



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

半导体物理与器件

任课教师: 赵小龙
电信学部微电子学院
zhaoxiaolong@xjtu.edu.cn

目录

- 前沿——课程信息

第一部分：半导体物理

- 第一章 半导体中的电子状态
- 第二章 半导体中载流子的统计分布
- 第三章 半导体的导电性
- **第四章 非平衡载流子**
- 第五章 金属和半导体的接触

第二部分：p-n结

第三部分：双极晶体管

第四部分：金属-氧化物-半导体场效应晶体管

第四章 非平衡载流子

- 4.1 非平衡载流子的注入与复合

处于热平衡态半导体, T 一定, n_0 , p_0 一定 - - 平衡载流子浓度
非简并半导体 有 $n_0 p_0 = n_i^2$ - - 热平衡态的判据式

第四章 非平衡载流子

• 4.1 非平衡载流子的注入与复合

4.1.1 平衡载流子和非平衡载流子的关系

对半导体施加外部作用（光照、电注入等），破坏热平衡，成为非平衡态。载流子浓度比平衡态的多些，多余的那部分用 Δn , Δp 表示，称其为非平衡载流子或过剩载流子。用 n 或 p 表示总的载流子浓度。

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

$$\text{平衡态: } n_0 p_0 = n_i^2$$

$$\text{非平衡态: } np = (n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) \neq n_i^2$$

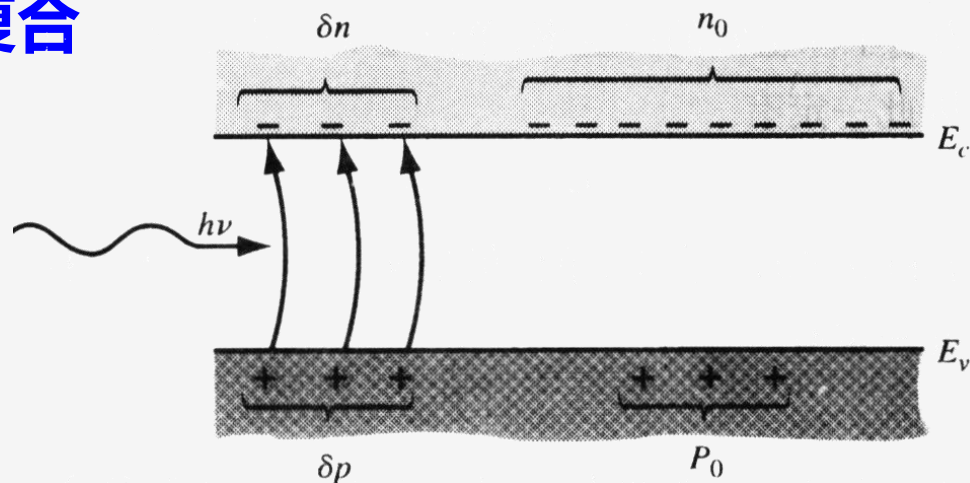
第四章 非平衡载流子

• 4.1 非平衡载流子的注入与复合

4.1.2 非平衡载流子的产生与复合

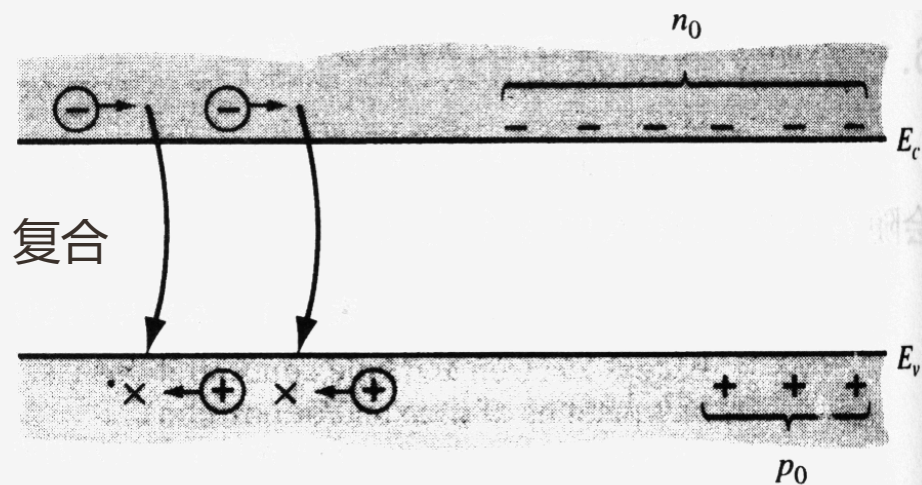
非平衡载流子的产生

产生率：单位时间单位体积中产生的载流子数



非平衡载流子的复合

复合率：单位时间单位体积中复合的载流子数



第四章 非平衡载流子

• 4.1 非平衡载流子的注入与复合

4.1.2 非平衡载流子的产生与复合

光注入：当用一束光子能量大于半导体禁带宽度的光照射处于热平衡状态的半导体时，价带电子因为吸收光子而跃迁到导带，形成电子空穴对。（光照产生非平衡载流子）

这一过程使得载流子数量超过热平衡状态时的载流子数量。超出的这部分载流子，称为**非平衡载流子**。

在光照强度一定的情况下，（1）开始，载流子的产生率>复合率，产生非平衡载流子，（2）随着非平衡载流子浓度的增加，复合率升高，（3）最后，产生率 = 复合率，达到**稳态**。半导体内有稳定的 Δn 和 Δp 。

