DÍODO DE JUNÇÃO P-N

João Paulo Neto Torres

- **Calcular a diferença de potencial de contacto a 300 K e 333 K para junções simétricas p-n de Si e Ge em equilíbrio termodinâmico com** $N_d = N_a = 10^{23}\,m^{-3}$

Material	n_i (300 K)	W_G	ε_r(300 K)
Si	$1{,}02\times10^{16} m^{-3}$	1,124 eV	16
Ge	$2{,}33\times10^{19} m^{-3}$	0,664 eV	11,7

Resolução

Admite-se que a 300 K todas as impurezas se encontram ionizadas.

Como N_d, $N_a >> n_i$ para ambos os semicondutores será $n_{no} \cong N_d$, e $p_{po} \cong N_a$ e a 300 K.

A 333 K calcula-se o novo valor de n_i:

Material	n_i (333 K)
Si	$1{,}02\times10^{17}\,\mathrm{m^{-3}}$
Ge	$9{,}66\times10^{19}\,\mathrm{m^{-3}}$

Para ambos os materiais, continua a ter-se N_d, $N_a >> n_i$, e, por isso, a densidade de maioritários dos lados p e n mantêm-se iguais para as duas temperaturas. Por aplicação da equação

$$V_{c_0} \simeq \left(\frac{N_a^- N_d^+}{n_i^2} \right)$$

obtém-se:

Material	V_{c_0} (300K)	V_{c_0} (333K)
Si	0,837 V	0,800 V
Ge	0,435 V	0,403 V

- Calcular o comprimento da região de transição e o campo elétrico máximo em equilíbrio termodinâmico da junção *p-n* de Ge a 300 K do Exemplo anterior.

- Resolução

$$\ell \qquad \sqrt{\qquad \frac{N_a^- + N_d^+}{N_a^- N_d^+}} \cong 0{,}125\,\mu\text{m}$$

$$\left|E(0)\right| = E_0 = \sqrt{\frac{2qV_{c_0}}{\varepsilon}\frac{N_a^- N_d^+}{N_d^+ + N_a^-}} \cong 100 \text{ kV / cm}$$

- Calcular o valor da corrente inversa de saturação para díodos de Si e Ge a 300 K, supondo junções simétricas com $N_d = N_a = 10^{21}\text{m}^{-3}$. Admitir que os eletrões e os buracos possuem um tempo de vida médio igual e que também é o mesmo para ambos os materiais, $\tau = 1\ \mu\text{s}$. Considere a área da secção transversal da junção igual a 1 mm^2.

Material	n_i (300 K)	μ_n (300 K)	μ_p (300 K)
Si	$1{,}02\times10^{16}\text{m}^{-3}$	$0{,}15\ \text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	$0{,}045\ \text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Ge	$2{,}33\times10^{19}\text{m}^{-3}$	$0{,}39\ \text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	$0{,}19\ \text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$

Resolução

Atendendo a que $N_a = N_d$ e e $D = u_T\mu$, a equação

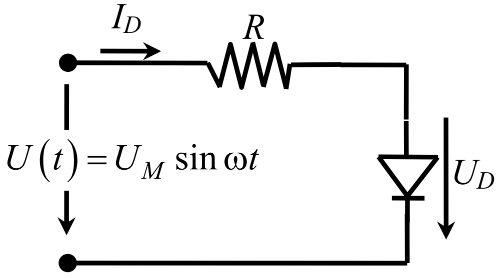
$$I_{is} = Aq\left(\frac{D_p p_{n_0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p_0}}{L_n}\right) = Aq\left(\frac{D_p}{L_p N_d^+} + \frac{D_n}{L_n N_a^-}\right) n_i^2$$

