

## 第四讲 载流子的产生与复合

9月9, 2002

### 内容:

1. G&R机制
2. 热平衡: 平衡的详细原理
3. 在平衡时G&R几率

### 阅读作业

del Alamo Ch. 3, §§3.1-3.3

### 讨论:

9月10—K. Soumyanath(Intel), 对混合信号系统在亚100nm CMOS工艺的机遇与挑战。Rm. 34-101, 4PM.

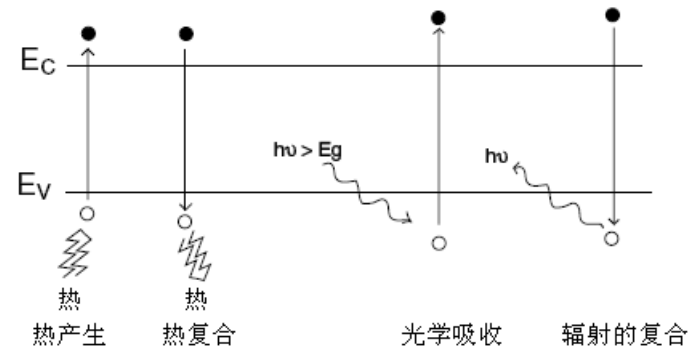
## 主要问题

- 在电子和空穴的产生和复合中会导致什么物理机制？
- 对Si在周围温度时，这些中那个是最相关的？
- 最重要机制的主要决定因素是什么？
- 如果同时存在几个但独力的产生和复合机制，如何准确定义热平衡？

## 1. 产生与复合机制

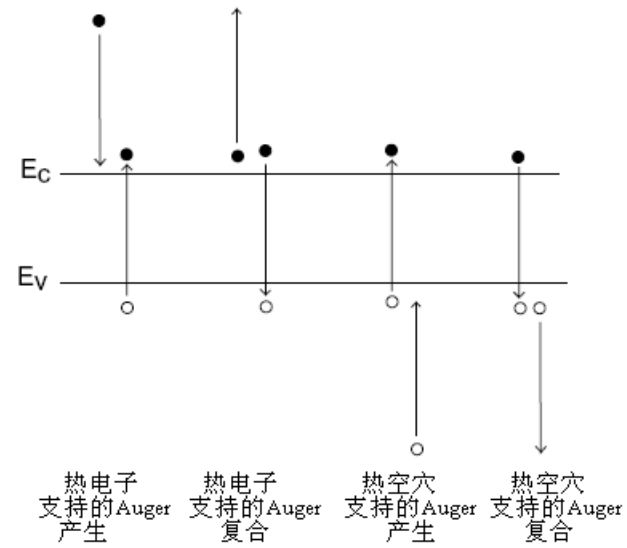
a) 能带到能带G&R, 通过:

- 声子 (热G&R)
- 光子 (光G&R)



- 热G&R: 与在Si中非常的不同, 同时需要很多声子 (大约20)
- 光G&R: 不像在Si中, “非直接”带隙材料, 需要一个声子保持动量

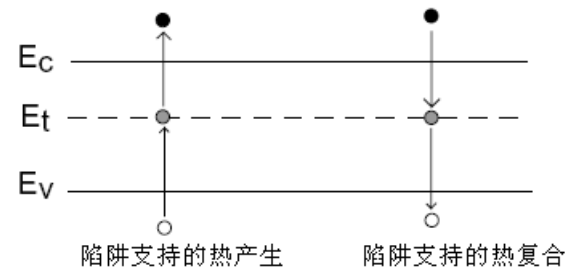
b) Auger产生与复合, 包括第三个载流子



- Auger产生：能量由“热”载流子提供
- Auger复合：能量传给第三个载流子；需要许多载流子；只在重掺杂半导体中重要

c) 陷阱支持的产生与复合，依赖于出现在带隙中央的电子态（“深能级”或“陷阱”）：

- 晶体缺陷
- 杂质

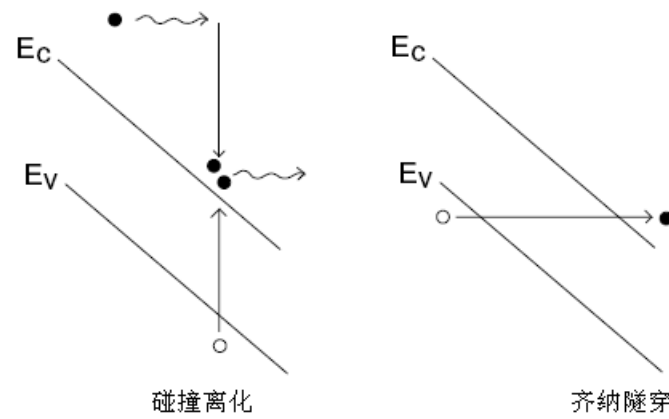


陷阱支持的G&R是：

- 在Si中是主导的
- 可设计的：在Si中引入深能级来增加它

## d) 其它产生机制

- 碰撞离化: Auger产生事件由电场加热的载流子触发
- 齐纳隧穿或场离化: 电子在强电场中从VB到CB直接隧穿



- 能量粒子, 例如 $\alpha$  粒子 (对DRAM是糟糕的)