第四章 非平衡载流子

- 4.1 非平衡载流子的注入与复合

- 4.1.2 非平衡载流子的产生与复合

多子、少子概念：

◆ **n 型半导体**： n 为多数载流子， Δn 为非平衡多数载流子（**非平衡多子**）， p 为少数载流子， Δp 为非平衡少数载流子（**非平衡少子**）

◆ **p 型半导体**： p 为多数载流子， Δp 为非平衡多数载流子（**非平衡多子**）， n 为少数载流子， Δn 为非平衡少数载流子（**非平衡少子**）

第四章 非平衡载流子

• 4.1 非平衡载流子的注入与复合

例子 $1\Omega\cdot cm$ 的 n 型半导体: $n_0 \approx 5.5 \times 10^{15} cm^{-3}$, $p_0 \approx 3.1 \times 10^4 cm^{-3}$

$$\Delta n = \Delta p = 10^9 cm^{-3}, \Delta n \ll n_0, \Delta p \gg p_0$$

$$n = n_0 + \Delta n \approx 5.5 \times 10^{15} cm^{-3}$$

$$p = p_0 + \Delta p \approx 10^9 cm^{-3}$$

- 平衡少数载流子通常非常少，非平衡载流子浓度往往比平衡少数载流子大得多；
- 多数载流子受非平衡载流子影响很小，而非平衡载流子浓度几乎决定了少数载流子浓度。
- 非平衡半导体中非平衡少数载流子对半导体特性影响起主要作用，主要考虑非平衡少子的情况。

第四章 非平衡载流子

• 4.1 非平衡载流子的注入与复合

4.1.3 非平衡载流子的注入（产生）和检验

1.光注入：光照

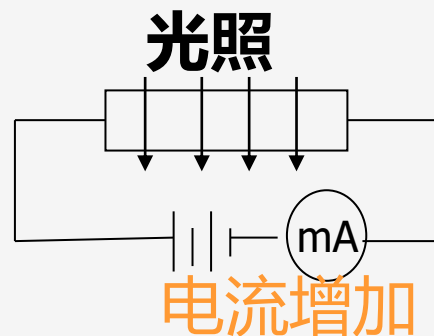
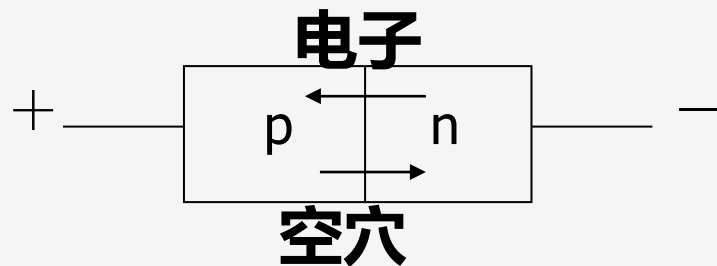
2.电注入：pn结（少数载流子注入）

◆ 非平衡载流子的检测：

非平衡态 $J = \sigma |E| = (nq\mu_n + pq\mu_p) |E|$

平衡态 $J_0 = \sigma_0 |E| = (n_0q\mu_n + p_0q\mu_p) |E|$

$$\begin{aligned} J &= [(n_0 + \Delta n)q\mu_n + (p_0 + \Delta p)q\mu_p] |E| \\ &= (n_0q\mu_n + p_0q\mu_p) |E| + (\Delta nq\mu_n + \Delta pq\mu_p) |E| \\ &= \sigma_0 |E| + \Delta\sigma |E| \quad \longleftarrow \text{附加电导率} \end{aligned}$$



第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命

(撤掉注入会如何?)