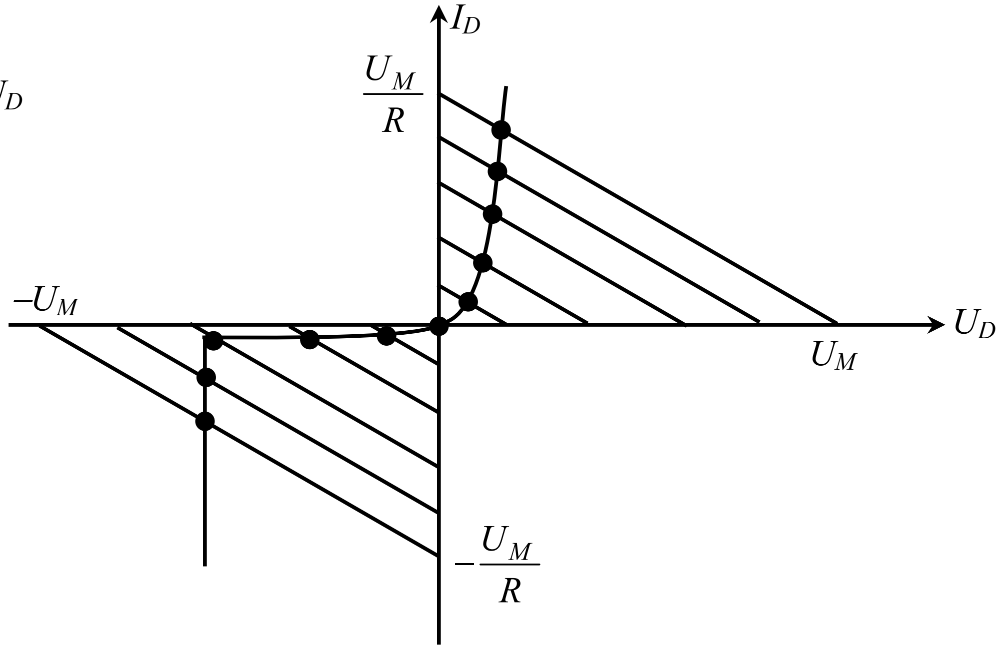
pode escrever-se como

$$I_{is} = A\frac{q}{N_a}\left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}\right) n_i^2$$

Obtém-se, para a corrente inversa de saturação no Ge e no Si, 14,85 nA e 1,6 pA, respetivamente.

- Considere o circuito da Fig.





mas em que a tensão de entrada é constante de valor $u_i = E = 5$ V. Admitindo $R = 2$ kΩ e o díodo com $I_{is} = 1$ nA e $\eta = 2$ a 300 K, calcule o PFR (I_0, U_{D0}) e a potência no díodo a essa temperatura. Verifique a influência que têm as variações de E e R no PFR.

Resolução

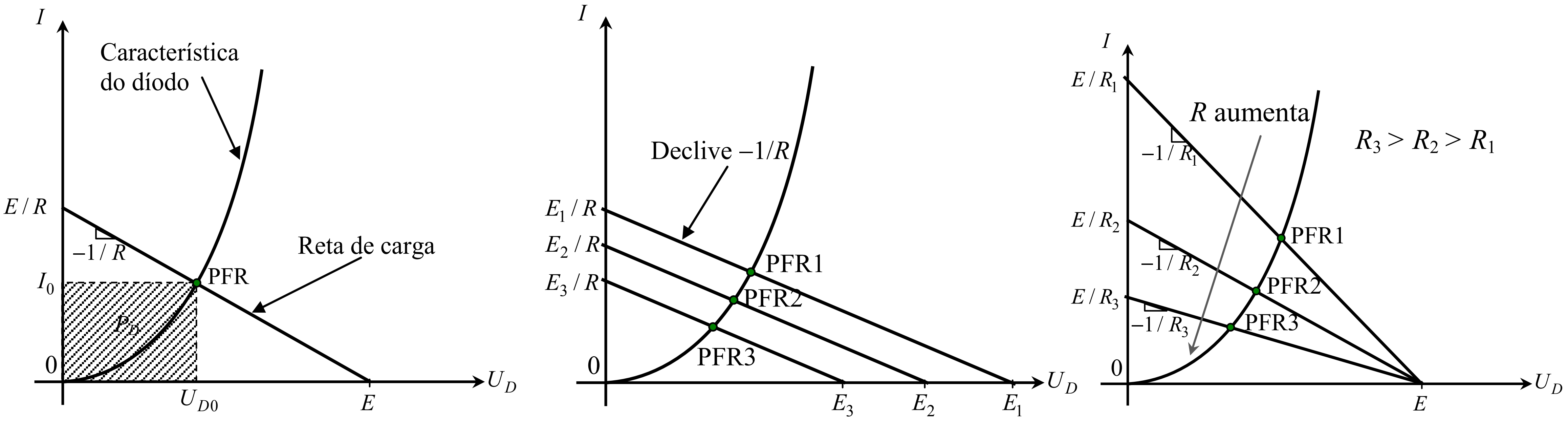
Por inspecção, o díodo está polarizado diretamente. Logo, a tensão aos seus terminais é pequena. Admitamos como valor inicial $U_D = 0$. A partir da lei das malhas: $I = (5 - U_D) / R$

