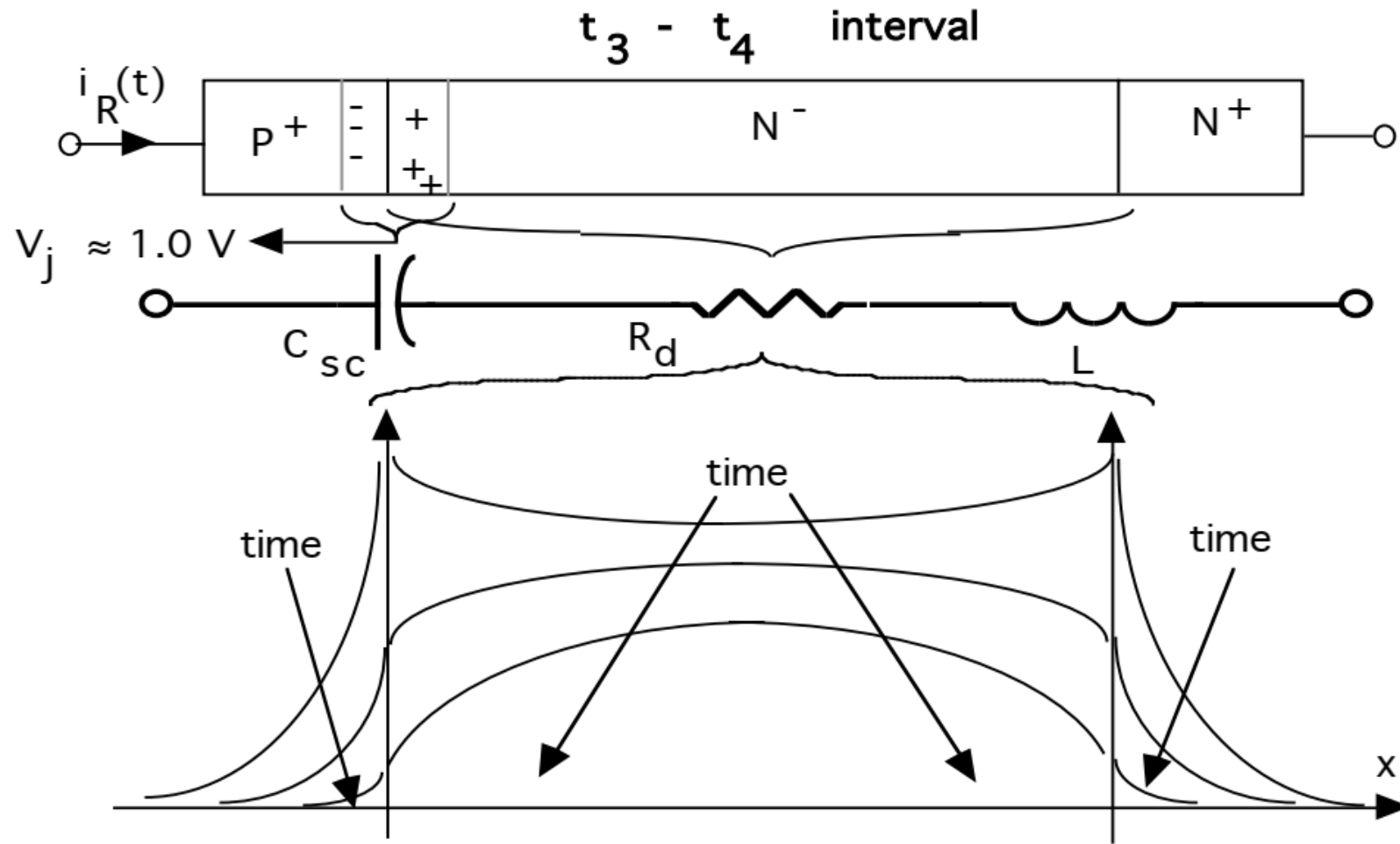
- ❑ t_2 : Tipicamente na faixa de microssegundos.