撤销光照，非平衡载流子并不会马上消失，而是逐渐减小并最终回到热平衡状态（净复合过程）。该过程的快慢由非平衡载流子的平均生存时间，即非平衡载流子的寿命 τ 决定。

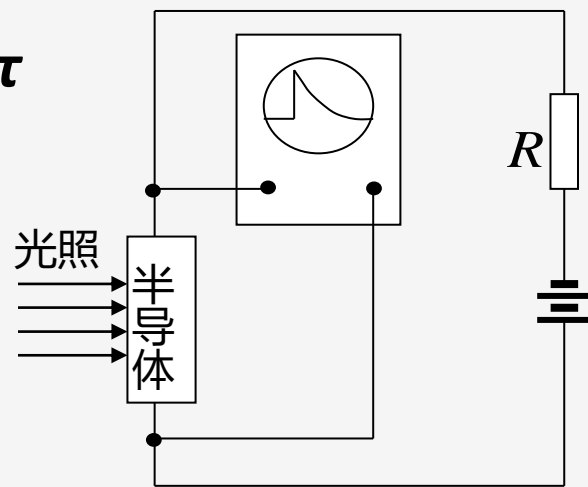
(1)定义

非平衡载流子的平均生存时间 - - 寿命 τ

(2)非平衡载流子寿命的测量

直流光电导测量法

半导体中通过恒定电流，监测半导体两端电压降变化



第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命

(2)非平衡载流子寿命的测量

原理：

附加电导率

即：

$$|\Delta\sigma| \propto |\Delta V|$$

从电压波动可以监测到非平衡载流子的变化


A.无光照

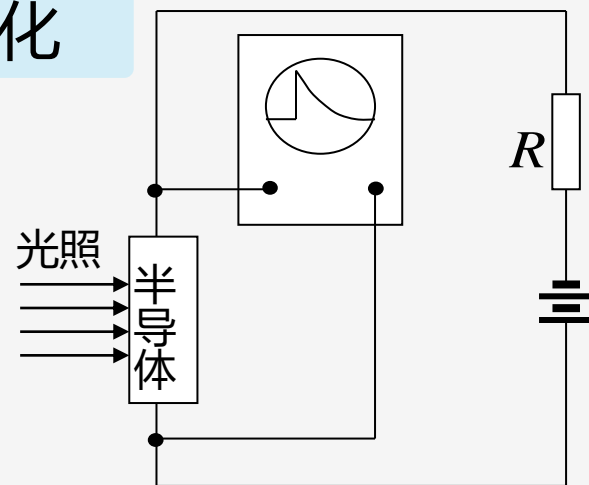
V ———

B.加光照

V 

C.撤销光照

V 



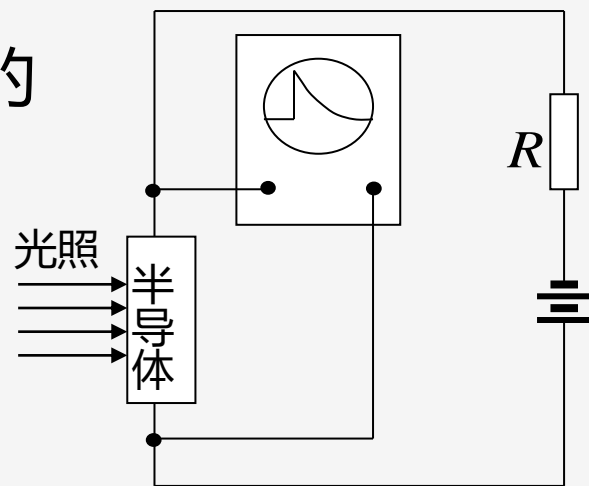
第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命

(2)非平衡载流子寿命的测量

$\frac{1}{\tau}$: 单位时间内非平衡载流子的复合几率

$\Delta p \frac{1}{\tau}$: 单位时间单位体积净复合消失的电子空穴对数 - - **复合率**



第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命

(3)非平衡少子寿命的计算 (n型半导体, 非平衡少子: Δp)

一束光照下的非平衡载流子为: Δn 、 Δp

$t=0$ 时刻停止光照, 非平衡载流子 $(\Delta p)_0$

经过 t 秒后, 非平衡少子浓度 $\Delta p(t)$, 还有 $\Delta p(t)$ 没有复合

经过 $t + \Delta t$ 秒后, 非平衡少子浓度 $\Delta p(t + \Delta t)$

$$\Delta t \text{内复合的少子数 } \Delta p(t) - \Delta p(t + \Delta t) = \underbrace{\frac{\Delta p(t)}{\tau}}_{\text{复合率}} \Delta t$$

第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命

(3)非平衡少子寿命的计算 (n型半导体, 非平衡少子: Δp)

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta p(t + \Delta t) - \Delta p(t)}{\Delta t} = -\frac{\Delta p(t)}{\tau} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\Delta p(t)}{dt} = -\frac{\Delta p(t)}{\tau}$$

小注入时 τ 是一常量, 代入初始条件解得:

$$\Delta p(t) = (\Delta p)_0 e^{-t/\tau} \quad \text{撤销光照后, 少数载流子浓度随 } t \text{ 的衰减规律}$$

$$t=\tau: \Delta p(\tau) = (\Delta p)_0 / e$$

非平衡载流子浓度衰减到原来的1/e所需时间

第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命


(3)非平衡少子寿命的计算 (n型半导体, 非平衡少子: Δp)

τ : 非平衡载流子的平均生存时间, τ 越小, 衰减越快

dt 时间内有 $d\Delta p(t)$ 个少子复合, 其生存时间为 t , 可以求所有少数载流子的平均生存时间:

$$\bar{t} = \int t d\Delta p(t) / \int d\Delta p(t) = \int_0^\infty t e^{-t/\tau} dt / \int_0^\infty e^{-t/\tau} dt = \tau$$