determina-se o valor da corrente no circuito. Da equação do díodo: $U_D = \eta u_T \ln\left(I / I_{iS} + 1 \right)$

determina-se o novo valor da tensão aos terminais do díodo, repetindo-se o procedimento por uso alternado das duas equações anteriores. Os resultados obtidos por iteração estão representados na tabela seguinte, sendo o processo rapidamente convergente

Iteração	$U_D(V)$	I(mA)
1	0	5
2	0,802	4,2
3	0,793	4,21

O PFR é, assim, dado por: $U_{D0} = 0{,}793$ V e $I_0 = 4{,}21$ mA



A evolução do PFR quando os valores da bateria ou da resistência variam pode ser facilmente analisada recorrendo à solução gráfica. O valor da tensão na bateria condiciona os valores da abcissa na origem (E) e ordenada na origem (E/R) da reta de carga representativa da lei das malhas no plano (I, U_D). Por outro lado, o valor da resistência condiciona o declive da reta de carga (-1/R) e, portanto, o valor da ordenada na origem.

- Determine a capacidade diferencial de transição por unidade de área, a 300 K, para um díodo de Si caracterizado por uma junção abrupta e simétrica com N_a = N_d = 10^{21}m^{-3}em equilíbrio termodinâmico e para uma polarização inversa de - 5 V. O que acontece se a densidade de impurezas quadruplicar?

Resolução

A diferença de potencial de contacto, a 300 K e em equilíbrio termodinâmico, obtém-se de:

$$V_{c_0} \simeq \left(\frac{N_a^- N_d^+}{n_i^2} \right) = 0.598V$$

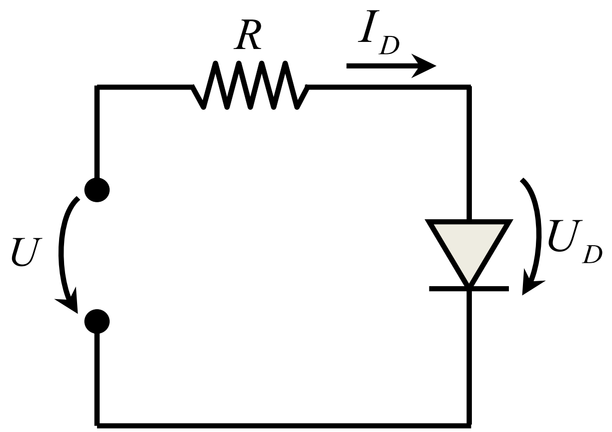
Substituindo em

$$C_t = A\sqrt{\frac{\varepsilon q N_a N_d}{2\left(N_a + N_d\right)}}\left(V_{c_0} - U_0\right)^{-\frac{1}{2}}$$

tem-se 83 mF/m^2 e 27 mF/m^2 para C_t(0)/A e C_t(-5)/A, respetivamente.

Por inspeção de C_t conclui-se facilmente que, quando a densidade dos dopantes quadruplica, a capacidade de transição duplica, isto é, C_t(0)/A = 166 mF/m^2 e C_t(-5)/A = 54 mF/m^2.

- Considere o circuito da figura. O díodo apresenta a 300 K os valores característicos: $\eta = 1$, e Admita $T = 300$ K e $R = 1$ kΩ.



Considere que a tensão de entrada é dada por $U = E + u_S(t) = 10 + u_{SM} \cos\omega t$, de frequência suficientemente pequena para que o regime imposto possa ser considerado quase-estacionário. Determine a amplitude da tensão variável de entrada u_{SM}, de modo que a amplitude da componente alternada da tensão no díodo não ultrapasse $u_T/10$. Diga como se alteraria a tensão variável no díodo para o mesmo valor de u_{SM} se o valor contínuo da tensão de entrada E aumentasse.

