

A versão que utilizo é LTspice XVII(x64), para Windows, atualizada em 22/01/2020. Os artigos anteriores da série podem lhe auxiliar num melhor acompanhamento. No décimo quarto artigo veremos o diodo de potência usando o LTspice.

Diodo de Potência

Diodo de potência é um dispositivo similar ao diodo de sinal de junção 'PN', a diferença é que eles têm maiores capacidades de potência, tensão e corrente. Normalmente as junções 'PN' são formadas por fusão, difusão e crescimento epitaxial. O símbolo do diodo de potência é o mesmo do que do diodo convencional.



Figura 1 - Símbolo

Por ser um dispositivo com dois terminais, então, é possível polarizá-lo diretamente e reversamente, conforme mostrado a seguir. Na polarização direta o potencial no anodo é maior do que no catodo, e na polarização reversa o potencial no catodo é maior do que no anodo.

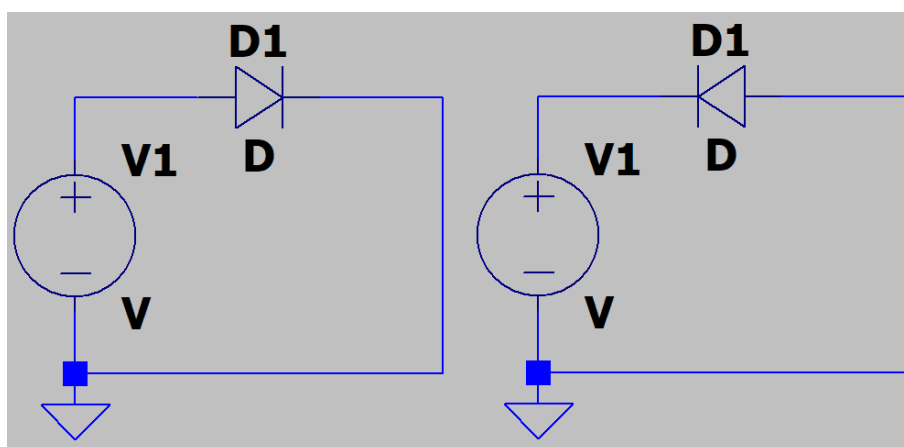


Figura 2 – Polarização direta e reversa

Polarizado diretamente o diodo conduzirá, então, uma corrente circulará através do dispositivo e uma pequena queda de tensão fica sobre seus terminais. Quando polarizado reversamente o diodo não conduzirá, mas, uma corrente muito pequena reversa circulará através do dispositivo, essa corrente é denominada corrente de fuga, que em inglês o termo é 'leakage current'. A corrente reversa aumentará conforme o potencial do catodo fica maior do que do anodo, até uma tensão de ruptura, que em inglês o termo é 'breakdown voltage'. É importante aprendermos os termos em inglês, porque as folhas de dados dos dispositivos eletrônicos, seus datasheets, são disponibilizados na língua inglesa.

O diodo de potência pode trabalhar em três regiões, que são: região de condução, região de não-condução e região de ruptura. Na região de condução o diodo está polarizado diretamente e nas outras duas está polarizado reversamente. Apenas o nível de tensão aplicado reversamente define se estaremos na região de ruptura ou de apenas não-condução. Alguns diodos especiais trabalham, de forma controlada, na região de ruptura, mas, para um diodo de potência normal temos que ficar atentos quanto a região de ruptura, que danificará o dispositivo.

A tabela seguir mostra alguns termos mais comuns que encontramos nos datasheets dos diodos de potência.

Abreviatura	Descrição em Português	Descrição em Inglês
V_F	Tensão direta	Forward voltage
I_F	Corrente direta	Forward current
V_R	Tensão reversa	Reverse voltage
I_R	Corrente reversa (fuga, saturação)	Reverse leakage current
t_{rr}	Tempo de recuperação reverso	Reverse recovery time
I_{rrm}	Corrente reversa máxima (pico)	Peak reverse current
Q_{rr}	Carga de recuperação reversa	Reverse recovery charge
P_{tot}	Dissipação de potência	Power dissipation
V_{RRM}	Tensão reversa repetitiva máxima	Repetitive peak reverse voltage
I_{FRM}	Corrente direta repetitiva máxima	Surge non repetitive forward current
T_J	Temperatura na junção	Junction temperature

Tabela 1 – Termos da folha de dados

A curva característica de tensão versus corrente de um diodo de potência é mostrada a seguir.

