

5 Problemas para avaliação: P2, P4, P5, P9, P10 e P11.

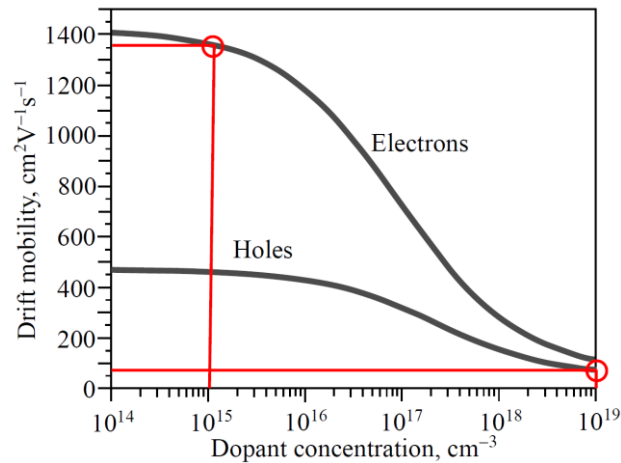
7 Problemas para estudo: P1, P3, P6, P7, P8, e P12.

P1 - A corrente na junção p-n em polarização directa

Considere um díodo de junção *p-n* de silício com concentração de impurezas dadoras e aceitadoras $N_d = N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. O díodo é polarizado directamente à temperatura ambiente e há uma queda de tensão de 0.6 V através dele. A área da secção transversal do díodo é de 0.5 mm^2 . O tempo de recombinação de portadores minoritários depende da concentração de dopantes, $N_{\text{dopant}} (\text{cm}^{-3})$, através da seguinte relação aproximada:

$$\tau \approx \frac{5 \times 10^{-7}}{(1 + 2 \times 10^{-17} N_{\text{dopant}})}$$

A dependência da mobilidade de deriva dos portadores minoritários na concentração de dopante é dada no gráfico seguinte (as linhas e círculos vermelhos são apenas para ilustrar um par de leituras do gráfico).



Calcule a contribuição da corrente de recombinação para a corrente total do díodo.

P2 - A junção *p⁺n* de Si em polarização directa e inversa (avaliação)

Considere um díodo longo de junção abrupta *p⁺n* de silício com concentração de impurezas dadoras do lado *n* e aceitadoras do lado *p*, $N_d = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ e $N_a = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Os tempos de recombinação de portadores minoritários são $\tau_h \approx 400 \text{ ns}$ para buracos do lado *n* e $\tau_e \approx 50 \text{ ns}$ para electrões do lado *p⁺*. A área da secção transversal do díodo é de 0.1 mm^2 . O tempo de geração térmica na região de depleção é $2 \mu\text{s}$. Suponha que a corrente inversa é dominada pela taxa de geração térmica na região de depleção.

- Calcule a corrente directa a 27°C quando a tensão no díodo é de 0.6 V.
- Estime a corrente directa a 57°C quando a tensão no díodo ainda é 0.6 V.
- Qual é a corrente inversa a 27°C quando a tensão do díodo é -5V.
- Estime a corrente inversa a 57°C quando a tensão do díodo é -5V. Nota: Suponha que a corrente directa seja determinada pela equação de Shockley (difusão de portadores minoritários).

P3 – Junção p-n de GaAs em polarização directa

Considere uma junção p-n de GaAs dopada com $N_a = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ no lado p e $N_d = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ no lado n. Num semiconductor de *bandgap* directo a recombinação é directa (radiativa, *band-to-band*) e indirecta (não-radiativa, através de centros de recombinação). O coeficiente de recombinação directa é $B \approx 2 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a sua relação com o tempo de vida dos portadores minoritários é $Bn_{no} = \frac{1}{\tau_h}$ para o caso de buracos e *mutatis mutandis* para electrões. A área da secção transversal é $A = 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. O tempo de recombinação indirecta (não radiativa) é de aproximadamente 200 e 150 ns para electrões e buracos, respectivamente. Quais são a corrente de difusão nas regiões neutras do díodo e a de recombinação na região de carga espacial a 300 K quando a tensão de polarização directa é 0.80 V? A mobilidade de electrões e buracos é $\mu_e = 0.4504 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e $\mu_h = 0.0430 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