Resolução

Como

$$U_D = \eta u_T \, ln(I_D/I_{is} + 1) \text{ e}$$

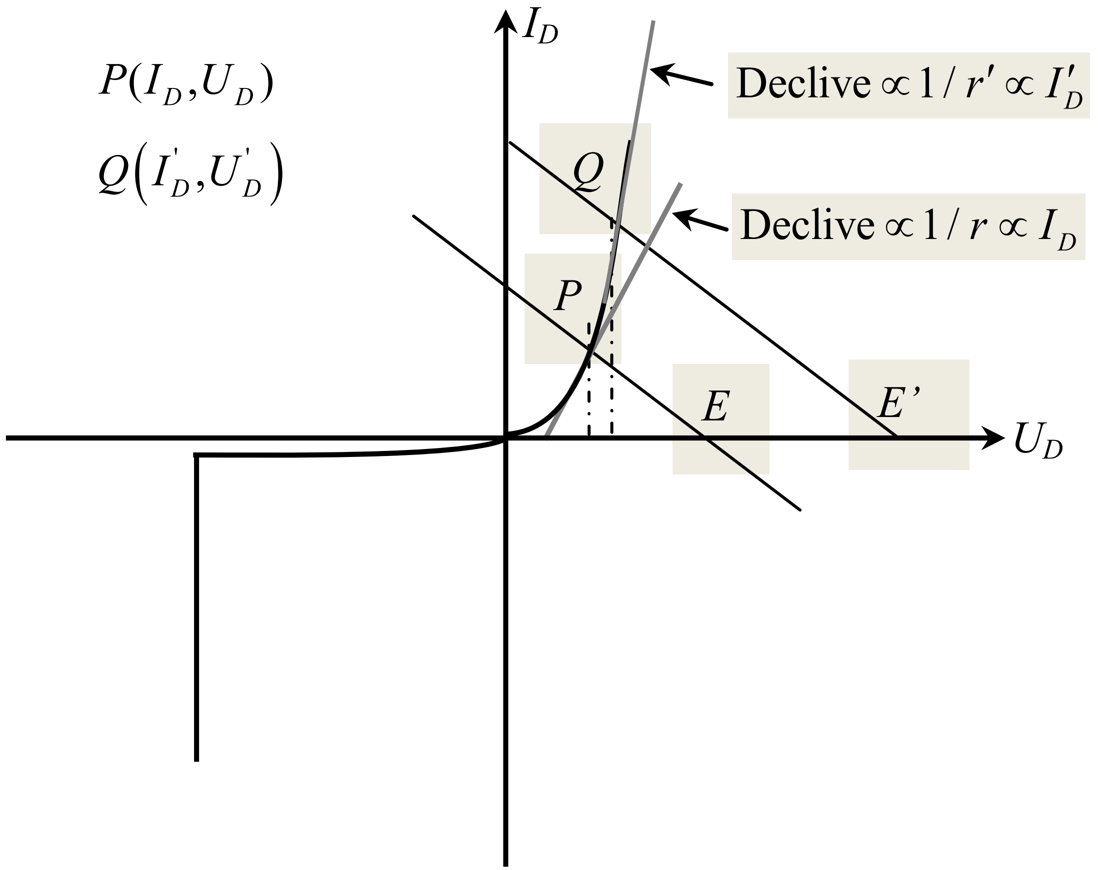
$$I_D = (E - U_D)/R,$$

cuja solução é: $I_D \cong 10$ mA e $U_D \cong 0{,}42$ V.

Em relação à parte variável, a frequência considerada permite, como boa aproximação, **desprezar os efeitos capacitivos**. A amplitude em questão permite, por outro lado, considerar o regime como incremental. Isto significa que, nessas condições, o díodo é equivalente a uma resistência do ponto de vista variável de valor $r = \eta u_T/(I_D + I_{is}) \cong \eta u_T/I_D = 2{,}6\ \Omega$.

