第六章 非平衡载流子

第一节 非平衡载流子注入和准费米能级

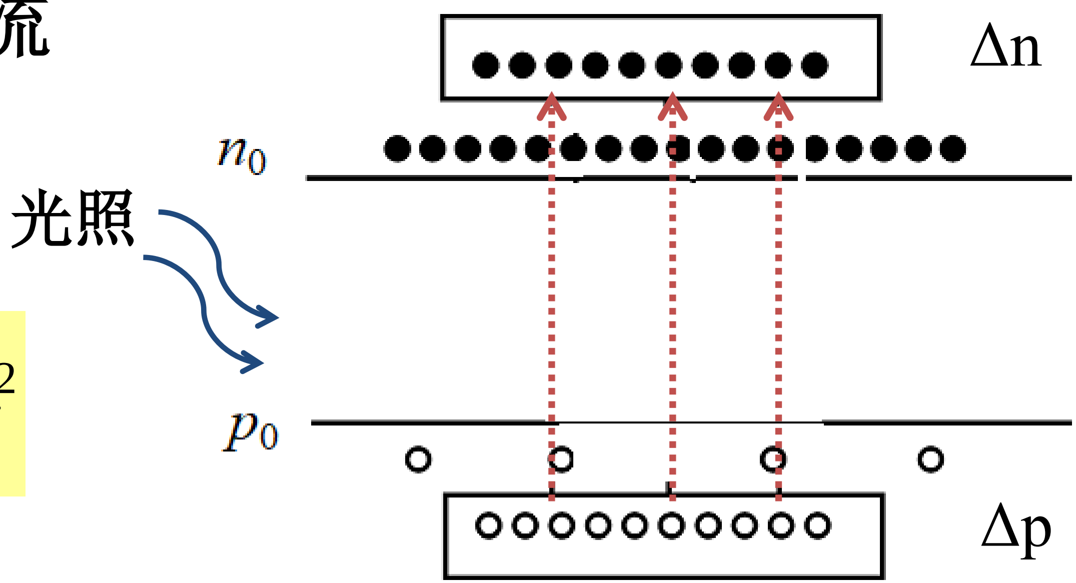
一、非平衡载流子的注入与复合

1、注入

热平衡：受温度影响载流子从价带跃迁到导带

n_0、p_0

$$n_0 p_0 = N_V N_C \exp\left(-\frac{E_g}{K_B T}\right) = n_i^2$$



非平衡：由于外能，更多载流子从价带到导电

$n = n_0 + \Delta n$　　n型：非平衡多子，p型：非平衡少子

$p = p_0 + \Delta p$　　n型：非平衡少子，p型：非平衡多子

$\Delta n = \Delta p$

小注入：注入的非平衡载流子浓度
比平衡时的多数载流子浓度小得多

说明：1、虽然小注入非平衡载流子比平衡时多子少，
但往往比少子多
2、非平衡少数载流子对性能影响起重要作用
3、非平衡少子常被称为非平衡载流子

如：

光注入 → 载流子浓度增加 → 导电能力提高 → 电导率增大（光电导）

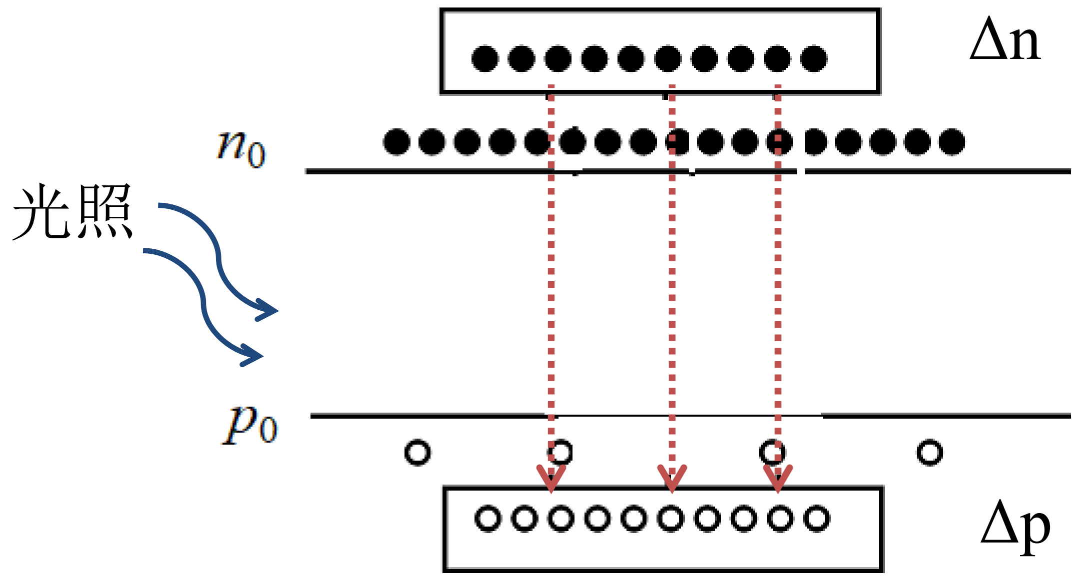
电、光、热注入

P-N结正偏

光探测器

热探测器

外场撤出后？



非平衡载流子仍存在，比热平衡时多，
热运动中相遇而复合的机会大，超过产生速度，
净复合，直至热平衡。

二、非平衡载流子的寿命

1、定义

寿命 :非平衡载流子的平均生存时间 τ

非平衡少子起主导作用，
非平衡载流子的寿命常称为少数载流子的寿命

$1/\tau$ 单位时间内非平衡载流子的复合几率

$\Delta p/\tau$ 单位时间单位体积内净复合消失的电子-空穴对-复合率

2、衰减规律

n型半导体，光照突然停止，Δp将随时间而变化

单位时间内非平衡载流子的减少

$$-\frac{\mathrm{d}\Delta p(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\Delta p(t)}{\tau}$$

单位时间复合的电子空穴对

