

- 1) Em certas transições entre níveis de energia das órbitas no hidrogênio obtêm-se fótons de radiação visível (400 a 600nm). Quais são estas transições? Sugestão: começar com a energia de ionização (n, ∞).
- 2) Calcule as radiações que correspondem a energia de formação do par elétron-lacuna (E_G , 1,1eV) e de ionização de impurezas (E_i , 100 meV) e compare com a faixa visível da radiações eletromagnéticas.
- 3) Calcule a concentração de elétrons livres e lacunas num cristal de silício com N_A no valor de 10^{16} cm^{-3} , a 290 K; calcule em seguida a resistividade deste material.
- 4) Numa chave digital MOS, do tipo canal N, a concentração de elétrons no canal é, em média, 10^{17} cm^{-3} ($V_{PS} > V_{TH}$). Calcule a resistência elétrica do canal, supondo uma espessura de $0,05 \mu\text{m}$ e escolhendo as outras dimensões (largura e comprimento do canal).
- 5) Descreva (qualitativamente) no que consistem as condições de Boltzmann na análise de uma junção PN.

E_f (energia de cada fóton) = $h \nu$ (frequência da radiação)

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s} \quad (1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}) \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$E_f = m_f c^2 \quad \square \quad m_f = E_f / c^2 \quad r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m_0 q^2}$$

$$p_f = m_f c = E_f / c = h \nu / c \quad \square \quad p_f = h / \lambda$$

$$m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad E_n = \frac{-0,5}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r_n}$$

$$\lambda_e = h / p_e \quad E_{cin} = -0,5 E_{pot} \quad m = m_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

$$\epsilon_r \text{ tem o valor de 12 para o silício monocristalino} \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$E_{th} = 3/2 \cdot kT \quad (k \text{ é a constante de Boltzmann, } 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$$

$$\text{Luz visível: 400 a 600nm } (\lambda) \quad kT/q \text{ (290K)} = 25 \text{ mV}$$

$$\bar{n} \cdot \bar{p} = n_i^2 (T) \quad n_i^2(T) = A \cdot T^3 \cdot \exp(-E_G/kT) \quad n_i^2(290 \text{ K}) = 10^{20} \text{ cm}^{-6}$$

$$\bar{p}_P = \frac{N_A}{2} + \sqrt{\frac{N_A^2}{4} + n_i^2} \quad \vec{J}_{nDER} = -q \cdot \vec{v}_n \cdot \bar{n} = q \cdot \mu_n \cdot \bar{n} \cdot \vec{E} \quad \rho = R \cdot (\Delta x \cdot W) / L$$

$$\sigma \text{ (condutividade)} = \frac{J_{DER}}{E} = q (\mu_n \bar{n} + \mu_p \bar{p}) \quad \mu_n = 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s}) \quad [\mu_p \text{ a metade disso}]$$

043685(B)

Gabriel Roneiro

9,5

x

$$1. E_{400} = \frac{hc}{400 \cdot 10^{-9}} = \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}} = 3,105 \text{ eV}$$

$$E_{600} = \frac{hc}{600 \cdot 10^{-9}} = \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{600 \cdot 10^{-9}} = 2,07 \text{ eV}$$

As transições que liberam fótons de radiação visível devem liberar energia entre 3,105 eV e 2,07 eV: $2,07 < |\Delta E| \leq 3,105$

As energias em cada nível são dadas por:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{onde } E_1 \text{ é a energia no nível 1 (13,6 eV)}$$

Portanto:

$$\begin{aligned} E_1 &= -13,6 \text{ eV} & E_2 &= -3,4 \text{ eV} & E_3 &= -1,5 \text{ eV} & E_4 &= -0,85 \text{ eV} \\ E_5 &= -0,54 \text{ eV} & E_6 &= -0,38 \text{ eV} & E_7 &= -0,28 \text{ eV} & E_8 &= -0,21 \text{ eV} \dots \\ \dots \lim_{n \rightarrow \infty} E_n &= 0 \end{aligned}$$

Observa-se que a transição do elétron no estado livre (E_∞) para qualquer camada não gera radiação visível.

