Problemas Nanodispostivos e Nanoeletrónica

Adriana Sofia Oliveira PG50160
Orlando Daniel Sousa da Cunha PG50672

November 29, 2022

1 A junção p^+n de Si em polarização directa e inversa

a) Calculo da corrente direta a 27 °C quando a tensão no díodo é de 0.6 V.

Para calcular a corrente direta no díodo, sabemos que:

$$J = J_{so} exp\Big(\frac{eV}{kT}\Big) + J_{ro} exp\Big(\frac{eV}{2kT}\Big) \tag{1.1}$$

Onde:

$$J_{so} = \Big[\Big(\frac{eD_h}{L_h N_d}\Big) + \Big(\frac{eD_e}{L_e N_a}\Big)\Big] n_i^2 \tag{1.2}$$

$$J_{ro} = \frac{en_i}{2}\Big(\frac{W_p}{\tau_e} + \frac{W_n}{\tau_h}\Big) \tag{1.3}$$

É então necessário calcular, quer a corrente de difusão, quer a de recombinação. Primeiramente vamos olhar para a corrente de difusão. Sabe-se da equação de Shockley que para o díodo ideal tem-se que:

$$J = J_{so}\Big[exp\Big(\frac{eV}{kT}\Big) - 1\Big] \tag{1.4}$$

Mas como $V >> \frac{kT}{e}$ pode-se fazer a seguinte aproximação:

$$J = J_{so} exp\Big(\frac{eV}{kT}\Big) \tag{1.5}$$

Podemos agora começar o cálculo da densidade de corrente de difusão e, para isso é necessário determinar J_{so}. De acordo com a equação 1.2 precisamos de saber os coeficientes de difusão dos eletrões e dos buracos, D_e e D_h respetivamente, e ainda os comprimentos de difusão dos eletrões e buracos. Comecemos pelos coeficientes de difusão. De acordo com a equação de Einstein tem-se que:

$$D_e = \frac{kT\mu_e}{e} \tag{1.6}$$

$$D_h = \frac{kT\mu_h}{e} \tag{1.7}$$

Para determinar os coeficientes de difusão é fundamental o conhecimento da mobilidade dos eletrões e dos buracos. Para isso observa-se cuidadosamente a Figura 1, a uma temperatura de aproximadamente 300K (27ºC).

Para uma concentração de $N_a = 5 \times 10^{17} cm^{-3}$ obtém-se uma mobilidade de eletrões $\mu_e = 1350 cm^2V^{-1}s^{-1}$. E para uma concentração de $N_d = 2 \times 10^{15} cm^{-3}$ obtém-se uma mobilidade de buracos $\mu_e = 480 cm^2V^{-1}s^{-1}$.

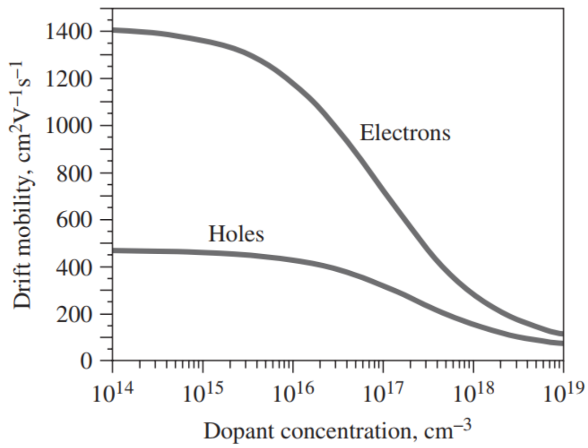

Figure 1: Variação da mobilidade de drift com a concentração dos dopantes no Si para os eletrões e para os buracos a 300k.

Substituindo nas equações 1.6 e 1.7 esses valores e tendo em conta a TABELA XXX determina-se que:

$$D_e = \frac{1.38 \times 10^{-23}(J/K) \times 300(K) \times 1350(cm^2V^{-1}s^{-1})}{1.602 \times 10^{-19}(C)} = 34.888cm^2/s \tag{1.8}$$

$$D_h = \frac{1.38 \times 10^{-23}(J/K) \times 300(K) \times 480(cm^2V^{-1}s^{-1})}{1.602 \times 10^{-19}(C)} = 12.404cm^2/s \tag{1.9}$$

Posto isto, já se tem todos os valores necessários para obter o comprimento de difusão dos eletrões e dos buracos.

