

## 第五讲 载流子产生与复合（续）

9月12, 2001

### 内容:

1. 热平衡之外的G&R率
2. 表面产生与复合

### 阅读作业

del Alamo Ch. 3, §§3.4 ,3.6

主要问题

- 当载流子浓度被扰动而偏离热平衡时的值时，对产生和复合之间的平衡发生了什么影响？
- 对每个G&R机制是如何打乱的？
- 决定G&R率平衡的主要因素是什么？
- 如何能表征表面G&R？

## 1. 平衡之外的G&R率

- 在热平衡时:

$$n = n_o$$

$$p = p_o$$

$$G_{oi} = R_{oi}$$

$$G_o = R_o$$

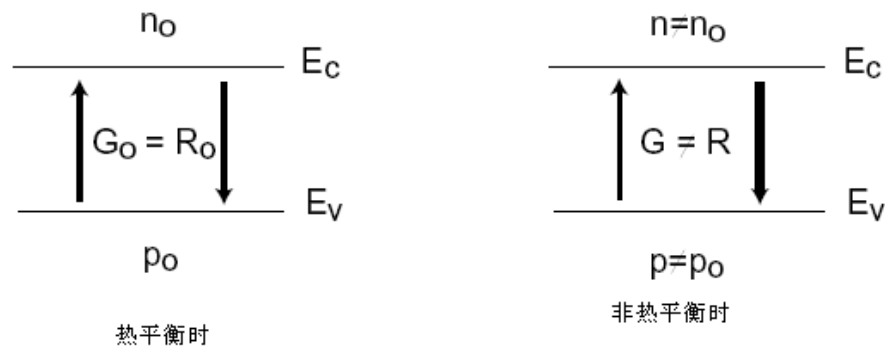
- 在热平衡之外（载流子浓度被扰动而偏离热平衡时的值）:

$$n \neq n_0$$

$$p \neq p_0$$

$$G_i \neq R_i$$

$$G \neq R$$



如果  $G \neq R$ , 载流子浓度随时间变化。

定义净复合率  $U$  是十分有用的:

$$U = R - G$$

反映内部 G&R 机制的平衡:

- 如果  $R > G$  ( $U > 0$ ), 净复合占优势

- 如果  $R < G$   $U < 0$ , 净产生占优势

如果几个机制同时作用, 定义:

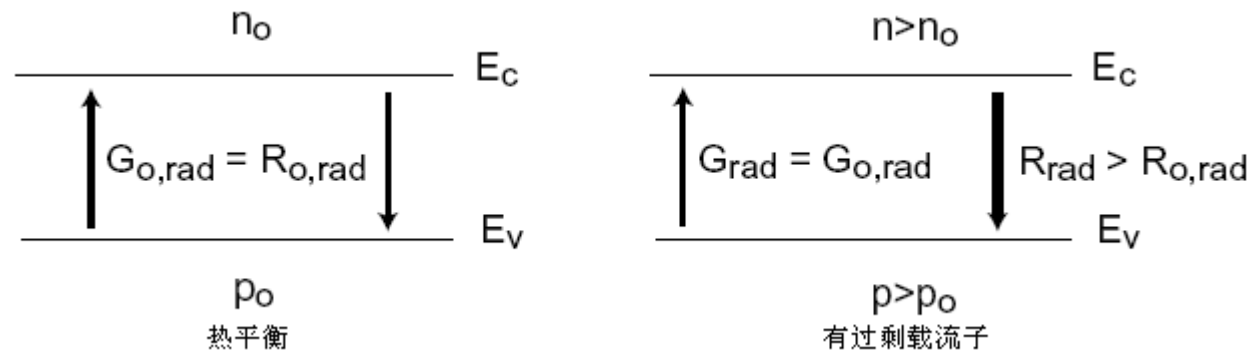
$$U_i = R_i - G_i$$

而

$$U = \sum U_i$$

在热平衡之外的不同机制对G&R率会发生什么影响?