Note-se que apenas as transições dos níveis 4, 5 e 6 para o nível 2 geram radiação visível, como mostram os cálculos:

$$|E_5 - E_2| = 2,86 \text{ eV} \rightarrow \text{Dentro da faixa de radiação visível.}$$

$$|E_4 - E_2| = 2,55 \text{ eV} \rightarrow \text{Também está dentro dessa faixa.}$$

$$|E_6 - E_2| = 3,02 \text{ eV} \rightarrow 2,07 < |E_6 - E_2| \leq 3,105$$

As transições de 7 e 3 para 2 têm radiações próximas à faixa visível.

$$|E_3 - E_2| = 1,9 \text{ eV} \quad |E_3 - E_2| < 2,07 \text{ eV}$$

$$|E_7 - E_2| = 3,12 \text{ eV} \quad |E_7 - E_2| > 3,105 \text{ eV}$$

2.

$$2. E_g = 1,1 \text{ eV}$$

circuito ligado

(A) 126,5

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} = \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,1} = 1129 \text{ nm} //$$

$$E_i = 100 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$$

$$\lambda_i = \frac{hc}{E_i} = \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,1} = 12420 \text{ nm} //$$

Observa-se que ambas as radiações estão bem além do feixe visível, no infra-vermelho.

$$3. N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad T = 290 \text{ K}$$

$$\bar{N}_a \approx N_a \rightarrow \bar{p} \approx \bar{N}_a \rightarrow \bar{p} = 10^{16} \text{ cm}^{-3} //$$

$$\bar{n} = \frac{n_i^2}{N_a} = \frac{10^{20}}{10^{16}} = 10^4 \text{ cm}^{-3} //$$

Então:

$$\bar{n} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$\bar{p} = 10^{16} \text{ cm}^{-3} //$$

A resistividade é encontrada por:

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n \bar{n} + \mu_p \bar{p})} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} (10^3 \cdot 10^4 + 10^{16} \cdot 0,5 \cdot 10^3)} = 0,8$$

$$\rho = 1,25 \text{ } \Omega / \text{cm} //$$

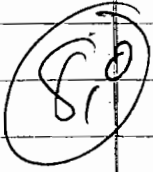
4. $\bar{n} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

A chave está polarizada na inversão. Pode-se considerar que não há lacunas na região do canal.

$$\rho = \frac{1}{q \mu_n \bar{n}} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3 \cdot 10^{17}} = 0,0625 = 62,5 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{cm}$$



Dada a espessura Δx 0,5 μm largura W 10 μm e comprimento L 0,05 μm $= 0,05 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$



$$R = \frac{\rho L}{\Delta x \cdot W} = \frac{0,0625 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 125000 \Omega$$

A resistência do canal suposto é $R = 125 \text{ k}\Omega$

5. As condições de Boltzmann basicamente definem que as correntes de difusão na junção se anulam com as correntes de deriva geradas no bipolo sem polarização externa, fazendo com que não haja corrente em qualquer ponto do bipolo.



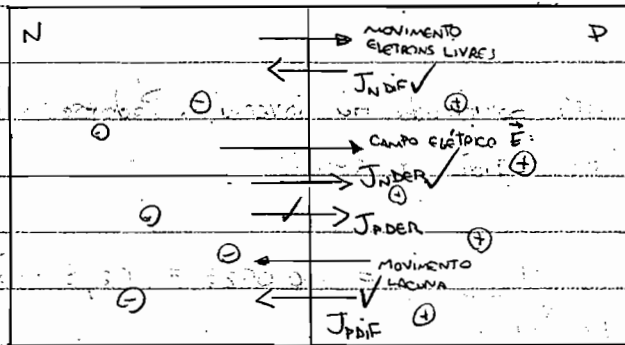
As correntes de difusão citadas surgem graças às diferenças de concentração nos dois lados da junção. Enquanto a parte N tem elétrons livres sobrando, a parte P tem lacunas em excesso.

A corrente de difusão é então formada em parte pelo movimento de elétrons de N para P (corrente de P para N) e outra parte pelo movimento de lacunas de P para N (corrente de P para N).

Essas correntes de difusão têm seu efeito anulado por correntes de deriva no sentido de N para P, oriundas de um campo elétrico causado por diferenças de potencial no material N e no material P. O desenho na página seguinte ilustra a situação. Dessa maneira portanto, a junção PN se mantém neutra.



J_{DIF}



JUNÇÃO PN

$$J_{DIF} + J_{DER} = 0$$