$\Delta p(t) = (\Delta p)_0 e^{-t/\tau}$

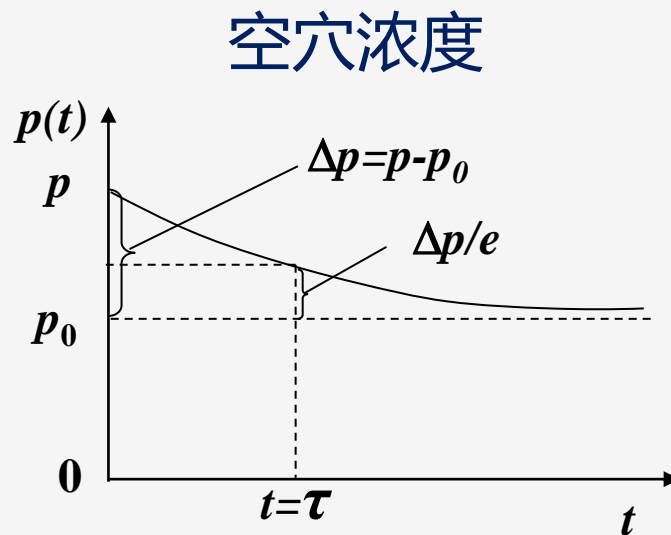
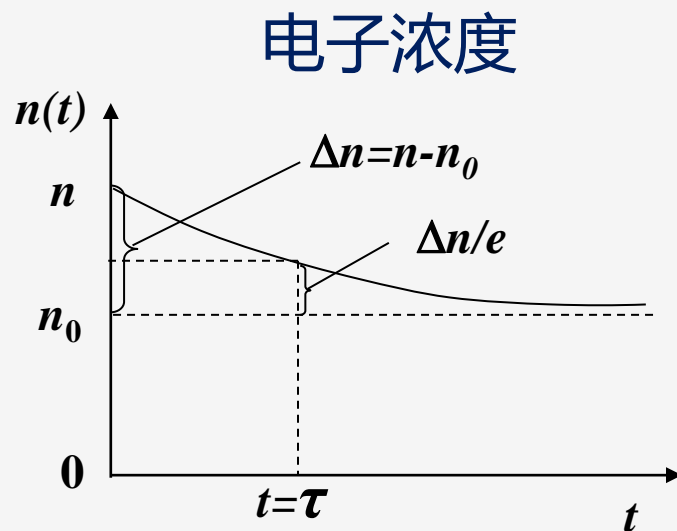


第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命

(4)寿命的测量结果

在 $\Delta p(t)$ 曲线上，纵坐标等于 $(\Delta p)_0 / e$ 对应的 t ，即为测量的少数载流子寿命。



第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命

(5) 几种材料的非平衡少数载流子寿命

- 完整的Ge单晶 $10^4 \mu\text{s}$
- 完整的Si单晶 $10^3 \mu\text{s}$
- GaAs: 10^{-8} - 10^{-9} s , 寿命短

同一种材料，不同条件下，寿命差别可以很大

第四章 非平衡载流子

• 4.2 非平衡载流子的寿命

(5) 几种材料的非平衡少数载流子寿命

载流子的激发与复合过程

在热平衡下

➤ 满足 $pn=n_i^2$

非平衡态下

➤ 若有载流子的注入, $pn>n_i^2$

➤ 通过光注入或电注入

恢复到平衡态

➤ 释放能量

➤ 直接复合或间接复合

第四章 非平衡载流子

• 4.3 非平衡态下载流子浓度的表示法，准费米能级

● 平衡态系统电子和空穴具有统一的费米能级

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}\right) \quad p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_0 T}\right)$$

- 当系统平衡态被破坏时，可以认为导带和价带分别处在各自的平衡态，只是导带和价带之间处于**非平衡态**，分别引入导带费米能级和价带费米能级，是局部的费米能级——“准费米能级”。

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F^n}{k_0 T}\right) \quad p = N_v \exp\left(-\frac{E_F^p - E_v}{k_0 T}\right)$$

原因：

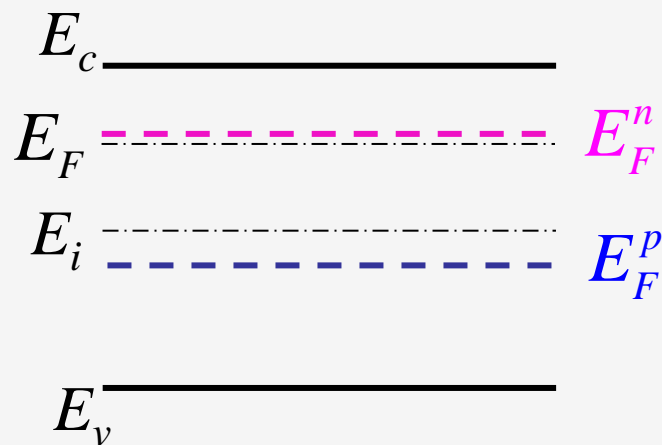
1. 能带范围内热跃迁非常频繁，极短时间内就能达到热平衡。
2. 能带之间的热平衡由于跃迁稀少，达成平衡速度缓慢。