小注入时，τ是一个恒量，与 Δp(t) 无关

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

$(\Delta p)_0$：t=0时浓度

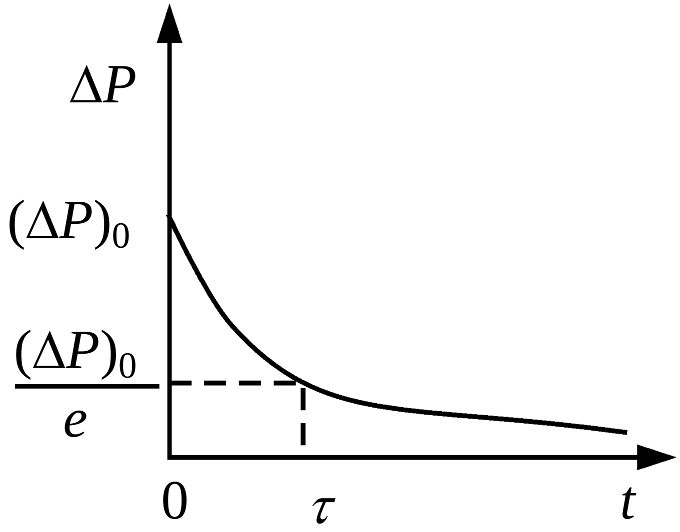
结论：非平衡载流子浓度随时间按指数衰减的规律

3、意义

$$\Delta p(t+\tau)=\Delta p(t)/\mathrm{e}$$

$$t=\tau$$

$$\Delta p(\tau)=(\Delta p)_0/\mathrm{e}$$



寿命标志着非平衡载流子浓度减小到原值的 $1/\mathrm{e}$ 所经历的时间

寿命越短，衰减越快，
非平衡寿命是标志半导体材料的主要性能之一。

三、准费米能级

1、概念

热平衡下，半导体只有一个费米能级。

非简并情况下

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{K_B T}\right)$$

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{K_B T}\right)$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

统一的费米能级是热平衡状态的标志

非平衡时，费米能级不再是统一的

平衡时
- 带内跃迁 —— 多、快
- 带间跃迁 —— 少、慢

导带、价带处于平衡统一的费米能级

非平衡时
- 带内跃迁 —— 多、快
- 带间跃迁 —— 多

导带、价带各自处于平衡彼此不平衡

费米能级、统计分别函数针对平衡而言的，各自的费米能级，局部费米能级

2、位置确定

已知

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F^{\,n}}{K_B T}\right)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F^{\,p} - E_v}{K_B T}\right)$$

