七：空间电荷区的复合电流和产生电流

Tuesday, March 17, 2020 3:09 AM

考虑SCR内非平衡载流子的产生与复合；

1. 正偏复合电流：

   正偏 → V > 0 → $np = n_i^2 e^{\frac{V}{V_T}}$ → SCR内又非平衡载流子复合；

   a. 定义：

      PN结正偏时，SCR内有正向注入的非平衡载流子，单位时间SCR内通过复合而消失的电荷数称为正偏复合电流；

   b. 定义式：

      $$I_R = Aq\int_0^W Udx$$

      其中：

      A：结面积；

      U：净复合率；

      W：SCR宽度；

   c. 最大净复合率：

      $$U = \frac{\frac{1}{\tau_0}(np - n_i^2)}{(n+p) + 2n_i\cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)}, np = n_i^2 e^{\frac{V}{V_T}}$$

      最大净复合率的条件：

      $$\begin{cases} E_t = E_i \\ n = p = n_i e^{\frac{V}{2V_T}} \end{cases}$$

      $$U = U_{max} = \frac{n_i}{2\tau_0}\left(e^{\frac{V}{2V_T}} - 1\right)$$

   d. 最大正偏复合电流：

      $$I_{Rmax} = Aq\int_0^W \frac{n_i}{2\tau_0}\left(e^{\frac{V}{2V_T}} - 1\right)dx = \frac{AqWn_i}{2\tau_0}\left(e^{\frac{V}{2V_T}} - 1\right) = I_r\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)$$

      $$I_r = \frac{AqWn_i}{2\tau_0}$$

      当时，，实质为反偏时SCR内产生的电流；

   e. 与扩散电流的比较：(以P^+N结为例)

      $$I_d = I_0\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \approx \frac{AqD_pP_{n0}}{L_p}(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$$

      $$\frac{I_d}{I_R} \approx \frac{2D_p\tau_0 p_{n0}}{WL_pn_i}\left(e^{\frac{V}{2V_T}} + 1\right) = \frac{2L_pn_i}{WN_d}\left(e^{\frac{V}{2V_T}} + 1\right)$$

      1) 载流子寿命越短，扩散长度越短，I_R影响越大；
      2) 掺杂浓度越大，复合中心越多，净复合率越大，I_R影响越大；
      3) 同等掺杂条件下，禁带宽度越大，内建电势差越大，SCR越宽，I_R影响越大；
      4) 在正偏电压较小时，I_R影响大；

2. 反偏产生电流：

   反偏 → V < 0 → $np = n_i^2\, e^{\frac{V}{V_T}} < n_i^2$ → SCR内由非平衡载流子产生；

   a. 定义：

      PN结反偏时，SCR内由于载流子耗尽因而有非平衡载流子产生，单位时间SCR内产生的电荷数称

为反偏产生电流；

b. 定义式：

$$I_G = Aq\int_0^W Gdx$$

其中：

A：结面积；

G：净产生率；

W：SCR宽度；

c. 最大净产生率：

当$V \ll 0$时：

$$U_{max} = \frac{n_i}{2\tau_0}\left(e^{\frac{V}{2V_T}} - 1\right) \approx -\frac{n_i}{2\tau_0}, G_{max} = -U_{max} = \frac{n_i}{2\tau_0}$$

d. 最大反偏产生电流：

$$I_{Gmax} = Aq\int_0^W \frac{n_i}{2\tau_0}dx = \frac{AqWn_i}{2\tau_0} = I_r$$

e. I_G与I_0的比较：

$$I_0 \approx \frac{AqD_p p_{n0}}{L_p}$$

i. I_0基本与偏压无关，所以称为反向饱和电流；

ii. I_G与偏压有关，V_R越大，W越大，所以I_G呈现不饱和特性；

iii. 由于n_i远大于热平衡少子浓度，所以I_G比I_0大得多；

iv. 禁带宽度越小，n_i越大，因而I_0和I_G越大；

v. 少子寿命越短，I_0和I_G越大；

3. 例题：

$Si-PN$结，$N_a = N_d = 10^{16}cm^{-3}$，$A = 10^{-4}cm^2$，$D_n = 25cm^2/s$，$D_p = 10cm^2/s$，$\tau_n = \tau_p = 0.5\mu s$；