第四章 非平衡载流子

• 4.3 非平衡态下载流子浓度的表示法，准费米能级

- 引入准费米能级后，非平衡状态下的载流子浓度为：

$$\left. \begin{aligned} n &= N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F^n}{k_0 T}\right) \\ p &= N_v \exp\left(-\frac{E_F^p - E_v}{k_0 T}\right) \end{aligned} \right\}$$



n型半导体

利用 n_0 和 p_0 将上式改写：

$$\left. \begin{aligned} n &= N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F^n}{k_0 T}\right) = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F + E_F - E_F^n}{k_0 T}\right) = n_0 \exp\left(\frac{E_F - E_F^n}{k_0 T}\right) \\ p &= N_v \exp\left(-\frac{E_F^p - E_v}{k_0 T}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_F^p - E_F + E_F - E_v}{k_0 T}\right) = p_0 \exp\left(\frac{E_F - E_F^p}{k_0 T}\right) \end{aligned} \right\}$$

第四章 非平衡载流子

- 4.3 非平衡态下载流子浓度的表示法，准费米能级
 - 引入准费米能级后，非平衡状态下的载流子浓度为：

$n > n_0$, $E_F^n > E_F$ 导带准费米能级更加靠近导带底

$p > p_0$, $E_F^p < E_F$ 价带准费米能级更加靠近价带顶

第四章 非平衡载流子

• 4.3 非平衡态下载流子浓度的表示法，准费米能级

例：p型半导体，小注入条件下

$$\Delta n \gg n_0, \Delta p \ll p_0$$

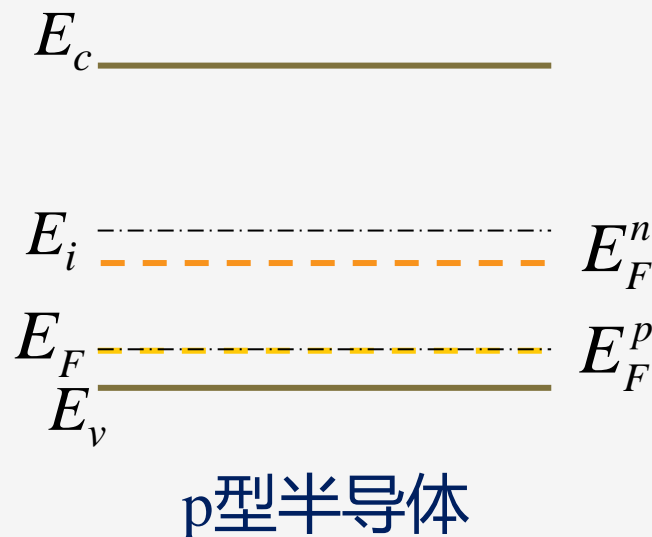
$$\text{即: } n \gg n_0, p \approx p_0$$

E_F^n 显著偏离 E_F

E_F^p 偏离 E_F 很少

$$n = n_0 \exp\left(\frac{E_F^n - E_F}{k_0 T}\right)$$

$$p = p_0 \exp\left(\frac{E_F - E_F^p}{k_0 T}\right)$$



第四章 非平衡载流子

• 4.3 非平衡态下载流子浓度的表示法，准费米能级

例：p型半导体，小注入条件下

载流子浓度乘积：

$$np = n_0 p_0 \exp\left(\frac{E_F^n - E_F^p}{k_0 T}\right) > n_i^2$$

E_c _____



E_F^n 和 E_F^p 偏离的大小直接反映 np 和 n_i^2 相差大小

1. E_F^n 和 E_F^p 相差越大，偏离平衡态越多
2. 多子准费米能级偏离平衡态费米能级少，少子偏离多

第四章 非平衡载流子

• 4.3 非平衡态下载流子浓度的表示法，准费米能级

电子和空穴的准费米能级

E_F^n , E_F^p 同费米能级 E_F 的偏离为：

$$\left. \begin{aligned} E_F^n - E_F &= k_0 T \ln \frac{n_0 + \Delta n}{n_0} & n &= N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F^n}{k_0 T}\right) = n_0 \exp\left(\frac{E_F^n - E_F}{k_0 T}\right) \\ E_F - E_F^p &= k_0 T \ln \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} & p &= N_v \exp\left(-\frac{E_F^p - E_v}{k_0 T}\right) = p_0 \exp\left(\frac{E_F - E_F^p}{k_0 T}\right) \end{aligned} \right\}$$