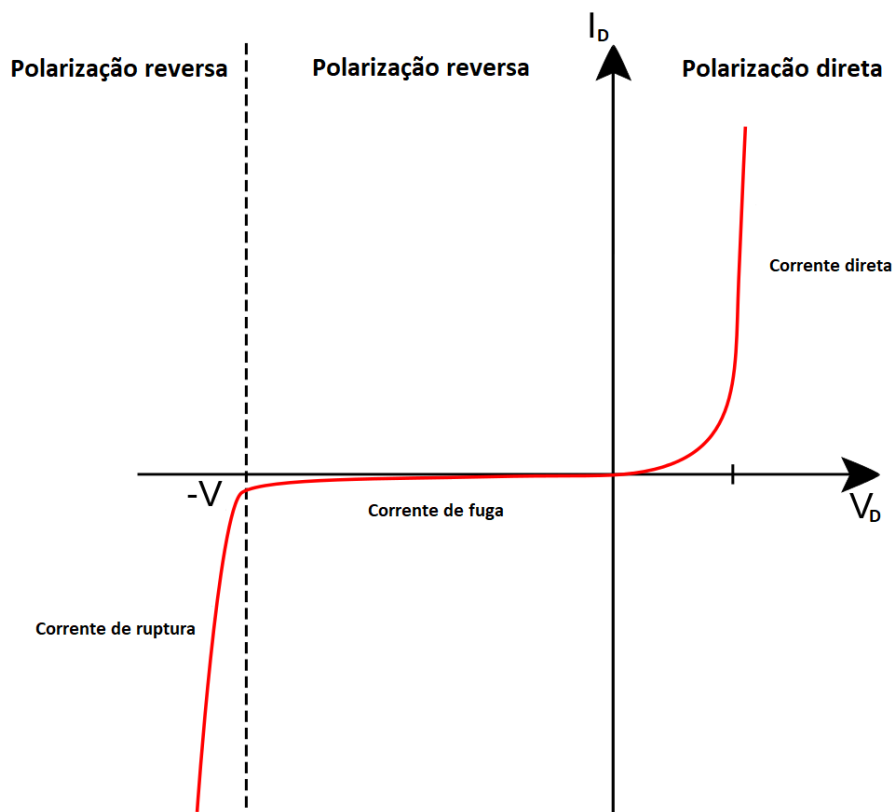


Figura 3 – Curvas características do diodo de potência

As curvas características de tensão versus corrente dos diodos de potência podem ser representadas pela equação conhecida como equação do diodo Shockley, conforme mostrada a seguir.

Equação 1: $I_D = I_S \times \left[e^{\frac{V_D}{n \times V_T}} - 1 \right]$

I_D – corrente através do diodo

I_S – corrente de saturação reversa (corrente de fuga)

V_D – a queda de tensão sobre o diodo

V_T – é a tensão térmica

n – fator de idealidade, também conhecido como coeficiente de emissão ou fator de qualidade

O fator de idealidade 'n' geralmente varia de 1 a 2, embora possa, em alguns casos, ser maior, dependendo do processo de fabricação e do material semicondutor. Pode ser definido igual a 1, no caso de um diodo "ideal", portanto, 'n' é algumas vezes omitido. O fator de idealidade foi adicionado para explicar junções imperfeitas, como observado em transistores reais. O fator é responsável principalmente pela recombinação das cargas da região de depleção da junção.

Equação 2: $V_T = \frac{k \times T}{q}$, portanto: $V_T = \frac{1,3808 \cdot 10^{-23} \times (273 + ^\circ C)}{1,6022 \cdot 10^{-19}}$

k – constante de Boltzmann: $1,3808 \cdot 10^{-23}$ [J/K]

T – temperatura absoluta na junção em Kelvin

q – carga do elétron: $1,6022 \cdot 10^{-19}$ [C]

Numa junção à 25°C a tensão térmica é aproximadamente 25,68 [mV].

A corrente de saturação reversa, não é constante, mas, varia com a temperatura; geralmente é mais significativa do que ' V_T ', de modo que tipicamente ' V_D ' diminui à medida que a temperatura aumenta.

A equação do diodo Shockley não descreve perfeitamente a curva I-V, porque não considera a resistência interna do diodo. Isso pode ser levado em consideração quando se modela um diodo de potência adicionando uma resistência em série. Outro detalhe da equação do diodo Shockley é que o termo exponencial na equação tende a zero, conforme a polarização reversa aumenta, e a corrente reversa seria uma constante $-I_S$, o que não é real. Também a região de ruptura reversa não é modelada pela equação do diodo de Shockley.