Formas de onda – diodo PIN



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

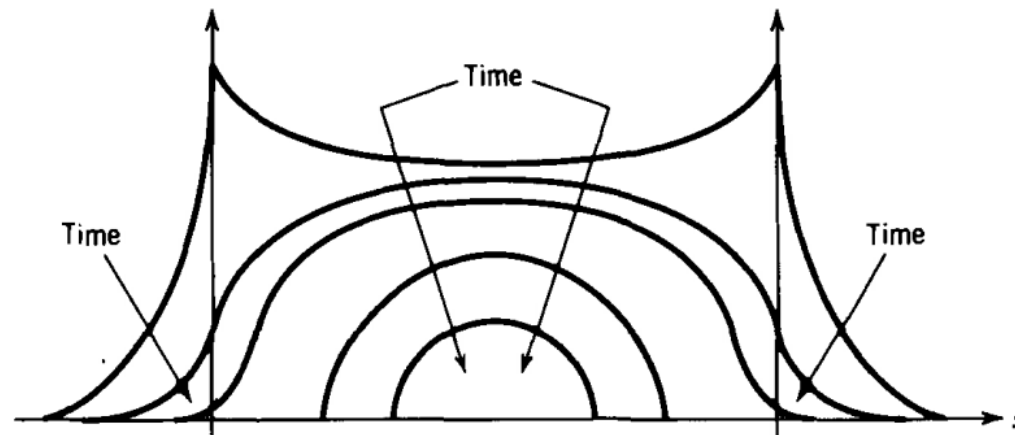
Recuperação reversa



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

Recuperação reversa

- ❑ Durante o tempo t_3 , a corrente reduz seguindo a derivada definida pelo circuito externo até atingir zero;
- ❑ Inicia-se o período definido por t_4 . Uma vez que o diodo tem uma distribuição de carga no seu interior, ele não é capaz de gerar a região de depleção instantaneamente;
- ❑ Durante t_4 a corrente no diodo fica negativa e os portadores majoritários se movem através da região de depleção. Isso gera uma redução na queda de tensão do diodo;
- ❑ Quando o espaço de carga é eliminado em uma das junções, o diodo começa a bloquear tensão. Inicia-se o período definido por t_5 . A queda de tensão torna-se negativa.



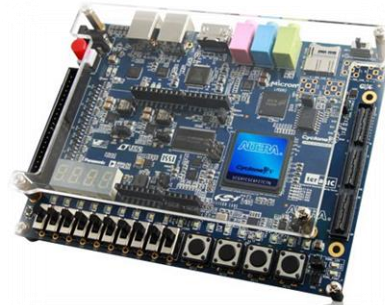
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 2nd. Edition, John Wiley, 1994.

Recuperação reversa

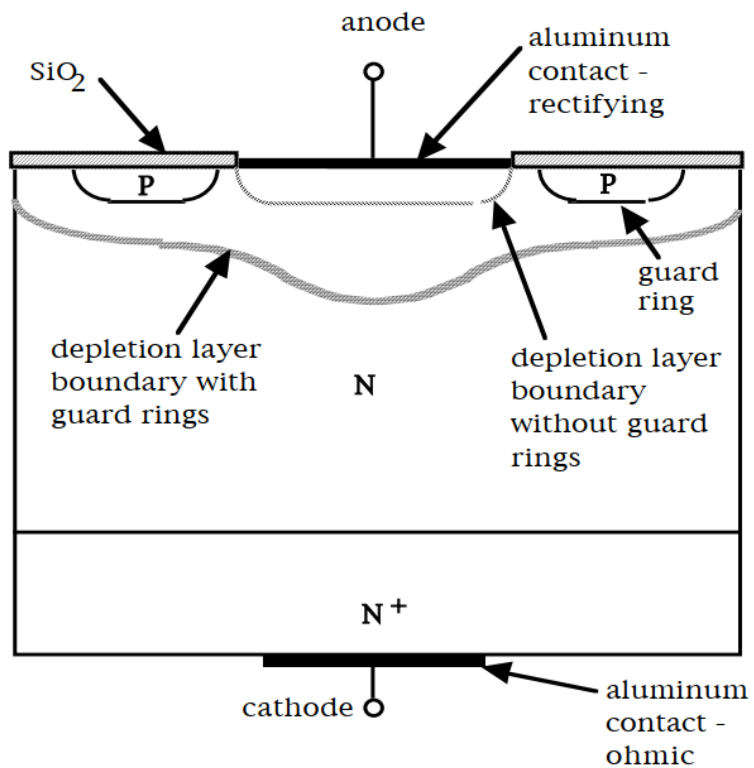
- ❑ Durante t_5 , o restante das cargas presentes na diodo se recombinam e a região de depleção finalmente é formada;
- ❑ O sobressinal observado na tensão do diodo é ocasionado pelas indutâncias parasitas do circuito;
- ❑ Usualmente, $t_5 < t_4$;
- ❑ O tempo de recuperação reversa é função direta do tempo de vida dos portadores no dispositivo.