第四章 非平衡载流子

• 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.1 复合方式分类

(1) 按复合过程微观机构

直接复合

导带与价带之间直接跃迁

间接复合

通过禁带中的能级（复合中心）复合

(2) 按复合发生的位置

体内复合

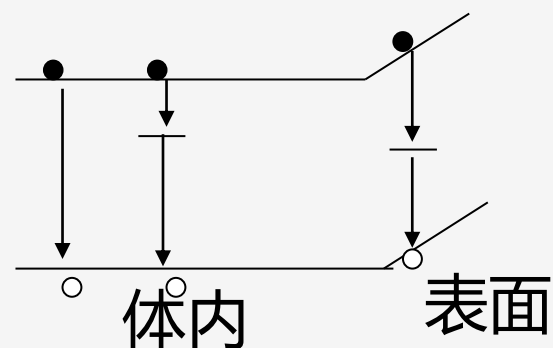
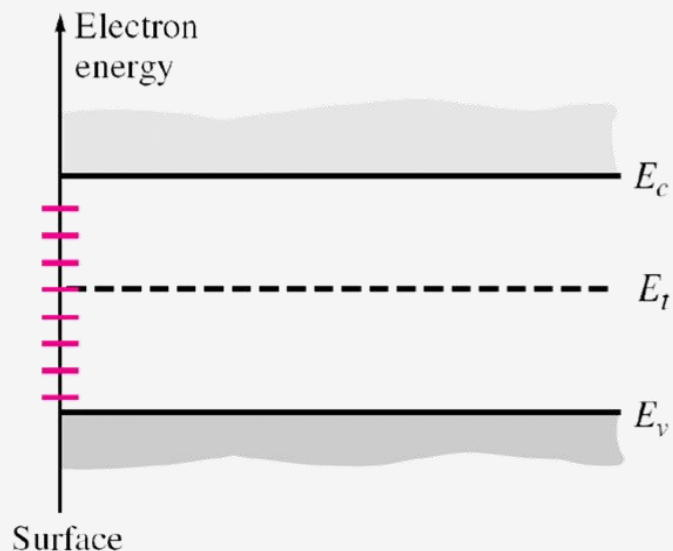
表面复合

(3) 按复合后载流子放出能量

发射光子 发光现象称发光复合或辐射复合

发射声子 能量给予晶格

能量给予其他载流子，俄歇复合



第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.2 直接复合

同一种半导体复合总是伴有产生，

当复合率 > 产生率： **净复合**—复合过程

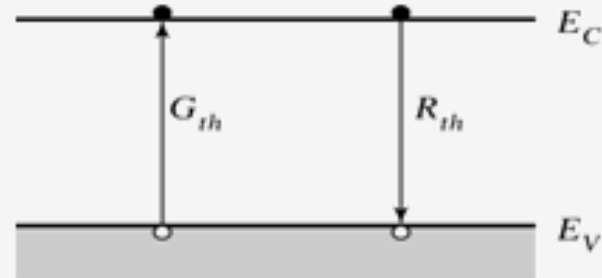
当复合率 < 产生率： **净产生**—产生过程

产生率G：单位时间单位体积中产生的电子空穴对

复合率R：单位时间单位体积中复合的电子空穴对

净复合率 $U = R - G$ $U > 0$ 净复合过程

$U < 0$ 净产生过程



第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.2 直接复合

- 直接复合的净复合率

$$U_d = R - G$$

$$U_d > 0 \quad \text{净复合}$$

$$U_d < 0 \quad \text{净产生}$$

设导带电子浓度 n , 价带空穴浓度 p

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.2 直接复合

A. 复合率

复合率与导带中电子浓度和价带中空穴浓度成正比

$$R = rnp$$

(r 为复合几率, 与温度有关, 与 n 和 p 无关)

平衡态复合率

$$R_0 = rn_0p_0$$

复合率 = 产生率

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.2 直接复合

B.产生率

产生率与导带中空状态数（不被电子占据的状态）和价带中的电子数成正比

导带基本为空，价带基本为满：

产生率 = G = 常量 G 与 n 和 p 几乎无关

热平衡时 产生率 $G_0 =$ 复合率 $R_0 = rn_0 p_0 = rn_i^2$

\therefore 产生率 $G = G_0 = rn_i^2$

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.2 直接复合

C. 直接净复合率

$$U_d = R - G = r(np - n_i^2) = r(n_0 + p_0)\Delta p + r(\Delta p)^2$$

- 只存在直接复合时，非平衡载流子寿命：

$$\tau = \frac{\Delta p}{U_d} = \frac{1}{r[(n_0 + p_0) + \Delta p]}$$

$$U_d = r(n_0 + p_0)\Delta p + r(\Delta p)^2$$

$$U_d = \frac{\Delta p}{\tau}$$



$$\tau = \frac{\Delta p}{U_d}$$

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.2 直接复合

◆ 小注入

$$\Delta p \ll (n_0 + p_0) \quad \tau = \frac{1}{r(n_0 + p_0)}$$

$$n\text{型半导体}, \tau = \frac{1}{rn_0}$$

n_0 增加, 寿命减小。所以, 电导率大, 寿命小

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.2 直接复合

◆ 大注入

$\Delta p \gg n_0 + p_0$, $\tau = \frac{1}{r\Delta p}$ 寿命不为常数, 随少子数量减少而增加

室温下本征半导体:

硅: $r=10^{-11} \text{ cm}^3 / \text{s} \rightarrow \tau = 3.5 \text{ s}$

锗: $r=6.5 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 / \text{s} \rightarrow \tau = 0.3 \text{ s}$

第四章 非平衡载流子

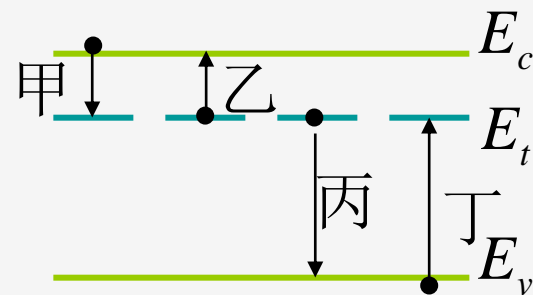
- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

复合中心：杂质能级，缺陷能级，存在于禁带中，起台阶作用，深能级杂质是有效的复合中心

(1)间接复合的微观过程

- 甲：复合中心从导带俘获电子；
- 乙：复合中心向导带发射电子；
- 丙：复合中心从价带俘获空穴；
- 丁：复合中心向价带发射空穴。
- 甲和乙、丙和丁分别为两对互逆过程。



甲和丁为得电子
乙和丙为失电子

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

(2) 间接净复合率

复合中心浓度为 N_t , n_t 为复合中心上的电子浓度

$N_t - n_t$ 为复合中心上的空穴浓度——不被电子占据

✓ 甲过程: 电子俘获率

✓ 丙过程: 空穴俘获率

✓ 乙过程: 电子发射率

✓ 丁过程: 空穴发射率

第四章 非平衡载流子

• 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

(2) 间接净复合率

甲：复合中心从导带俘获电子：

$$\text{电子俘获率} = r_n n (N_t - n_t)$$

乙：复合中心向导带发射电子：

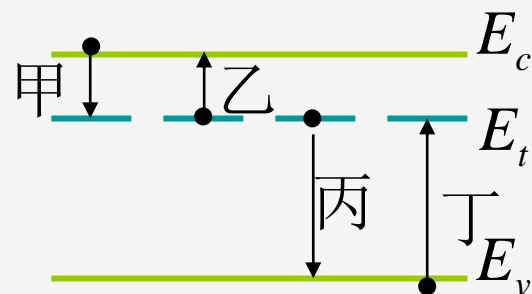
$$\text{电子发射率} = r_n n_1 n_t$$

丙：复合中心从价带俘获空穴：

$$\text{空穴俘获率} = r_p p n_t$$

丁：复合中心向价带发射空穴：

$$\text{空穴发射率} = r_p p_1 (N_t - n_t)$$



$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{k_0 T}\right)$$

$$n_t = \frac{N_t}{1 + \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_0 T}\right)}$$

r_n : 电子俘获系数, 为定值
 r_p : 空穴俘获系数, 定值

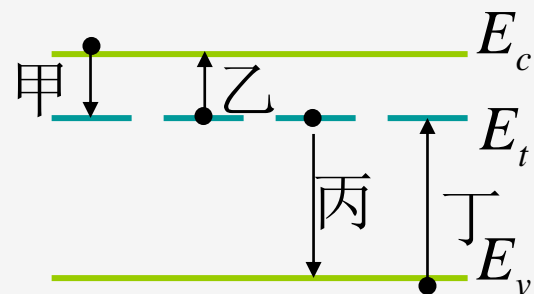
第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

- 复合中心上得到的电子数=失去的电子数：

$$\text{甲} + \text{丁} = \text{乙} + \text{丙}$$



$$\boxed{\text{甲} - \text{乙}} = \boxed{\text{丙} - \text{丁}} = \text{非平衡载流子复合率}$$

导带中电子的
减少

价带中空穴的
减少

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

$$\text{甲} - \text{乙} = \text{丙} - \text{丁}$$

$$r_n n (N_t - n_t) - r_n n_1 n_t = r_p p n_t - r_p p_1 (N_t - n_t)$$

$$\text{解得: } n_t = N_t \frac{(n r_n + p_1 r_p)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)} \quad \text{复合中心上的电子浓度}$$

$$\text{非平衡载流子净复合率 } U = \text{甲} - \text{乙} = \text{丙} - \text{丁} = r_n n (N_t - n_t) - r_n n_1 n_t$$

$$\text{代入 } n_t, \text{ 得 } U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$$

$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{k_0 T}\right)$$

$$p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_t - E_v}{k_0 T}\right)$$

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

(3) 复合率及寿命分析

A. 平衡态:

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$$

$$n = n_0, p = p_0, np - n_i^2 = 0$$

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)} = 0$$

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

(3) 复合率及寿命分析

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$$

B. $np > n_i^2, U > 0$, 净复合

$np < n_i^2, U < 0$, 净产生

C. 有效复合中心能级的位置 (U 最大对应的 E_t 的位置)

$$\text{设 } r_n = r_p = r \quad U = \frac{N_t r (np - n_i^2)}{n + n_1 + p + p_1}$$

