

思考题

在掺杂浓度 $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，少子寿命为 $10 \mu\text{s}$ 的 Si 中。

(1) 少子在经过 30 微秒后将衰减到原来的百分之几？

(2) 少子在外界作用下被清除时，电子-空穴的产生率是多大？

解：(1) 由 $\Delta p(t) = (\Delta p)_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ ，

$$\frac{\Delta p(t)}{(\Delta p)_0} = e^{-\frac{t}{\tau}} = e^{-\frac{30}{10}} = \frac{1}{e^3} = 4.98\%$$

$$(2) \quad \Delta p = p - p_0 = -p_0 = -\frac{n_i^2}{N_D} = -2.25 \times 10^3 (\text{cm}^{-3})$$

$$U_d = \frac{1}{\tau} \Delta p = \frac{-2.25 \times 10^3}{10 \times 10^{-6}} = -2.25 \times 10^8 (\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1})$$

U_d 为负值，表示有净的电子-空穴的产生。所以，电子-空穴的产生率是 $2.25 \times 10^8 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

少子被抽取，产生大于复合，净产生

例题

一束恒定光源照在n型硅单晶样品上，其平衡载流子浓度 $n_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ，且每微秒产生电子-空穴对为 10^{13} cm^{-3} 。如 $\tau_n = \tau_p = 2 \text{ } \mu\text{s}$ ，试求光照后少数载流子的浓度。

(已知本征载流子浓度 $n_i = 9.65 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$)

解：平衡态下，已知多子浓度 $n_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ，本征载流子浓度 $n_i = 9.65 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ，根据质量作用定律，可得： $p_0 = n_i^2 / n_0 = 9.31 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$

非平衡态下，因光照产生过剩载流子的速率：

$$G_{\text{光}} = 10^{13} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{s}^{-1}$$

非平衡稳态下（光照后）：

$$\begin{cases} G_{\text{光}} + G_{\text{热}} = R \cdots \cdots \cdots (1) \\ p_0 + \Delta p_{(0)} = p \cdots \cdots \cdots (2) \end{cases}$$

非平衡态下（撤去光照瞬间）：

$$\begin{cases} U = R - G_{\text{热}} \cdots \cdots \cdots (3) \\ \tau_p = \Delta p_{(0)} / U \cdots \cdots \cdots (4) \end{cases}$$

由(1)、(3)、(4)得，光照后过剩少子浓度： $\Delta p_{(0)} = \tau_p G_{\text{光}} = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

代入(2)得，光照后少子浓度： $p = p_0 + \Delta p_{(0)} \approx 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

思考题

试证明：p型半导体

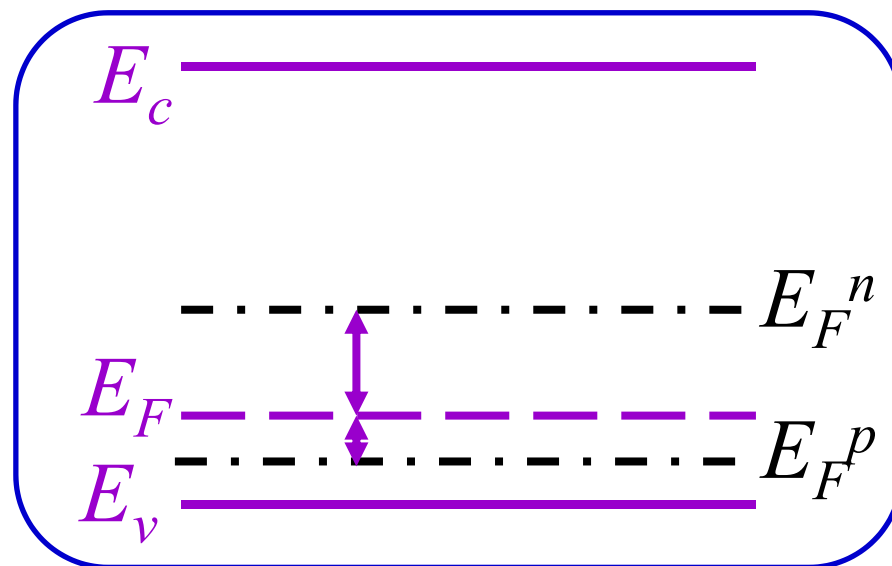
$$E_F - E_F^p < E_F^n - E_F$$

证：对于p型半导体

$$\text{平衡态: } \begin{cases} n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}} \\ p_0 = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{k_0 T}} \end{cases}$$

$$\text{非平衡态: } \begin{cases} n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F^n}{k_0 T}} \\ p = N_v e^{-\frac{E_F^p - E_v}{k_0 T}} \end{cases}$$

$$\text{由 } \frac{n}{n_0} > \frac{p}{p_0} \Rightarrow E_F^n - E_F > E_F - E_F^p$$



思考题

施主浓度为 10^{15} cm^{-3} 的均匀半无限长Si棒，其 $x=0$ 端受到光照产生过剩空穴。光只照在表面，并形成稳态的过剩空穴浓度分布：

$$\Delta p(x) = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$$

已知光照表面处 $\Delta p_0 = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。已知表面小注入条件成立。已知处于室温。已知 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

