Díodo: Regime Dinâmico

(Texto apoio ao laboratório)

Introdução

Quando se estabelece num circuito uma tensão ou corrente variáveis no tempo o ponto de funcionamento em repouso do díodo também vai variar no tempo. A frequência e amplitude do sinal são determinantes no comportamento do díodo cuja resposta está limitada pela evolução das minorias. No caso em que as grandezas variam bruscamente no tempo terse-á o regime de comutação. Quando as grandezas possuem amplitudes pequenas e variam continuamente em torno dum valor constante pode, em geral, representar-se o díodo de junção por um modelo incremental equivalente envolvendo resistências, condensadores e bobinas cujos valores dependem do ponto de funcionamento em repouso.

Modelo incremental

Condutância incremental

Para frequências baixas, em regime quase-estacionário, a relação corrente-tensão do díodo pode ser aproximada pela característica estática I(U). No caso particular de pequenos sinais a característica estática pode ser linearizada em torno do ponto de funcionamento em repouso. O desenvolvimento em série da corrente *I*, em torno do ponto de funcionamento em repouso, $PFR(U_0, I_0)$, é dado por

$$I = I_0 + \left(\frac{\partial I}{\partial U}\right)\Big|_{PFR} \left(U - U_0\right) + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial U^2}\right)\Big|_{PFR} \frac{\left(U - U_0\right)^2}{2!} + \cdots$$

Define-se a condutância incremental

$$g_0 = \left(\frac{\partial I}{\partial U}\right)_{PFR} = \frac{I_{is}e^{\frac{U_0}{nu_T}}}{nu_T} = \frac{I_0 + I_{is}}{nu_T}$$

que representa o declive da curva I(U) no ponto de funcionamento em repouso.

Por sua vez

$$\left(\frac{\partial^2 I}{\partial U^2}\right)_{PFR} = \frac{I_{is}}{\left(n u_T\right)^2} e^{\frac{U_0}{n u_T}} = \frac{g_0}{n u_T}$$

É fácil de verificar que as derivadas de ordem superior à primeira podem ser escritas como

$$\left(\frac{\partial^n I}{\partial U^n}\right)_{PFR} = \frac{g_0}{\left(n \, u_T\right)^{n-1}}$$

pelo que

$$\Delta I = g_0 \Delta U + g_0 \frac{\Delta U^2}{2! n u_T} + g_0 \frac{\Delta U^3}{3! (n u_T)^2} + \cdots$$

Para pequenas variações, i.e. $\Delta U \ll n u_T$

$$\Delta I \simeq g_0 \Delta U.$$

Na polarização directa, com $I >> I_{is}, g_0 \simeq \frac{I_0}{n u_T}$ e portanto só depende da corrente no

circuito do díodo e da temperatura, i.e., a condutância incremental a uma dada temperatura é a mesma desde que a corrente no díodo seja a mesma. Na polarização inversa $I_0 = -I_{is}$ e portanto $g_0 = 0$. Em particular para $I_0 = 0$, $g_0 = \frac{I_{is}}{nu_T}$. Na Fig. 1 mostra-se, na característica

estacionária, a interpretação geométrica de g_0 para a polarização directa.



Fig. 1 – Interpretação gráfica da condutância incremental num díodo.

Na Fig.2 mostra-se o circuito incremental para o díodo, que é válido para baixas frequências e polarização direta.



Fig.2 Circuito incremetal para o díodo, baixas frequências e polarização direta.

Capacidades incrementais

Quando a frequência do sinal aumenta há que incluir os efeitos associados às variações da carga espacial com as variações da tensão, o qual pode ser traduzido por uma capacidade incremental ou diferencial. Esta capacidade incremental possui duas componentes: uma devida à variação de carga espacial na região de transição, que se designa por capacidade de transição e a outra relativa à variação das densidades de portadores nas zonas quase neutras junto à região de transição, designada por capacidade de difusão. Na polarização inversa o efeito capacitivo dominante é traduzido pela capacidade de transição enquanto que para a polarização directa se deve fundamentalmente à capacidade de difusão.

Capacidade de transição

A capacidade de transição é expressa através do quociente entre a variação de carga na região de transição e a variação da tensão que cai nessa região. No caso da junção p-n

$$C_t = -\frac{\delta Q_n}{\delta U}\Big|_{PFR}$$

em que Q_n é a carga positiva do lado *n* devida fundamentalmente às impurezas dadoras ionizadas. O sinal negativo deve-se ao facto de a tensão *U* estar por convenção dirigida de *p* para *n* e a carga $Q_n > 0$ estar do lado *n*.

Uma variação de tensão altera a largura da região de transição que se reflecte numa variação de carga de cada um dos lados da junção, Fig.3. Deste modo pode-se escrever

$$C_{t} = -\frac{\partial Q_{n}}{\partial U}\Big|_{PFR} = -\frac{dQ_{n}}{dx_{n}} \cdot \frac{dx_{n}}{dU}\Big|_{PFR}$$

ī.