$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{k_0 T}\right) = n_i \exp\left(-\frac{E_i - E_t}{k_0 T}\right)$$

$$p_1 = n_i \exp\left(-\frac{E_t - E_i}{k_0 T}\right)$$

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

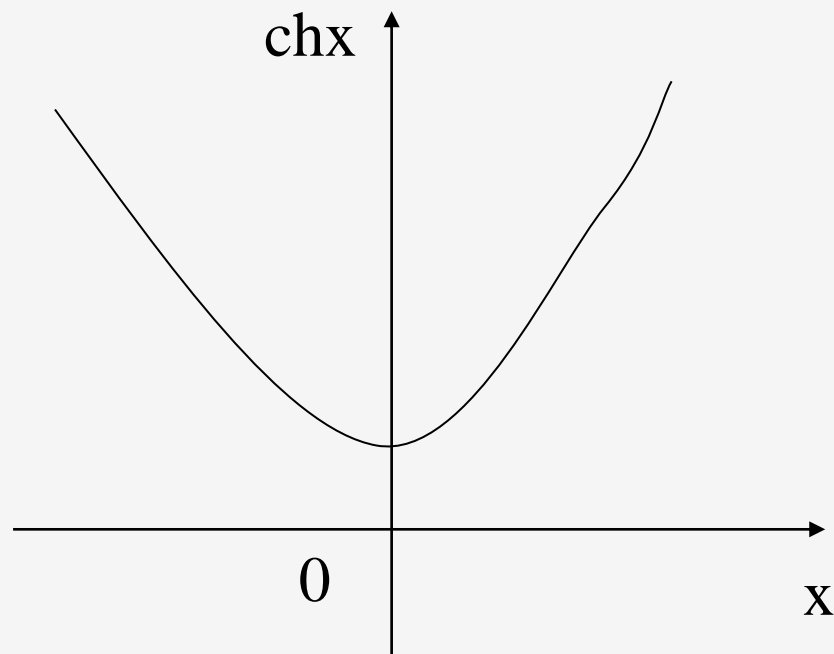
(3) 复合率及寿命分析

$$U = \frac{N_t r (np - n_i^2)}{n + p + 2n_i ch \left(\frac{E_t - E_i}{k_0 T} \right)}$$

双曲余弦 $chx = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$

$x = 0$, chx 最小, 即: $E_t = E_i$, U 最大

E_t 在 E_i 的附近为有效复合中心!



第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)} \qquad U = \frac{\Delta p}{\tau}$$

讨论：小注入情况下两种导电类型和不同掺杂程度的半导体中非平衡载流子的寿命，

$$\tau = \frac{r_n (n_0 + n_1) + r_p (p_0 + p_1)}{N_t r_n r_p (n_0 + p_0)} \quad (\text{假设 } \Delta p = \Delta n)$$

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

① 强n型半导体

$$\tau = \frac{r_n(n_0 + n_1) + r_p(p_0 + p_1)}{N_t r_n r_p (n_0 + p_0)}$$

可以认为： n_0 远大于 p_0 、 n_1 、 p_1

$$\tau = \tau_p \approx \frac{1}{N_t r_p}$$

② 强p型半导体

p_0 最大

$$\tau = \tau_n \approx \frac{1}{N_t r_n}$$



N_t 为复合中心浓度

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

(4)表面复合

- 表面粗糙，表面缺陷多的样品，其少子寿命短 - - 表面复合
 - 表面处杂质及缺陷能级引入复合中心能级 - - 间接复合
-
- 可以用间接复合理论处理表面复合
 - 与表面状态紧密相关
 - 实际寿命是体内复合和表面复合的综合结果

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.3 间接复合

(4) 表面复合

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_s}$$

复合几率 τ_v 体内复合寿命 τ_s 表面复合寿命

表面复合率 U_s : 单位时间通过单位表面积复合掉的电子 - 空穴对

$$U_s = s(\Delta p)_s$$

s 为表面复合速度, 描述表面复合的强弱

由于表面复合而失去的非平衡载流子, 就如同表面处的非平衡载流子 $(\Delta p)_s$, 以 s 大小的垂直速度流出表面。

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

4.4.4 俄歇复合

载流子从高能级向低能级跃迁，电子和空穴复合，把多余的能量传给另一个载流子，使这个载流子被激发到能量更高的能级上，当该载流子重新回到低能级上的时候，将多余的能量以声子的方式放出，称俄歇复合，是一种非辐射复合。

- 通常在窄禁带半导体和高温情况下起重要作用
- 与杂质和缺陷有关的俄歇复合，是影响半导体光电器件发光效率的重要因素。

第四章 非平衡载流子

- 4.4 复合理论 非平衡载流子的寿命取决于载流子复合过程

影响非平衡少数寿命的因素

- ◆ 材料的完整性
- ◆ 杂质原子引入的深能级（复合中心）
- ◆ 表面状态
- ◆ 高能粒子和射线的辐射，造成晶格缺陷，也影响少数寿命