- 外来的能量电子事件：电子显微表征技术

## 2. 热平衡：平衡的详细原理

定义：

$G_i$  过程i的产生率 [ $cm^{-3} s^{-1}$ ]

$R_i$  过程i的复合率 [ $cm^{-3} s^{-1}$ ]

$G$  总的产生率 [ $cm^{-3} s^{-1}$ ]

$R$  总的复合率 [ $cm^{-3} s^{-1}$ ]

在热平衡时：

$$R_o = \Sigma R_{oi} = G_o = \Sigma G_{oi}$$

实际上，详细的平衡同时要求：

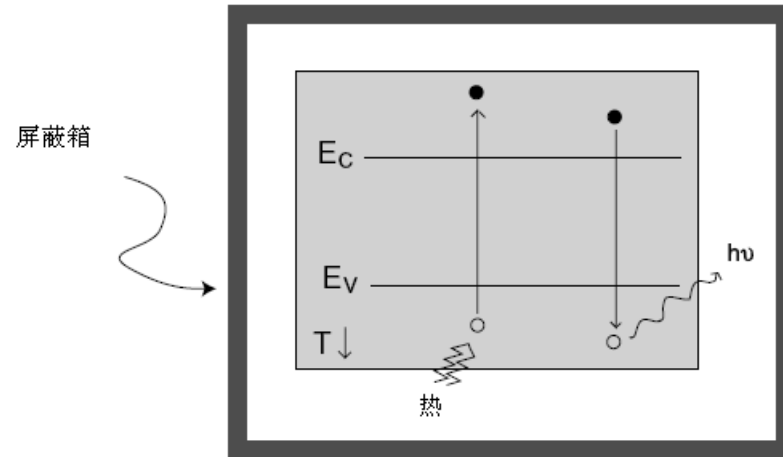
$$R_{oi} = G_{oi} \quad \text{对所有 } i$$

对G&R存在几个路径时，每个都要详细的平衡[详细平衡的原理]。

没有详细的平衡，TE不可能。

考虑在TE中的样品（ $R_o = G_o$ ），但是

- $G_o$ 通过声子吸收发生
- $R_o$ 通过声子发射发生



样品自然的冷却!

### 3. 在热平衡时G&R几率

a) 能带到能带G&R

- 将不考虑热G&R, 因为它可以忽略

- 光G&R

在有限的T，半导体淹没在黑体的“沐浴”之中 光产生

在任一时间只有少量的键被打开 G只取决于T:

$$G_{o,rad} = g_{rad}(T)$$

一个复合过程要求一个电子和一个空穴 R取决于 $n_0p_0$ :

$$R_{o,rad} = r_{rad}(T) n_0p_0$$

在TE时，详细的平衡意味着:

$$g_{rad} = r_{rad}n_0p_0$$

b) AugerG&R

- 包括热电子:

存在的电子越多, 越可能有热电子能够Auger产生:

$$G_{o,eeh} = g_{eeh}(T)n_o$$

一个复合事件要求两个电子和一个空穴:

$$R_{o,eeh} = r_{eeh}n_o^2p_o$$

在TE时, 详细的平衡意味着:

$$g_{eeh} = r_{eeh}n_o p_o$$

- 包括热空穴: 和上面类似只不过  $n_o$  替换为  $p_o$  而  $eeh$  替换为  $ehh$ 。

## c) 陷阱支持的热G&amp;R: Shockly-Read-Hall模型

在  $E_t = E_i$  浓度为  $N_t$  时考虑一个陷阱。

陷阱的占据几率:

$$f(E_t) = f(E_i) = \frac{1}{1 + \exp \frac{E_i - E_F}{kT}} = \frac{n_i}{n_i + p_0}$$

陷阱被电子占据的浓度:

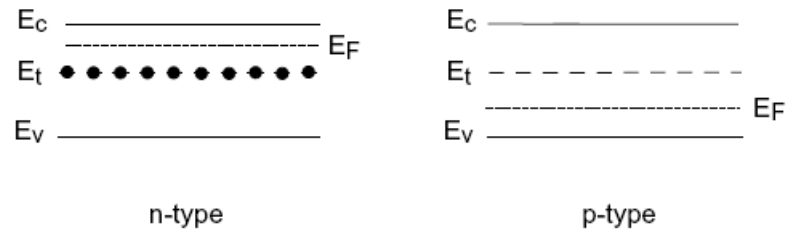
$$n_{to} = N_t f(E_i) = N_t \frac{n_i}{n_i + p_0}$$

空陷阱的浓度:

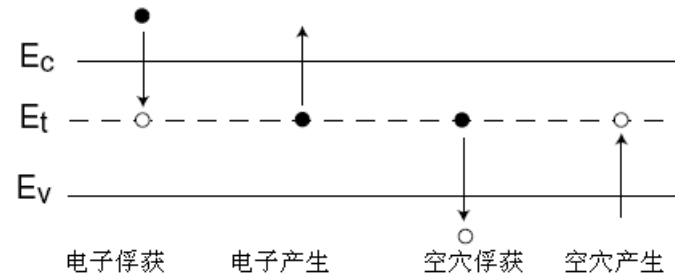
$$N_t - n_{to} = N_t - N_t \frac{n_i}{n_i + p_0} = N_t \frac{p_0}{n_i + p_0}$$

陷阱被占据取决于掺杂:

- n型:  $p_0 = n_i$ ,  $n_{to} = N_t$ , 大多数陷阱都被占据
- p型:  $p_0 \gg n_i$ ,  $n_{to} = 0$ , 大多数陷阱都空着



四个基本过程：



在TE中的四个子过程比率：

- 电子俘获：

$$r_{o,ec} = c_e n_o (N_t - n_{to})$$

- 电子发射：

$$r_{o,ee} = e_e n_{to}$$

- 空穴俘获：

$$r_{o,hc} = c_h p_o n_{to}$$

- 空穴发射:

$$r_{o,he} = e_h (N_t - n_{to})$$

在热平衡时，详细的平衡要求：

$$r_{o,ec} = r_{o,ee}$$

$$r_{o,hc} = r_{o,he}$$

那么，俘获和发射系数间密切的关系为：

$$e_e = c_e n_o \frac{N_t - n_{to}}{n_{to}} = c_e n_i$$

$$e_h = c_h p_o \frac{n_{to}}{N_t - n_{to}} = c_h n_i$$

俘获系数能从第一个原理计算出，但通常他们是被测量得到的。

为了得到那种陷阱与CB和VB有关的表达式，重新改写几率方程：

$$r_{o,ec} = r_{o,ee} = c_e n_i n_{to} = c_e N_t \frac{n_i^2}{n_i + p_o}$$

$$r_{o,hc} = r_{o,he} = c_h n_i (N_t - n_{to}) = c_h N_t \frac{n_i p_o}{n_i + p_o}$$

现在定义：

$$\tau_{eo} = \frac{1}{N_t c_e}$$

$$\tau_{ho} = \frac{1}{N_t c_h}$$

$\tau_{eo}$ 和 $\tau_{ho}$ 是陷阱和它的浓度的自然的特性。它们的单位为s。那么：

$$r_{o,ec} = r_{o,ee} = \frac{1}{\tau_{eo}} \frac{n_i^2}{n_i + p_o}$$

$$r_{o,hc} = r_{o,he} = \frac{1}{\tau_{ho}} \frac{n_i p_o}{n_i + p_o}$$

几率取决于陷阱和掺杂水平。

对n型半导体简化：

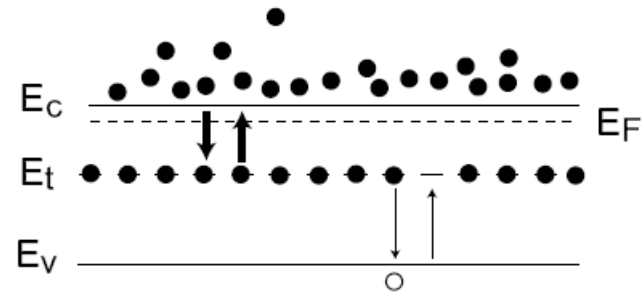
$$r_{o,ec} = r_{o,ee} \simeq \frac{n_i}{\tau_{eo}}$$

$$r_{o,hc} = r_{o,he} = \frac{p_o}{\tau_{ho}}$$

如果 $\tau_{eo}$ 与 $\tau_{ho}$ 没有很大的不同，

$$r_{o,ec} = r_{o,ee} \gg r_{o,hc} = r_{o,he}$$

陷阱与CB的交换几率要远大于VB。



- 许多电子在CB和陷阱中  $r_{o,ec}$   $r_{o,ee}$  高
- 很少空穴在VB和陷阱中  $r_{o,hc}$   $r_{o,he}$  小

对p型半导体反向情况。

## 主要结论

- 在Si中主要的产生/复合机制：陷阱支持和Auger。
- 在TE时，G&R过程必须处于详细的平衡。

- 在TE时 Auger的R几率与多数载流子浓度的平方成正比并且与少数载流子浓度成线性关系。
- 在TE时陷阱支持的G/R几率取决于陷阱的特性，它的浓度，掺杂类型和掺杂水平。
- 在n型半导体中，带隙的中央的陷阱优先地与导带进行交换。在p型半导体中，带隙中间的陷阱与价带进行交换。