- a) 能带到能带光学G&R



- 光产生率没有变化，因为键合数目没有变化：

$$G_{rad} = g_{rad} = r_{rad} n_0 p_0$$

- 如果电子和空穴浓度发生变化时，光复合率受到影响：

$$R_{rad} = r_{rad} np$$

- 定义净复合率：

$$U_{rad} = R_{rad} - G_{rad} = r_{rad} (np - n_0 p_0)$$

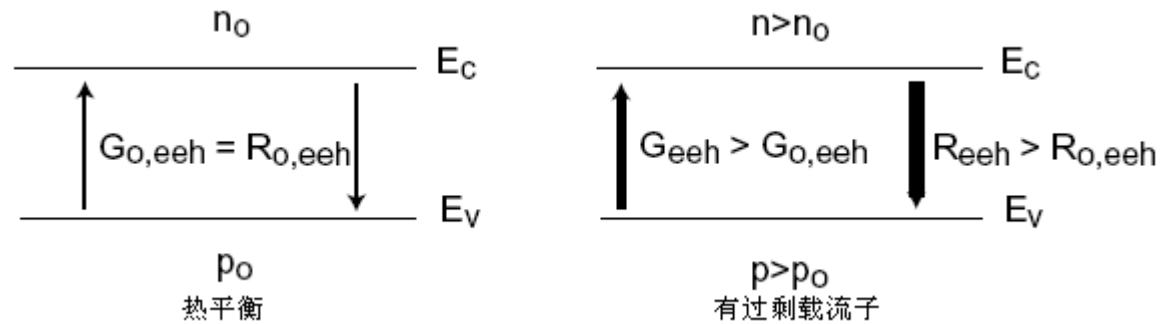
—如果  $np > n_0 p_0$ ， $U_{rad} > 0$ ，净复合占优势

—如果  $np < n_0 p_0$ ， $U_{rad} < 0$ ，净产生占优势

- 注意：我们假定  $g_{rad}$  和  $r_{rad}$  与平衡时无变化

## b) 俄歇G&amp;R

- 包括热电子:



$$G_{eeh} = g_{eeh}n$$

$$R_{eeh} = r_{eeh}n^2p$$

如果  $g_{eeh}$  和  $r_{eeh}$  间关系和TE时无差别:

$$U_{eeh} = R_{eeh} - G_{eeh} = r_{eeh}n(np - n_0p_0)$$

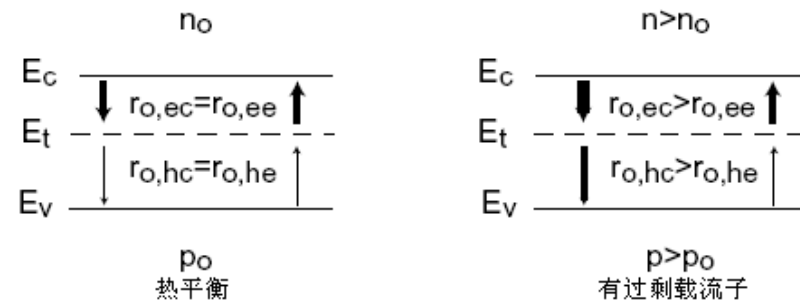
- 同样, 包括热电子:

$$U_{ehh} = r_{ehh}p(np - n_0p_0)$$

- 总的俄歇:

$$U_{Auger} = (r_{eeh}n + r_{ehh}p)(np - n_0p_0)$$

## c) 与陷阱有关的热G&amp;R



在平衡之外，如果产生复合率常数不受影响：

$$r_{ec} = c_e n (N_t - n_t)$$

$$r_{ee} = e_e n_t = c_e n_i n_t$$

$$r_{hc} = c_h p n_t$$

$$r_{he} = e_h (N_t - n_t) = c_h n_i (N_t - n_t)$$

复合：捕获一个电子+一个空穴  
 净复合率=净电子捕获率  
 =净空穴捕获率

$$U_{tr} = r_{ec} - r_{ee} = r_{hc} - r_{he}$$

从这，推导出  $n_t$ ，并最终得到  $U_{tr}$ ：

$$U_{tr} = \frac{np - n_0 p_0}{\tau_{ho}(n + n_i) + \tau_{o}(p + n_i)}$$

d) 所有过程组合起来

$$U = U_{rad} + U_{Auger} + U_{tr}$$

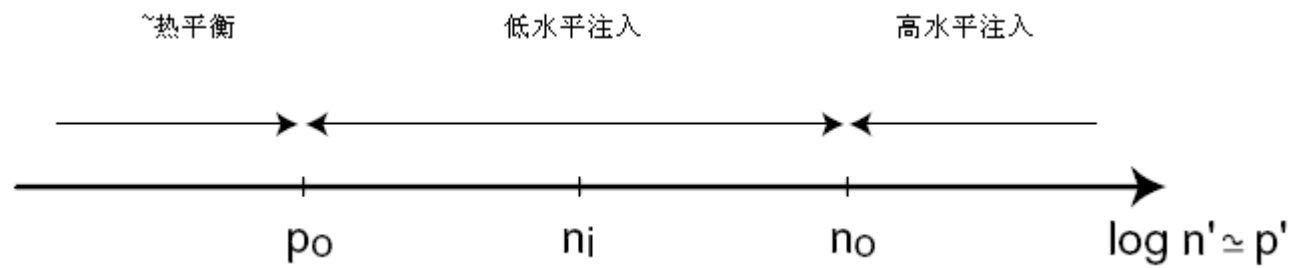
□ 特殊情况：低水平掺杂

定义过剩载流子浓度：

$$n = n_0 + n'$$

$$p = p_0 + p'$$

**LLI**：平衡的少数载流子浓度占主导但对多数载流子浓度扰动可以忽略



一对n型：

$$p_o \ll n' \simeq p' \ll n_o$$

—对p型:

$$n_o \ll n' \simeq p' \ll p_o$$

在LLI中:

$$np - n_o p_o = n_o p_o + n_o p' + p_o n' + n' p' - n_o p_o \simeq (n_o + p_o) n'$$

U的所以表达式仿效下面形式:

$$U_i \simeq \frac{n'}{\tau_i}$$

$\tau_i$  为过程i的载流子寿命, 每个G&R过程的一个特征常数:

$$\tau_{rad} = \frac{1}{r_{rad}(n_o + p_o)}$$

$$\tau_{Auger} \simeq \frac{1}{(r_{eeh}n_o + r_{ehh}p_o)(n_o + p_o)}$$

$$\tau_{tr} \simeq \frac{\tau_{ho}n_o + \tau_{eo}p_o}{n_o + p_o}$$

在LLI情况下，净复合率作为材料和温度的一个常数，线性的取决于过剩载流子浓度。

如果所有G&R过程是独立的，结合的过程：

$$U; \frac{n'}{\tau}$$

而

$$\tau = \frac{1}{\tau_i}$$

G&R过程具有占支配的最小的寿命。

载流子寿命的物理意义：

- $U$ 是单位为单位体积过剩载流子浓度  $n'$  的净复合率（随  $n'$  线性变化）
- $\frac{1}{U}$  是单位体积复合事件之间的平均时间
- $\tau = \frac{n'}{U}$  为每个过剩载流子复合事件之间的平均时间

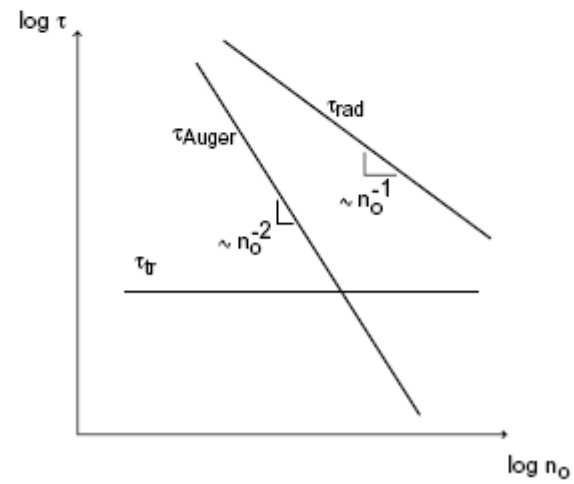
或过剩载流子在；复合前过剩载流子的平均“存活”时间→材料的恒定特性

对n型材料， $n_0 \gg p_0$ ：

$$\tau_{rad} = \frac{1}{r_{rad} n_0}$$

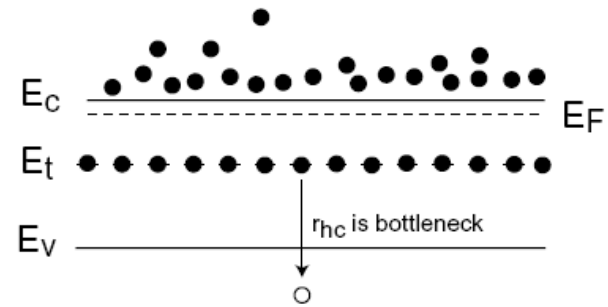
$$\tau_{Auger} = \frac{1}{r_{eeh} n_0^2}$$