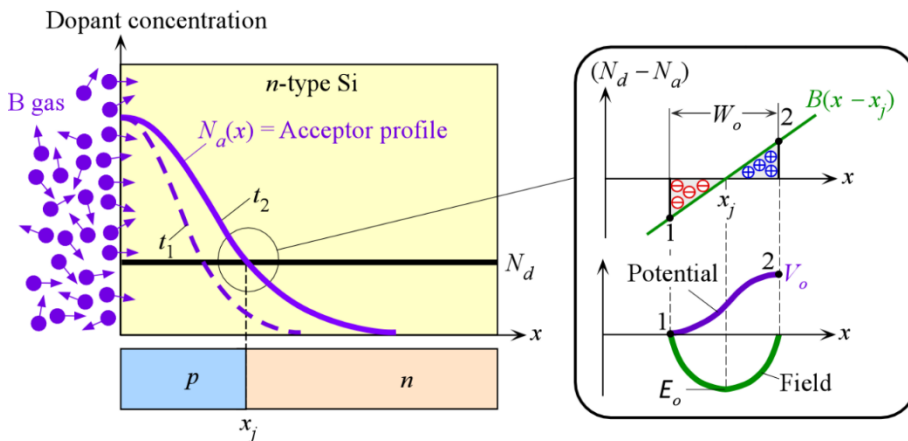
P4 – Capacidade da junção p-n (avaliação)

A capacidade (C) de uma junção Si p⁺n abrupta em polarização inversa foi medida em função da tensão de polarização inversa, V_r , conforme indicado na Tabela seguinte. A área da secção transversal da junção p-n é $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$. Traçando o gráfico $1/C^2$ versus V_r , obtenha o potencial intrínseco, V_o , e a concentração de dadores, N_d , na região n. Qual é o valor de N_a ?

Tabela – Capacidade para diversos valores da tensão de polarização inversa (V_r)

V_r (V)	1	2	3	5	10	15	20
C (pF)	38.3	30.7	26.4	21.3	15.6	12.9	11.3

P5 – Junção p-n linearmente calibrada e abrupta (avaliação)



A figura mostra uma junção **linearmente calibrada** de aceitadores (B) numa bolacha de Si tipo n. $N_a(x)$ é o perfil de aceitadores para tempos arbitrários de difusão dos átomos do gás B no silício. Ao fim do tempo t_2 ($> t_1$) as concentrações de dadores e de aceitadores são iguais em $x = x_j$. O processo é terminado para o valor desejado de x_j . A concentração líquida de dopantes é $(N_d - N_a)$, e numa vizinhança de x_j depende linearmente de x : $N_d - N_a = Bx$.

- a) Sendo V a tensão aos terminais do dispositivo, mostre que o campo na junção, E_{\max} , e a largura da região de depleção, W , são dados por $E_{\max} = -\frac{eBW^2}{8\epsilon}$ e $V_o - V = \frac{eBW^3}{12\epsilon}$.

- b) Usando as equações anteriores e $V_o = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{BW_o}{2n_i} \right)^2$ mostre que

$$W_o^2 = \frac{6\epsilon V_o}{en_i \exp(eV_o / 2kT)}.$$

- c) Considere uma junção Si $p-n$ calibrada linearmente em que $V_o = 0.60$ V. Quais são B e W_o para este dispositivo? Quanto vale $N_d - N_a$ no final da região de depleção em $x = W_o/2$?
- d) Compare os resultados de c) com a largura da camada de depleção e as concentrações de dopantes para o dispositivo de junção abrupta com idêntico valor de $V_o = 0.60$ V.

P6 – Injecção de portadores minoritários e corrente DC em díodos longos e curtos

Considere uma junção $p-n$ unilateral (com dopagem p^+ muito maior no lado p). Os portadores minoritários injectados (buracos) representam um excesso de carga Q_h na região neutra. (Também há excesso de carga de portadores maioritários, de modo que a região é neutra.)

- a) Mostre que $Q_h = I\tau_h$ para um díodo longo e $Q_h = I\tau_t$ para um díodo curto. τ_h e τ_t são os tempos de difusão ou de trânsito para os buracos ao longo da espessura da região tipo- n neutra, i.e., $\tau_t = \ell_n^2 / 2D_n$.

- b) Mostre que a capacidade difusiva nos dois casos é dada por $r_d C_{\text{diff}} = \tau_h$ para o díodo longo e por $r_d C_{\text{diff}} = \tau_t$ para o díodo curto. Compare os resultados.