A tensão variável no díodo é obtida do divisor de tensão constituído pela série R e r, ou seja, $u_d = u_{sm} \times r/(R + r) = 2{,}6$ mV. Tem-se, assim, para a parte variável da tensão de entrada, uma amplitude $u_{sM} = (R + r)u_d/r \cong 1$ V.

Se a tensão E da bateria subir, aumenta a componente contínua da corrente no díodo I_D, diminui a resistência incremental equivalente do díodo r e, portanto, diminui a componente variável da tensão no díodo u_d, apesar de aumentar a sua componente contínua U_D, como se pode ver na figura seguinte.



n_i'

- Calcular valor de n_i a 0 ºC e 60 ºC para o Si e GaAs. Utilizar os dados da Tabela e desprezar a variação de W_G com a temperatura.

Semicondutor	n_i (m^{-3})	W_G (eV)
Si	$1{,}02\times10^{16}$	1,124
Ge	$2{,}33\times10^{19}$	0,664
GaAs	$2{,}1\times10^{12}$	1,424

Resolução

Como $$\frac{n_i'}{n_i} = \left(\frac{T'}{T}\right)^{3/2} e^{\frac{W_G(T'-T)}{2kTT'}}$$

Conhecido o valor de e W_G à temperatura T pode-se, então, calcular o valor de ni a qualquer temperatura. Nas relações anteriores, a temperatura é expressa em K e, portanto, a 0 ºC corresponde T' = 273 K, e a 60 ºC, ter-se-á T' = 333 K. Utilizando os valores da Tabela para 300 K obtém-se, então:

Material	n_i (300 K) (m^{-3})	n_i'/n_i (T'=273 K)	n_i' (T'= 273 K) (m^{-3})	n_i'/n_i (T' = 333 K)	n_i' (T' = 333 K) (m^{-3})
Si	$1{,}02\times10^{16}$	0,1	$1{,}02\times10^{15}$	9,96	1×10^{17}
GaAs	$2{,}1\times10^{12}$	0,058	$1{,}2\times10^{11}$	17,64	$3{,}7\times10^{13}$

- Considerar um cristal de Si homogéneo com impurezas do tipo aceitador *Na* = 10^{19}m^{-3}. Calcular a densidade de eletrões e buracos, em equilíbrio termodinâmico, à temperatura de *T* = 300 K e *T* = 450 K. Si: n_i (300K) = 10^{16} m^{-3}; W_G = 1,124 eV.

Resolução

***T* = 300 K:** admite-se que a 300 K todas as impurezas estão ionizadas, ou seja . Atendendo a que $N_a \gg n_i$ então $p_0 = N_a = 10^{19}$ m^{-3} .

De $p_0\ n_0 = n_i$ tira-se, então, $n_0 = 10^{13}$ m^{-3}. Sendo $p_0 \gg n_0$, o semicondutor a 300 K é **fortemente extrínseco do tipo-*p***.

***T* = 450 K**: a esta temperatura, a densidade intrínseca é superior à de 300 K, mantendo-se a densidade de impurezas ionizadas. Ter-se-á, pois, de calcular primeiro a densidade intrínseca a 450 K para verificar se se continua nas condições referidas a 300 K.

No cálculo de η a 450 K, utiliza-se a relação

$$n_i' = n_i \left(T'/T\right)^{3/2} e^{\frac{W_G(T'-T)}{2kTT'}}$$

obtendo-se n_i (450 K) = 2,47x10^{19}m^{-3}. É, então, claro que, a 450 K, já não se está nas condições $N_a \gg n_i$. Para obter n_0 e p_0 deve-se, então, resolver o sistema de equações

$$p_0 n_0 = n_i^2$$

$$n_0 - p_0 = N_d^+ - N_a^-$$

O valor de p_0 pode obter-se a partir de

$$p_0 = \frac{N_a \pm \sqrt{N_a^2 + 4n_i^2}}{2}$$

em que só a solução positiva tem significado físico.

Os cálculos dão, então, p_0 =3,02x10^{19}m^{-3} e n_0 =2,02x10^{19}m^{-3}. Para T = 450 K, n_0=p_0 =n_i o semicondutor passa a comportar-se como intrínseco.