Diodo Schottky



Diodos Schottky



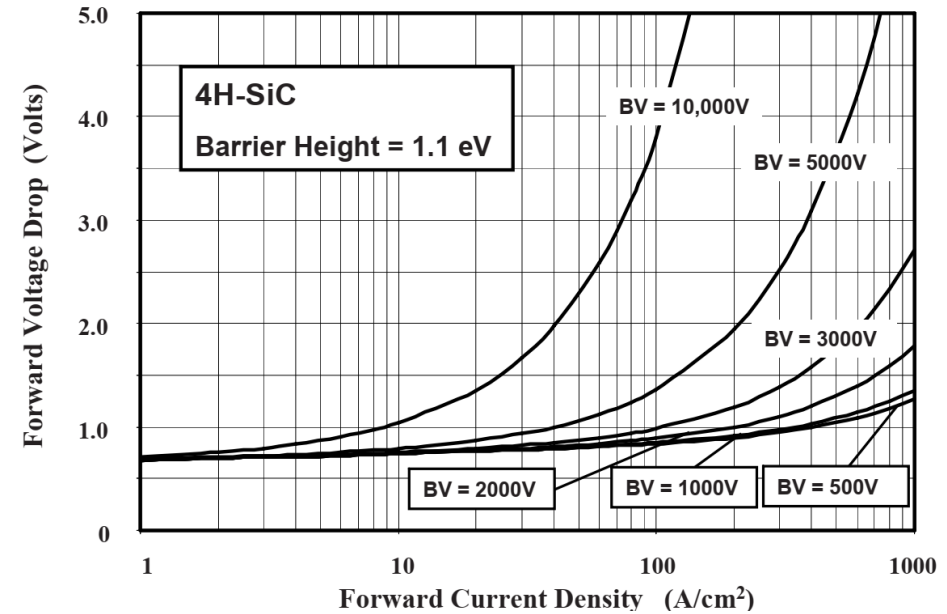
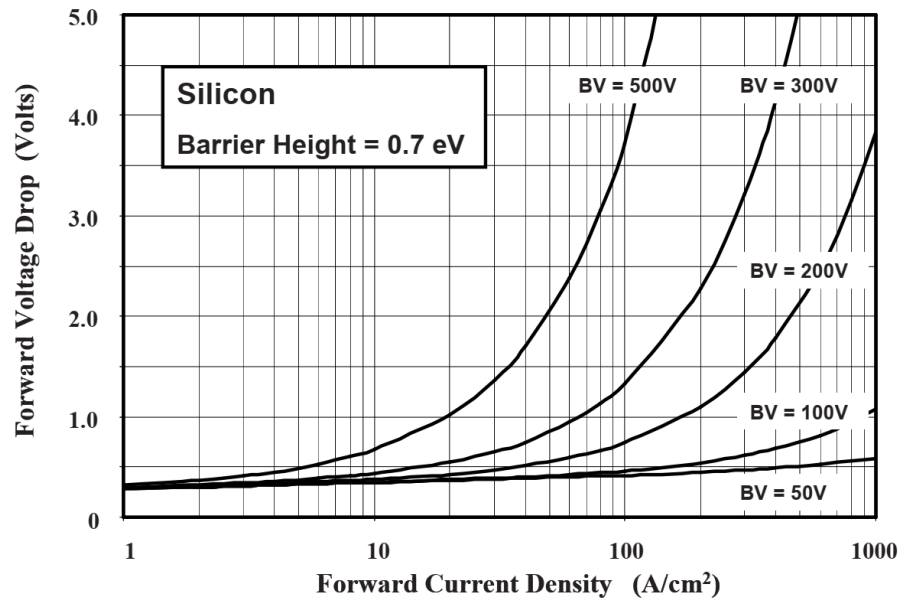
- ❑ Queda de tensão na faixa de 0,3 a 0,5 volts;
- ❑ Tensões de bloqueio menores que 200 V (para dispositivos de silício);
- ❑ Baseado em portadores majoritários (dispositivo unipolar);
- ❑ Não apresenta recuperação reversa;
- ❑ Dispositivos de canal N são preferíveis (maior mobilidade dos elétrons em relação as lacunas).

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

Diodos Schottky

- ❑ Fluxo de elétrons do semicondutor para o condutor;
- ❑ Resulta em uma zona de depleção;
- ❑ No estado bloqueado o campo elétrico é contido na região N;
- ❑ Uma vez que não existe modulação de condutividade, deve-se usar uma dopagem relativamente alta → recuperação direta desprezível;
- ❑ O aumento da tensão de bloqueio acaba afetando a queda de tensão direta do diodo, pois a camada N deve ser mais longa (por isso deve ser mantida baixa);
- ❑ Não necessita de recombinação durante a comutação, pois baseia-se em portadores majoritários → recuperação reversa desprezível;
- ❑ Problema: Construir dispositivos de alta tensão de bloqueio → corrente de fuga e queda de tensão diretamente polarizado.

Comparação Si versus SiC



- ❑ Dispositivos baseados em SiC podem apresentar tensões de bloqueio maiores!
- ❑ Desta forma, podem-se construir diodos Schottky de média tensão.

Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

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>