(1) 写出光照稳态时载流子浓度分布的关系式。

思考题

解：（1）n型半导体中表面小注入，故

$$n_0 \gg \Delta p_{(x=0)} \gg p_0$$

$$\text{又：} \Delta p_{(x=0)} \geq \Delta p(x)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} n(x) = n_0 + \Delta p(x) \approx n_0 \\ p(x) = p_0 + \Delta p(x) = p_0 + \Delta p_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) \end{cases}$$

思考题

施主浓度为 10^{15} cm^{-3} 的均匀半无限长Si棒，其 $x=0$ 端受到光照产生过剩空穴。光只照在表面，并形成稳态的过剩空穴浓度分布：

$$\Delta p(x) = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$$

已知光照表面处 $\Delta p_0 = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。已知表面小注入条件成立。已知处于室温。已知 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

- (1) 写出光照稳态时载流子浓度分布的关系式。
- (2) 分别建立光照稳态时电子和空穴准费米能级的关系式。

思考题

(2)

$$\begin{cases} n(x) \approx n_0 \\ n = n_i e^{-\frac{E_i - E_F^n}{k_0 T}} \end{cases} \longrightarrow E_F^n \approx E_i + k_0 T \ln \left(\frac{n_0}{n_i} \right)$$

$$\begin{cases} p(x) = p_0 + \Delta p_0 \exp \left(-\frac{x}{L_p} \right) \\ p = n_i e^{-\frac{E_F^p - E_i}{k_0 T}} \end{cases} \longrightarrow E_F^p = E_i - k_0 T \ln \left[\frac{p_0}{n_i} + \left(\frac{\Delta p_0}{n_i} \right) e^{\left(-\frac{x}{L_p} \right)} \right]$$

思考题

施主浓度为 10^{15} cm^{-3} 的均匀半无限长Si棒，其 $x=0$ 端受到光照产生过剩空穴。光只照在表面，并形成稳态的过剩空穴浓度分布：

$$\Delta p(x) = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$$

已知光照表面处 $\Delta p_0 = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。已知表面小注入条件成立。已知处于室温。已知 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。


- (1) 写出光照稳态时载流子浓度分布的关系式。
- (2) 分别建立光照稳态时电子和空穴准费米能级的关系式。
- (3) 说明当 $\Delta p(x) \gg p_0$ 时，空穴的准费米能级是 x 的线性函数。

思考题

(3)

$$E_F^p = E_i - k_0 T \ln \left[\frac{p_0}{n_i} + \left(\frac{\Delta p_0}{n_i} \right) e^{\left(-\frac{x}{L_p} \right)} \right]$$

$$= E_i - k_0 T \ln \left[\frac{p_0}{n_i} + \frac{\Delta p(x)}{n_i} \right]$$

$$\Delta p(x) \gg p_0$$


$$\approx E_i - k_0 T \ln \left[\frac{\Delta p(x)}{n_i} \right]$$

$$= E_i - k_0 T \ln \left[\left(\frac{\Delta p_0}{n_i} \right) e^{\left(-\frac{x}{L_p} \right)} \right]$$

$$= E_i - k_0 T \ln \left(\frac{\Delta p_0}{n_i} \right) + k_0 T \left(\frac{x}{L_p} \right)$$

当 $\Delta p(x) \gg p_0$ ，空穴准费米能级是 x 的线性函数

思考题

施主浓度为 10^{15} cm^{-3} 的均匀半无限长Si棒，其 $x=0$ 端受到光照产生过剩空穴。光只照在表面，并形成稳态的过剩空穴浓度分布：

$$\Delta p(x) = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$$

已知光照表面处 $\Delta p_0 = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。已知表面小注入条件成立。已知处于室温。已知 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

- (1) 写出光照稳态时载流子浓度分布的关系式。
- (2) 分别建立光照稳态时电子和空穴准费米能级的关系式。
- (3) 说明当 $\Delta p(x) \gg p_0$ 时，空穴的准费米能级是 x 的线性函数。
- (4) 利用(1)和(2)的结果，分别画出在平衡和光照稳态条件下该Si半导体样品的能带图（假设在样品中 $E=0$ ）。

思考题

(4)

$$\begin{aligned} N_D &= 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ n_i &= 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \\ &\Rightarrow \\ n_0 &\approx N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

$$E_F^p = E_i - k_0 T \left[\ln \left(\frac{\Delta p_0}{n_i} \right) + \left(\frac{x}{L_p} \right) \right]$$

➤ 在 $x = 0$ 时, $\Delta p_0 = n_i \longrightarrow E_F^p(x = 0) = E_i$

➤ 在 $x \geq 0$ 附近, $\Delta p(x) \gg p_0 \longrightarrow E_F^p \propto x$

➤ 在 $x \gg 0$ 时, 半导体趋于热平衡, $E_F^p \longrightarrow E_F^n = E_F$

$$E_F^n - E_i \approx E_F^p - E_i = E_F - E_i = k_0 T \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = 0.30 \text{ (eV)}$$

思考题