$$L_e = \sqrt{D_e\tau_e} = \sqrt{34.888(cm^2/s) \times 50 \times 10^{-9}(s)} = 1.321 \times 10^{-3}cm \tag{1.10}$$

$$L_h = \sqrt{D_h\tau_h} = \sqrt{12.404(cm^2/s) \times 400 \times 10^{-9}(s)} = 2.227 \times 10^{-3}cm \tag{1.11}$$

Utilizando a equação 1.2 pode-se obter que:

$$J_{so} = \Big[\Big(\frac{1.602 \times 10^{-19} \times 34.888}{1.321 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{17}}\Big) + \Big(\frac{1.602 \times 10^{-19} \times 12.404}{2.227 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{15}}\Big)\Big](1.5 \times 10^{10})^2 =$$

$$J_{so} = 1.023 \times 10^{-10} A/cm^2 \tag{1.12}$$

Uma vez calculada a corrente de difusão resta calcular a corrente de recombinação. Para tal vai ser utilizada a segunda parte da equação 1.1. Começamos por calcular o valor de built-in potential, que por sua vez vai ser utilizado para determinar a largura da junção, que por fim se utiliza para obter a corrente de recombinação.

$$V_0 = \Big[\Big(\frac{kT}{e}\Big)ln\Big(\frac{NdNa}{n_i^2}\Big)\Big] = \Big[\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.602 \times 10^{-19}}ln\Big(\frac{2 \times 10^{15} \times 5 \times 10^{17}}{(1.5 \times 10^{10})^2}\Big)\Big] = 0.753V \tag{1.13}$$

$$W = \Big[\frac{2\epsilon(N_a + N_d)(V_0 - V)}{eN_aN_d}\Big]^{1/2} = \Big[\frac{2 \times 1.036 \times 10^{-12}(2 \times 10^{15} + 5 \times 10^{17})(0.753 - 0.6)}{1.602 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{15} \times 5 \times 10^{17}}\Big]^{1/2} =$$

$$W = 3.152 \times 10^{-5} cm \tag{1.14}$$

Sabendo o valor do W é possível determinar W_n e W_P através das seguintes equações:

$$W = W_n + W_p \tag{1.15}$$

$$N_a W_n = N_d W_p \tag{1.16}$$

Fazendo uma pequena manipulação das equações anteriores obtem-se a seguinte igualdade:

$$W_n = \frac{N_a W}{N_a + N_d} = 3.139 \times 10^{-5} cm \tag{1.17}$$

$$W_p = \frac{N_d W}{N_a + N_d} = 1.256 \times 10^{-7} cm \tag{1.18}$$

Temos, portanto, todos os valores necessários para calcular a densidade de corrente de recombinação:

$$J_{ro} = \frac{e n_i}{2} \left(\frac{W_p}{\tau_e} + \frac{W_n}{\tau_h} \right) = 9.731 \times 10^{-8} A/cm^2 \tag{1.19}$$

Tendo os valores de densidade de corrente de recombinação e de difusão é possível obter a densidade de corrente total:

$$J = J_{so} e^{\frac{eV}{kT}} + J_{ro} e^{\frac{eV}{kT}} = 1.239 + 0.011 = 1.250 A/cm^2 \tag{1.20}$$

Uma vez que a corrente de recombinação é muito pequena pode ser desprezada, tal como sugerido no enunciado. No entanto, uma vez calculada decidimos deixar nos nossos cálculos para tornar os mais exatos. Para obter a corrente basta multiplicar pela área :

$$I = J = 1.250 \times 0.1 \times 10^{-2} = 1.25 mA \tag{1.21}$$

b) Estimativa da corrente direta a 57 °C quando a tensão no díodo é de 0.6 V.

c) Qual é a corrente inversa a 27°C quando a tensão do díodo é -5V.

No caso da corrente inversa a equação para calcular a densidade de corrente é diferente:

$$J_{rev} = n_i^2 \left(\frac{e D_h}{L_h N_d} + \frac{e D_e}{L_e N_e} \right) + \frac{e W n_i}{\tau_g} \tag{1.22}$$