$$\tau_{tr} = \tau_{ho} \propto \frac{1}{N_t}$$

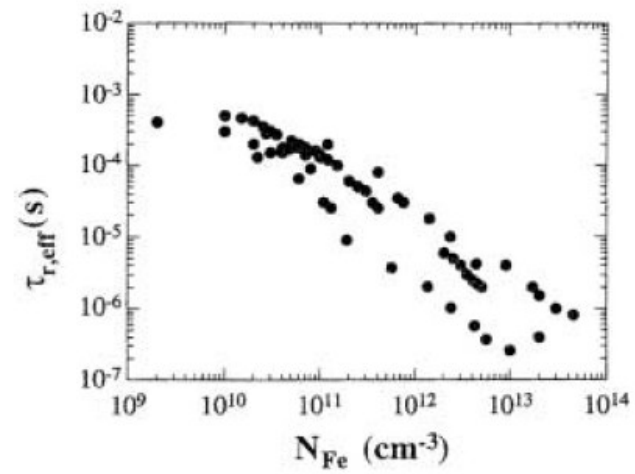


陷阱复合（n型材料）：

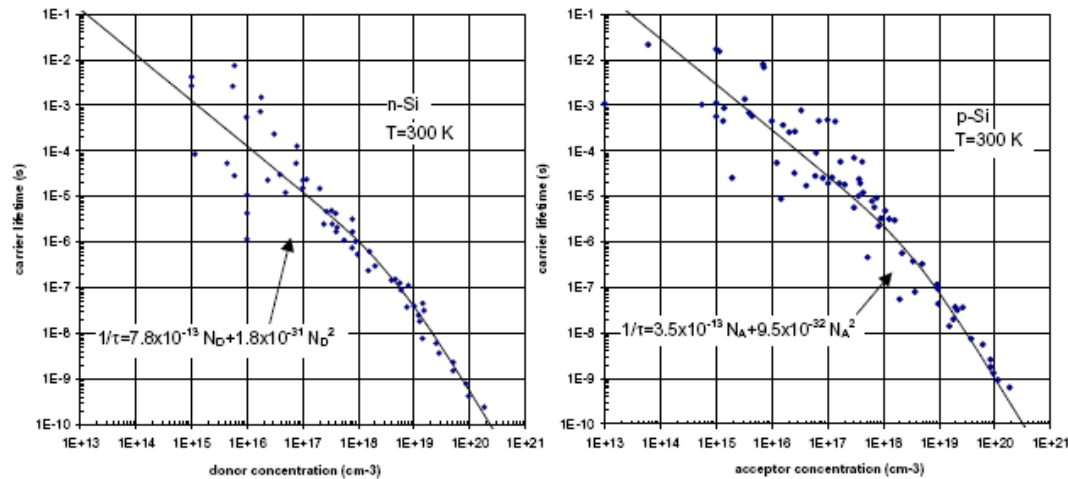
- 寿命不取决于  $n_0$  [陷阱占有几率对  $n_0$  相当不敏感]



- 寿命取决于陷阱浓度如  $\tau \propto N_t^{-1}$



## □ Si在300K测量的载流子寿命



对低掺杂水平,  $N_{A,D} < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau_{tr}$  占主导:

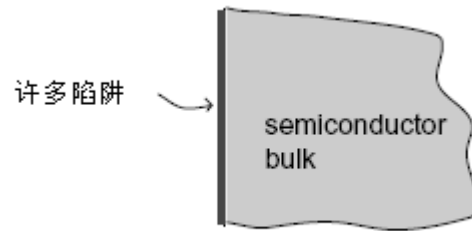
- $\tau$  取决于材料质量和过程  $\rightarrow$  宽的数据分布
- $N_i$  与  $N_{A,D}$  相关  $\rightarrow \tau \propto N_{A,D}^{-1}$

对高掺杂水平,  $N_{A,D} > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau_{Auger}$  占主导:

- “本征的” 复合  $\rightarrow$  紧密的数据分布
- $\tau \propto N_{A,D}^{-2}$

## 2. 表面产生与复合

表面：周期性的晶体严重损坏 许多陷阱（G&R中心）



在LLI情况下：

$$U_s \simeq S n'(s)$$

$S$  表面复合速度 (cm/s)

注意单位：

$$U_s(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) = S(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}) n'(\text{cm}^{-3})$$

$S$  是“冲”到表面复合的过剩载流子速度的垂直分量。

## 主要结论

- 过剩的 $np$ 乘积是净产生/复合的驱动力。
- 在低水平注入情况下：

$$U \sim \frac{n'}{\tau}$$

这里 $\tau$  载流子寿命

- 载流子寿命：复合前过剩载流子的平均“存活”时间。
- Si在300K左右时，
  - $\tau$  :  $N^{-1}$ 对低的 $N$ （陷阱有关的复合），
  - $\tau$  :  $N^{-2}$ 对高的 $N$ （Auger复合）
- Si在300K时主要参数的数量级大小：
  - $\tau$  :  $1ns - 1ms$ ，取决于掺杂

## 自学

- 载流子抽取，产生寿命