Recuperação Reverso

A corrente numa junção diretamente polarizada deve-se ao efeito dos portadores majoritários e minoritários. Se um diodo de potência estiver conduzindo e se tentarmos cortar essa condução, esse corte não é instantâneo. O diodo continua conduzindo devido os portadores minoritários que permanecem na junção. Esses portadores requerem um certo tempo para recombinar as cargas opostas e se neutralizar. O tempo de recuperação reverso, que em inglês o termo é reverse recovery time, é abreviado como ' t_{rr} '.

O tempo de recuperação reverso ' t_{rr} ' é medido a partir do cruzamento inicial com zero da corrente do diodo até 25% da corrente reversa máxima, no seu decaimento. O ' t_{rr} ' é composto por ' t_a ' e ' t_b '. O t_a deve-se ao armazenamento de cargas na região de depleção da junção, e representa o cruzamento inicial com o zero e o pico da corrente reversa ' I_{RR} '. O ' t_b ' deve-se ao armazenamento

das cargas no material semiconductor. A relação ' t_a/t_b ' é conhecida como fator de suavidade, termo em inglês é softness factor. O ' t_{rr} ' é dependente da temperatura na junção, da taxa do decaimento da corrente direta e da intensidade da corrente direta antes do decaimento.

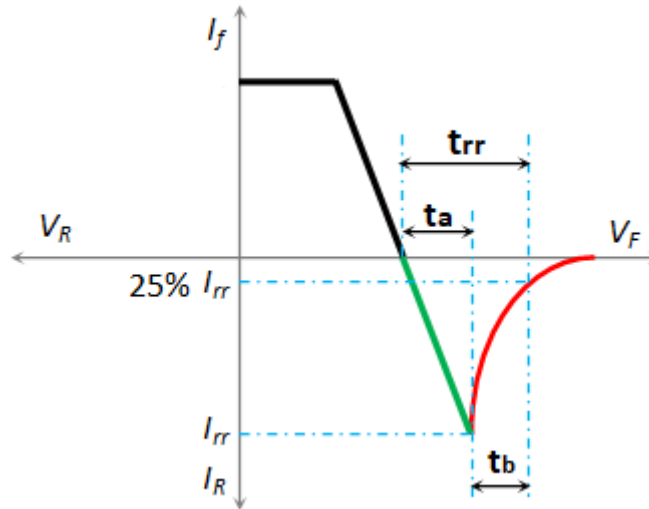


Figura 4 – Características de recuperação reversa do diodo de potência

Portanto, o tempo de recuperação reverso será:

Equação 3: $t_{rr} = t_a + t_b$

A corrente reversa máxima ' I_{RR} ' é expressa pela equação mostrada a seguir, que obviamente faz sentido porque o pico reverso atingido será determinado pela taxa de decaimento da corrente multiplicado pelo tempo de decaimento. É isso que a equação 4 representa.

Equação 4: $I_{RR} = t_a \times \frac{d_i}{d_t}$

A carga de recuperação reversa ' Q_{RR} ' é a quantidade de portadores de cargas que fluem através do diodo no sentido reverso, devido à mudança na condição de condução direta para bloqueio reverso. A carga armazenada é a área abrangida pelo caminho da corrente de recuperação, e a equação que aproxima seu valor é:

Equação 5: $Q_{RR} = \frac{1}{2} \times I_{RR} \times t_a + \frac{1}{2} \times I_{RR} \times t_b = \frac{1}{2} \times I_{RR} \times t_{rr}$

Equação 6: $Q_{RR} = \frac{1}{2} \times I_{RR} \times t_{rr}$

Explicando a origem da equação 5. Sabemos que corrente é a variação de carga no tempo, então, se integrarmos a corrente teremos a carga. Quando estamos integrando a corrente, estamos buscando a área dessa função no tempo, sendo assim, na equação 5 estamos achando duas áreas de triângulos, cuja as bases são ' t_a ' e ' t_b ', e o lado comum é ' I_{RR} '.