Como a temperatura é a mesma da alínea a), a concentração de aceitadores e dadores, mobilidades, coeficientes e comprimentos de difusão dos eletrões e dos buracos não se alteram, a equação anterior pode ser expressa através da equação 1.23:

$$J_{rev} = J_{so} + \frac{e W n_i}{\tau_g} \tag{1.23}$$

Onde $\tau_g = 2 \mu s$ é o tempo de geração térmica na região de depleção. Vamos então recalcular o W sendo que desta vez V = -5V, para isso utiliza-se a equação 1.14:

$$W = 1.93 \times 19^{-4} cm \tag{1.24}$$

Utilizando o resultado das equações 1.12 e 1.24 temos que:

$$J_{rev} = 1.023 \times 10^{-10} + \frac{1.602 \times 10^{-19} \times 1.93 \times 10^{-4} \times 1.5 \times 10^{10}}{2 \times 10^{-6}} = 2.320 \times 10^{-7} A/cm^2 \tag{1.25}$$

O que nos dá uma corrente inversa de:

$$I_{rev} = 2.320 \times 10^{-7} \times 0.1 \times 10^{-2} = 2.32 \times 10^{-10} A \tag{1.26}$$

d) Estime a corrente inversa a 57°C quando a tensão do díodo é –5V.

2 Capacidade da junção p-n

A capacidade de uma junção Si p^+n abrupta em polarização inversa é dada pela seguinte equação:

$$C_{dep} = \frac{A\epsilon}{W} = \frac{A}{(V_0 - V)^{1/2}} \left[\frac{e\epsilon(N_a N_d)}{2(N_a + N_d)}\right]^{1/2} \tag{2.1}$$

Sabendo que a junção é p^+n podemos admitir pelo + que o semicondutor tem o lado p mais dopado que o lado n, logo $N_a >> N_d$. Também por estar inversamente polarizada, conclui-se que na junção $V = -V_r$. Com isto a equação 2.1 transforma-se na seguinte equação:

$$C_{dep} = \frac{A\epsilon}{W} = \frac{A}{(V_0 + V_r)^{1/2}} \left[\frac{e\epsilon N_d}{2}\right]^{1/2} \tag{2.2}$$

Sendo que queremos obter o gráfico de $1/C^2$ em função de V_r a equação anterior tem de ser rearranjada:

$$\frac{1}{C_{dep}^2} = \frac{2V_r}{e\epsilon N_d A^2} + \frac{2V_0}{e\epsilon N_d A^2} \tag{2.3}$$

Com a ajuda de Python foi possível obter a figura 2, onde está representado o gráfico do $1/C^2$ em função de V_r. Sendo que a equação 2.3 é do estilo $y = ax + b$, onde $y = 1/C^2$ e $x = V_r$, é possível determinar o declive e a ordenada na origem através da equção da reta. Novamente em Python foram feitos os devidos cálculos e obteve-se que $a = 3.77 \times 10^{20}$ e $b = 3.12 \times 10^{20}$.

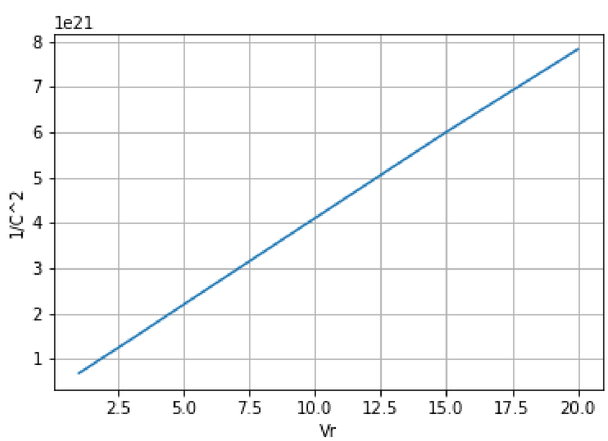

Figure 2: Gráfico $1/C^2(V_r)$

É fácil de perceber que para se obter o valor de V_0 é so encontrar o ponto onde o gráfico interceta o eixo dos XX, e como neste caso $V_r = -V_0$, tem-se que:

$$0 = 3.77 \times 10^{20} V_r + 3.12 \times 10^{20} <=> V_r = V_0 = -0.83V. \tag{2.4}$$

Para se obter o valor de N_d basta igualar o segundo termo da equação 2.3 a b.

$$N_d = \frac{2}{be\epsilon A^2} \tag{2.5}$$

$$N_d = \frac{2}{(3.77 \times 10^{20})(1.602 \times 10^{-19})(11.9)(8.85 \times 10^{-12})(500 \times 10^{-6})^4} = 5.01 \times 10^{15} cm^{-3} \tag{2.6}$$

Só falta agora calcular o N_a e para tal vamos utilizar a equação 1.13 a 300K em função de N_a,. Temos então que $N_a = 3.12 \times 10^{18} cm^{-3}$.