P7 – A tensão intrínseca num semiconductor inomogéneo

Considere um semiconductor tipo n que é dopado não uniformemente com uma distribuição de impurezas dadoras $N_d(x)$. Mostre que o campo elétrico induzido no semiconductor em equilíbrio térmico denominado campo elétrico intrínseco, $E(x)$, é dado por:

$$E(x) = - (kT/q) \cdot (1/N_d(x)) \cdot dN_d(x)/dx$$

Dica: a relação entre o campo interno e a distribuição de dopantes pode ser entendida por meio do diagrama de bandas de energia construído tomando o nível de Fermi, E_F , como nível de referência e assumindo que todos os átomos de impureza são ionizados e que nenhuma parte do semiconductor é degenerado. A expressão desejada deriva da relação entre a energia do *midgap*, E_i , e a energia de Fermi, E_F .

P8 – Estudo de uma célula solar de silício

Considere uma célula solar de junção n^+-p de silício com um emissor degenerado ($N_d > 10^{19}$ cm⁻³) e um substrato dopado, com N_a entre 10^{15} cm⁻³ and 10^{18} cm⁻³. Assuma a concentração de portadores intrínsecos à temperatura ambiente $n_i = 1.5 \times 10^{10}$ cm⁻³, $L_n = 100$ μm, $D_n = 36$ cm²/s, e $I_L/A = 35$ mA/cm² onde A é a área da célula solar. Esses valores são considerados independentes da concentração de dopagem N_a .

- a. Determine a densidade de corrente de saturação I_0/A da junção n^+-p em função de N_a .
- b. A partir da corrente total do díodo sob iluminação em função da corrente gerada pela luz I_L , deduza uma expressão para a tensão de circuito aberto V_{oc} da célula solar.
- c. Calcule a tensão de circuito aberto *versus* a dopagem do substrato para $N_a = 10^{15}$ cm⁻³, 10^{16} cm⁻³, 10^{17} cm⁻³ and 10^{18} cm⁻³ sob iluminação AM1.5 (100 mW/cm²). Existe algum limite para esta evolução da tensão em circuito aberto?

P9 – O efeito da iluminação no desempenho da célula solar (avaliação)

Uma célula solar sob iluminação AM1.5 tem uma corrente de curto-circuito, $I_{sc} = 50$ mA e uma tensão de circuito aberto, $V_{oc} = 0.65$ V. Quais são a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto quando a intensidade da luz é reduzida pela metade? (Assuma o factor de idealidade do díodo, $\eta = 1$)

P10 – A resistência em série (avaliação)

A resistência em série causa uma queda de tensão quando uma corrente é extraída de uma célula solar. Se V for a tensão real na saída da célula solar (medida pelo utilizador), então a tensão no díodo é $V - IR_s$. Baseado no diagrama do circuito equivalente, trace os gráficos de I vs. V para uma célula solar de Si com $\eta = 1.5$ e $I_o = 3 \times 10^{-6}$ mA para uma iluminação que gera na célula $I_{ph} = 10$ mA, para os valores de $R_s = 0, 20$ and 50Ω . Comente os resultados em termos do desempenho da célula solar.

P11 – A resistência em paralelo (shunt) (avaliação)

Considere a resistência *shunt* R_p de uma célula solar. Sempre que houver uma tensão V aos terminais da célula solar, a resistência *shunt* atrai uma corrente V/R_p . Baseado no diagrama do circuito equivalente, trace os gráficos de I vs. V para uma célula solar de Si com $\eta = 1.5$ e $I_o = 3 \times 10^{-6}$ mA para uma iluminação que gera na célula $I_{ph} = 10$ mA, para os valores de $R_p = \infty, 1000, 100 \Omega$. Comente os resultados em termos do desempenho da célula solar.

P12 – Células solares ligadas em série

Considere duas células solares idênticas ligadas em série. Existem duas resistências R_s em série e duas junções $p-n$ em série. Se I for a corrente total através dos dispositivos, então a queda de tensão em cada junção $p-n$ é $V_d = \frac{1}{2}[V - I(2R_s)]$. Assuma que as células solares têm as seguintes propriedades: $\eta = 1.5$ e $I_o = 25 \times 10^{-6}$ mA, $R_s = 20 \Omega$ e estão sob idêntica iluminação, de modo que $I_{ph} = 10$ mA.

- Trace as características I - V das células individuais e as das duas células em série.
- Qual é a potência máxima que pode ser fornecida por cada célula e pelas duas células em série?
- Quais são a tensão e a corrente correspondentes no ponto de potência máxima?