Da equação 6 podemos encontrar a corrente reversa máxima ' I_{RR} ', que é pico reverso, expressa em relação a carga de recuperação, portanto:

Equação 7: $I_{RR} = \frac{2 \times Q_{RR}}{t_{rr}}$

Temos duas equações que deduzem a corrente reversa máxima, a equação 4 e a 7, então, se aproximarmos o valor de 't_a' ao valor de 't_{rr}', porque na prática 't_b' pouco representa, portanto:

Equação 8: $t_a \times \frac{d_i}{d_t} = \frac{2 \times Q_{RR}}{t_{rr}} \rightarrow t_{rr}^2 = \frac{2 \times Q_{RR}}{\frac{d_i}{d_t}} \rightarrow t_{rr} = \sqrt{\frac{2 \times Q_{RR}}{\frac{d_i}{d_t}}}$

Ainda mantendo que 't_a' é aproximadamente 't_{rr}', então, trabalhando com a equação 8, se multiplicarmos os dois lados da equação por d_i/d_t, teremos:

Equação 9: $t_{rr} \times \frac{d_i}{d_t} = \sqrt{\frac{2 \times Q_{RR} \times \frac{d_i}{d_t}}{\frac{d_i}{d_t}}} \rightarrow t_a \times \frac{d_i}{d_t} = \sqrt{2 \times Q_{RR} \times \frac{d_i}{d_t}} \rightarrow I_{RR} = \sqrt{2 \times Q_{RR} \times \frac{d_i}{d_t}}$

Dependendo das características de recuperação e das técnicas de fabricação, os diodos de potência são classificados em três categorias, que são: os genéricos, de recuperação rápida e Schottky. As características e suas limitações, descritas em seu datasheet, restringem suas aplicações. Os diodos genéricos têm tempo de recuperação relativamente alto, quando comparados com os de rápida recuperação e os Schottky.

Os diodos retificadores genéricos são utilizados em aplicações de baixa velocidade, cujo tempo de recuperação reverso não é limitante. Um exemplo de aplicação são os retificadores que trabalham na frequência de rede. Esses diodos são geralmente fabricados por difusão.

Os diodos de recuperação rápida têm tempo de recuperação reverso baixo. São usados em conversores CC/CA e CC/CC, cuja recuperação rápida é determinante. Esses diodos também são fabricados por difusão e o tempo de recuperação reverso é controlado pela difusão de platina e ouro.

Os diodos Schottky têm tempo de recuperação reverso baixo. O armazenamento de cargas em sua junção é eliminado, ou minimizado, fazendo-se uma barreira de potencial com um contato entre um metal e um semiconductor. Uma camada de metal é depositada em uma fina camada epitaxial de silício do tipo 'n'. A barreira de potencial simula o comportamento da junção 'PN'. Normalmente esses diodos não suportam tensões reversas altas.

Monte o circuito no LTspice e vamos simular uma condição que provoque uma corrente reversa devido o tempo de recuperação do diodo. O diodo escolhido foi o 'RR1VWM4S' da Rohm, categoria genérico, tipo retificador, tensão de ruptura 400 Volts e corrente máxima de condução um (1) amper. Esse diodo faz parte da biblioteca padrão do LTspice.

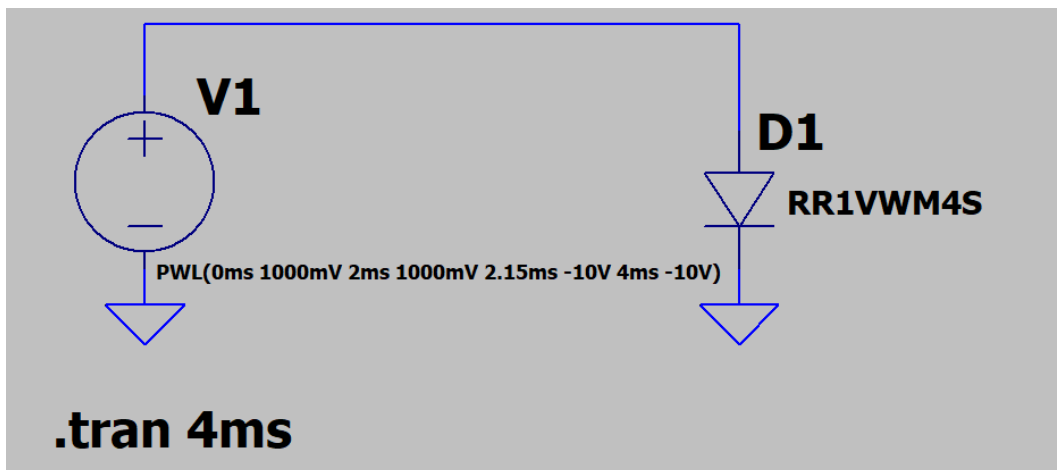


Figura 5 – Análise de tempo de recuperação reverso de um diodo genérico

Observe a seguir que a fonte V1, em dois (2) milissegundos, rapidamente foi de 1 Volt para -10 Volts, então, surgiu um pico de corrente reversa, conforme podemos ver no gráfico de corrente.