3 Junção p-n linearmente calibrada e abrupta

a)

b)

c)

d)

4 O efeito da iluminação no desempenho da célula solar

Das aulas teóricas sabemos que uma junção perante iluminação tem uma corrente elétrica de acordo com a seguinte equação:

$$I = -I_{ph} + I_0 \Big[exp\Big(\frac{eV}{\eta kT}\Big) - 1 \Big] \tag{4.1}$$

Onde I_{pH} é a corrente proveniente da intensidade da luz AM1.5 e a outra componente a corrente da junção. Uma vez que estamos perante um circuito aberto a intensidade da corrente elétrica é nula, $I = 0$, então:

$$V_{oc} = \frac{\eta kT}{e} ln\Big(\frac{I_{ph}}{I_o}\Big) \tag{4.2}$$

Como I_{ph} depende da intensidade de luz, então $I_{ph} = KI$, pelo que a variação de V_{oc} é :

$$V_{oc2} - V_{oc1} = \frac{\eta kT}{e} ln\Big(\frac{I_{ph2}}{I_{ph1}}\Big) = \frac{\eta kT}{e} ln\Big(\frac{I_2}{I_1}\Big) \tag{4.3}$$

Sendo $\eta = 1$ e $T = 300K$, a nova tensão de circuito aberto é:

$$V_{oc2} = V_{oc1} + \frac{\eta kT}{e} ln\Big(\frac{I_2}{I_1}\Big) = (0.65V) + (0.025V) ln\Big(\frac{1}{2}\Big) = 0.63V \tag{4.4}$$

Como a única fonte de corrente é a luz então a corrente de curto circuito é igual à photocorrente, assim quando a intensidade de circuito é reduzida para metade temos:

$$I_{sc2} = I_{sc1} \frac{I_2}{I_1} = (50mA)\Big(\frac{1}{2}\Big) = 25mA \tag{4.5}$$

5 A resistência em série

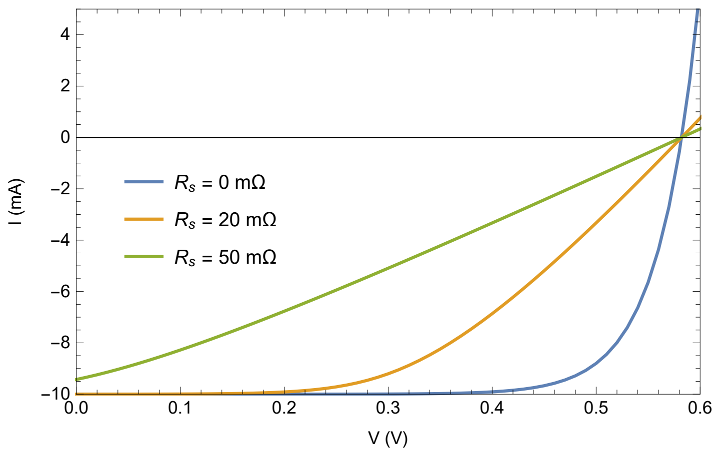

Figure 3: Gráfico $IvsV$ para várias R_s

6 A resistência em paralelo

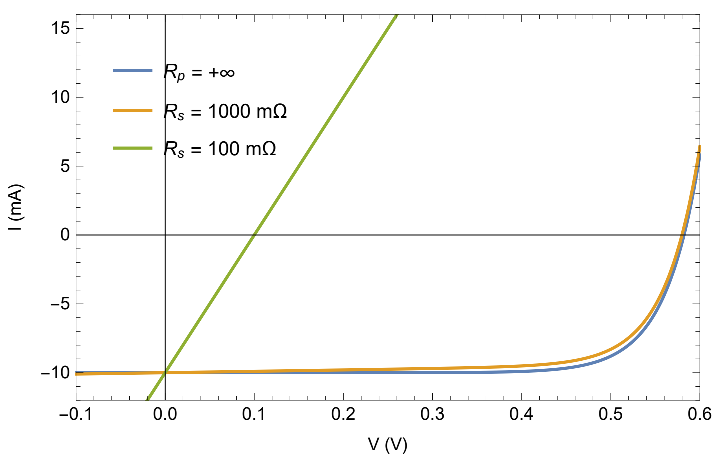

Figure 4: Gráfico $IvsV$ para várias R_p