求：

i. $V = 0.1V$时扩散电流I_d；

ii. $V = 0.1V$时SCR内正偏复合电流I_R；

iii. $V_R = 5V$时SCR内反偏产生电流I_G；

解：

i. 由：

$$I_0 = Aq\left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n}\right) \approx 4.16\times10^{-15}A$$

$$\because I_d = I_0\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \approx 4.16\times10^{-15}A\times\left(e^{\frac{0.1}{0.026}} - 1\right) \approx 1.91\times10^{-13}A$$

ii. 先计算内建电势差，然后计算SCR宽度W：

$$\psi_0 = V_T \ln\frac{N_a N_d}{n_i^2} \approx 0.70V$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(\psi_0 - V)}{q}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \approx 3.96\times10^{-5}cm$$

$$I_r = \frac{AqWn_i}{2\tau_0} \approx 9.50\times10^{-12}A$$

$$I_R = I_r\left(e^{\frac{V}{2V_T}} - 1\right) = 9.50\times10^{-12}A\times\left(e^{\frac{0.1}{0.026}} - 1\right) \approx 5.55\times10^{-11}A$$

iii. 先计算反偏时SCR宽度W：

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(\psi_0 + V_R)}{q}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \approx 1.22\times10^{-4}cm$$

$$I_0 = \frac{AqWn_i}{2\tau_0} \approx 2.93\times10^{-11}A$$

4. 练习题：

$Si-PN$结，$N_a = N_d = 10^{16}cm^{-3}$，$A = 10^{-4}cm^2$，$D_n = 25cm^2/s$，$D_p = 10cm^2/s$，$\tau_n = \tau_p = 0.5\mu s$；

求：

i. 计算正偏复合电流I_R和扩散电流I_d相等时的正偏电压值；

ii. 对于$GaAs-PN$结，$D_n = 160cm^2/s$，$D_p = 8cm^2/s$，其他参数与$Si-PN$结一样。计算$V = 0.1V$时，正偏复合电流与扩散电流之比，并与$Si-PN$结的结果相比较；

解：

i. 由：

$$I_r = \frac{AqWn_i}{2\tau_0} \approx 9.50\times10^{-12}A$$

$$I_0 = Aq\left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n}\right) \approx 4.16\times10^{-15}A$$

$$I_R = I_r\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)$$

$$I_d = I_0\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)$$

令$I_R = I_d$

即：

$$I_r\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = I_0\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)$$

$$\Rightarrow I_r = I_0$$

得：

$$\frac{AqWn_i}{2\tau_0} = Aq\left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n}\right)$$

$$\Rightarrow$$

$$\frac{Wn_i}{2\tau_0} = \frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n}$$

由：

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(\psi_0 - V)}{q}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}$$

$$\psi_0 = V_T \ln\frac{N_a N_d}{n_i^2} \approx 0.70V$$

得：

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(0.70V - V)}{q}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}$$

$$= \sqrt{\frac{2\times11.8\times8.85\times10^{-12}C^2/(N\cdot m^2)\times(0.70V - V)}{1.6\times10^{-19}C}\times\left(\frac{1}{10^{16}cm^{-3}} + \frac{1}{10^{16}cm^{-3}}\right)}$$

$$\approx \sqrt{(0.70V - V)\times2.61\times10^{-22}Cm/N}$$

$$\approx 1.616\times10^{-11}\times\sqrt{0.70 - V}m$$

综上：

$$\frac{1.5\times10^{10}cm^{-3}}{2\times0.5\times10^{-6}s}W = \frac{10cm^2/s\times10^{16}cm^{-3}}{\sqrt{10cm^2/s\times0.5\times10^{-6}s}} + \frac{25cm^2/s\times10^{16}cm^{-3}}{\sqrt{25cm^2/s\times0.5\times10^{-6}s}}$$

$$\Rightarrow 1.5\times10^{16}cm^{-3}s^{-1}W \approx 11.54\times10^{19}cm^{-2}s^{-1}$$

$$\Rightarrow W \approx 7693.33cm$$

即：

$$W \approx 4.5V$$

5. 完。