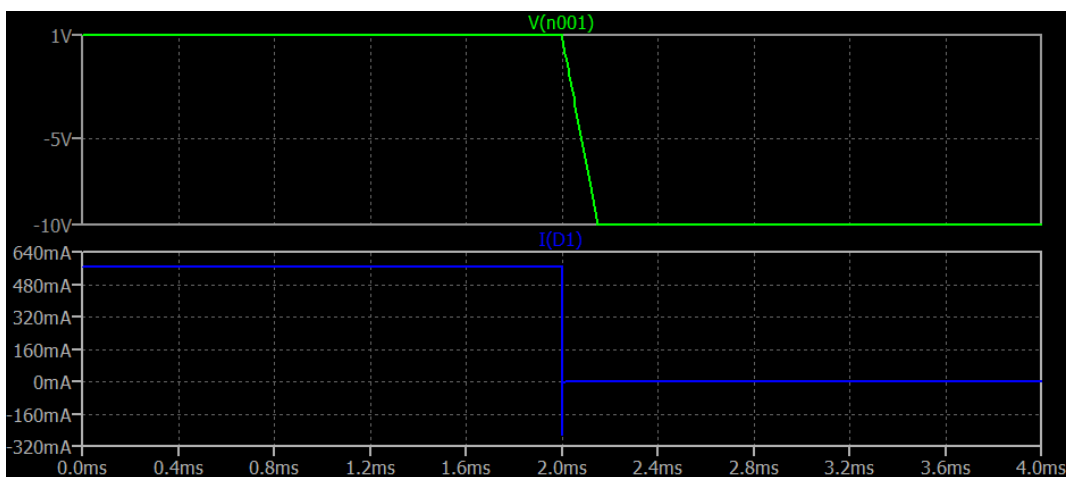


Figura 6 – Formas de onda de tensão e corrente no diodo.

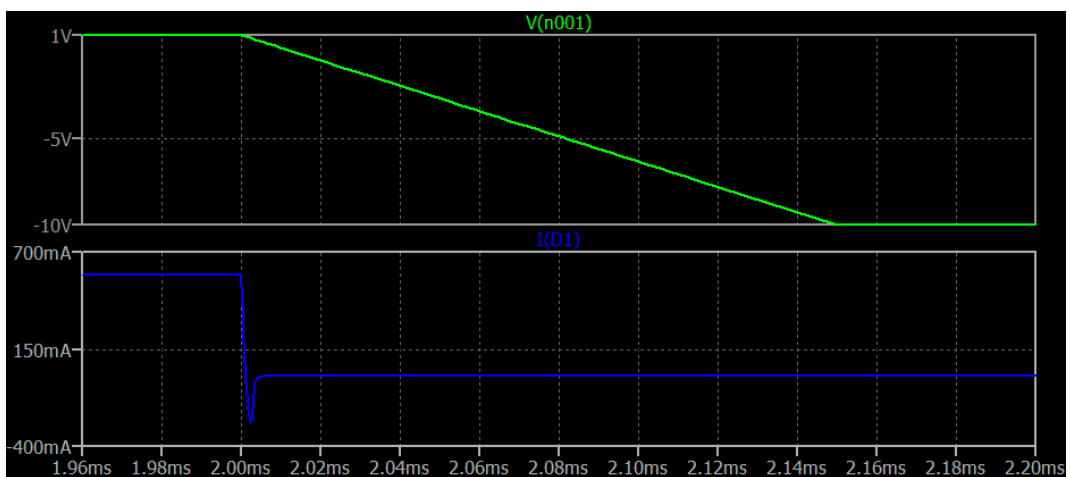


Figura 7 – Zoom para visualizar o pico de recuperação reverso.

Para o artigo não ficar extenso vamos encerrando por aqui. Como se trata de uma série continuaremos com assuntos relacionados, como por exemplo, modelagem spice para diodo de potência e comparação entre diodos de potência, com relação aos tempos de recuperação reverso.