Na hipótese de depleção total, válida para a polarização inversa,

$$Q_n = AqN_d^+ x_n$$
$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_C}{q} \frac{N_a}{N_d (N_a + N_d)}} \text{ com } V_C = V_{C0} - U$$

e

Deste modo

$$C_t = A \sqrt{\frac{q \mathcal{E} N_a N_d}{2 \left(N_a + N_d\right)}} \left(V_{C0} - U_0\right)^{-1/2}$$



Fig. 3 – Efeito de uma variação elementar $\delta U < 0$ na distribuição da densidade de carga $\rho(x)$ na região de transição.

É fácil de concluir que a capacidade de transição baixa quando a tensão de polarização inversa aumenta em módulo. Em equilíbrio termodinâmico a capacidade de transição vale $C_t(0)$ e é tanto maior quanto maior a densidade de dopante. Na Fig. 4 está representado o valor da capacidade de transição em função da tensão de polarização. Para tensões $U \simeq V_{C0}$ a aproximação de depleção total não é válida.



Fig. 4 – $C_t(U)$ para um díodo de junção abrupta. Para valores de U próximos de V_{co} a hipótese de depleção total deixa de ser válida.

Capacidade de difusão

Com polarização directa o excesso de portadores minoritários nas regiões *n* e *p*, junto à região de transição, dá origem a uma carga eléctrica que é directamente proporcional à corrente no díodo

$$Q_S = \tau_T I$$

em que a constante de proporcionalidade τ_T é designada por tempo de trânsito e é um parâmetro do modelo do díodo utilizado no programa de simulação de circuitos, SPICE. Definese capacidade de difusão

$$C_d = \frac{\delta Q_S}{\delta U} \bigg|_{PFR} \approx \tau_T \left. \frac{dI}{dU} \right|_{PFR}$$

e portanto

$$C_d = \frac{\tau_T I_{is} e^{U_0/nu_T}}{nu_T} = \tau_T g_0$$

O modelo incremental do díodo, envolvendo os efeitos capacitivos pode ser representado pelo circuito da Fig. 5(a) em que $C = C_d + C_t$. Este circuito pode ser simplificado, dependendo da zona de funcionamento do díodo e da frequência do sinal. Por exemplo, na polarização inversa, reduz-se à capacidade de transição C_t pois $g_0 = 0$ e $C_d = 0$. No caso das frequências muito elevadas (da ordem dos GHz) há efeitos indutivos que devem ser incluídos no modelo, Fig. 5(b).



Fig. 5 – Modelo incremental para o díodo: (a) nas frequências intermédias; (b) nas frequências muito altas.

Regime de comutação

1. Transitório de ligação

Considere-se o circuito representado na Fig. 6, utilizado para analisar o transitório de ligação.



Fig. 6 - Circuito utilizado para testar os transitórios no díodo.

Para t < 0 o interruptor está na posição "0" e portanto i = 0 e $u_D = 0$. Quando no instante t = 0 se fecha o interruptor, S muda para a posição "1", a corrente i sobe imediatamente para o valor final $I_F = \frac{E - u_D}{R} \simeq E/R$ desde que se admita que $u_D << E$. A evolução de u_D no tempo não é contudo instantânea já que a distribuição dos portadores minoritários leva algum tempo a atingir o valor final. A distribuição da densidade de minoritários do lado n e a evolução de u_D e i com o tempo estão representados na Fig. 7.

2. Transitório de corte

Considere-se que, com o díodo polarizado directamente, na situação estacionária, se inverte a polarização. No circuito da Fig. 6 corresponde a, no instante t = 0, mudar o interruptor da posição "1" para a posição "2".



Fig. 7 – Transitório de ligação para polarizar directamente o díodo: (a) evolução da densidade de buracos do lado n; (b) evolução de u_D e i no díodo.

A corrente que, para t < 0, era $I_F = (E - u_D)/R$ passa a ser em t = 0, $I_R = (-E - u_D)/R$. A esta alteração observada no sentido da corrente corresponde um ajuste da distribuição dos minoritários junto à região de transição de modo a garantir um declive positivo para a distribuição. Este andamento deve manter-se aproximadamente constante desde que u_D tome valores suficientemente baixos para que possam ser desprezados face a *E*. Quando u_D se torna negativo a junção fica polarizada inversamente e a densidade dos minoritários desce abaixo do valor de equilíbrio termodinâmico. A distribuição espacial dos portadores minoritários vai então evoluir até que se atinje um andamento que garante a corrente inversa de saturação. Na Fig. 8 mostra-se a evolução no tempo da densidade de buracos do lado *n*, da corrente e da tensão no díodo.



Fig. 8 – Transitório associado à passagem da polarização directa para a polarização inversa: (a) evolução da densidade de buracos do lado n; (b) evolução de u_D e i no díodo.

Como se vê do gráfico da Fig. 8(b), o transitório dura um tempo t_{rc} , que se designa por tempo de recuperação do corte. Este tempo envolve t_a , tempo de armazenamento, que está associado à remoção dos excessos presentes na polarização directa. A diminuição do tempo de vida dos portadores minoritários permite obter valores de t_{rc} mais baixos.

A comutação da polarização inversa para a polarização directa é mais rápida que a comutação em sentido contrário. A polarização zero aos terminais do dispositivo estabelece--se muito rapidamente porque as concentrações necessárias são as das minorias em equilíbrio termodinâmico. Após a tensão zero, pequenas variações de tensão conduzem a grandes variações das densidades de minoritários.