可求

3、特点

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F^{\,n}}{K_B T}\right) = n_0 \exp\left(\frac{E_F^{\,n} - E_F}{K_B T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_F^{\,n} - E_i}{K_B T}\right)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F^{\,p} - E_v}{K_B T}\right) = p_0 \exp\left(\frac{E_F - E_F^{\,p}}{K_B T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F^{\,p}}{K_B T}\right)$$

$$E_F^n - E_F = K_B T \ln \frac{n}{n_0}$$

$$E_F - E_F^p = K_B T \ln \frac{p}{p_0}$$

1、非平衡载流子浓度越大，准费米能级越偏离EF

2、多子准费米能级靠近，少子准费米能级离E_F较远

3、准费米能级偏离大小反映了偏离热平衡态的程度

（大：显著；小：接近；重合-平衡态）

Δ

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

Δ大小直接反映出**np**与**n_i^2**相差程度

反映半导体偏离热平衡态的程度

大：不平衡大
小：不平衡小
重合：平衡

第二节 非平衡载流子的复合

热平衡时，载流子产生－复合过程：

非平衡时，载流子产生－复合过程：

复合机理：直接复合－导带和价带间直接跃迁

间接复合－通过禁带的能级复合

一、直接复合

1、非平衡载流子的复合率

G-产生率（与外场有关）

R-复合率（与浓度有关）。 $R=\gamma np$

U-净复合率

热平衡时： $G_0=R_0=\gamma n_0 p_0=\gamma n_i^2$

有外场：**G>R**，存在净产生

撤去外场，存在净复合：

$$u=R-G=R-G_0=\gamma(np-n_i^2)$$

$$u = R - G = R - G_0 = \gamma(np - n_i^2)$$

将 $n = n_0 + \Delta n$ $p = p_0 + \Delta p$

$\Delta n = \Delta p$ 代入上式

$$u = \gamma(n_0 + p_0 + \Delta p)\Delta p$$

2、非平衡载流子的寿命

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

$$\tau = \frac{\Delta p}{u} = \frac{1}{\gamma(n_0 + p_0 + \Delta p)}$$

1)、小注入

$$\Delta p \ll n_0 + p_0$$

$$\tau = \frac{1}{\gamma(n_0 + p_0)}$$

n型半导体：$\tau \approx \frac{1}{\gamma n_0}$

p型半导体：$\tau \approx \frac{1}{\gamma p_0}$

在小注入，

a.温度、掺杂一定，寿命是一个常数。

b.寿命与多数载流子浓度成反比。

2)、大注入

$$\Delta p \gg n_0 + p_0$$

$$\tau \approx \frac{1}{\gamma \Delta p}$$

寿命随非平衡载流子浓度而改变

二、间接复合

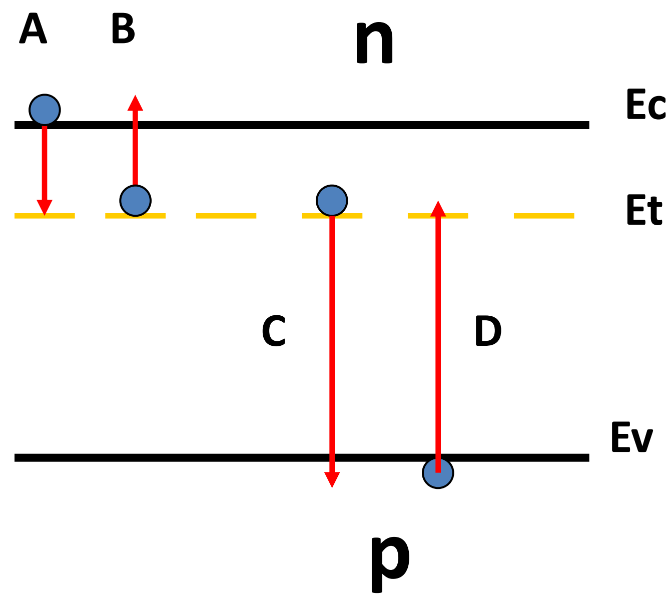
1、电子的俘获与产生（Et）

A：俘获电子

B：发射电子

C：俘获空穴

D：发射空穴



Nt：复合中心浓度

n_t：复合中心能级上电子

Nt－n_t：复合中心能级上未被电子占据的浓度

1）电子俘获率 $r_n n(N_t - n_t)$

2）电子产生率 $s_- n_t$　　与温度有关

热平衡下，电子产生率＝电子俘获率

$$s_- n_{t0} = r_n n_0 (N_t - n_{t0})$$

$$s_- n_t = r_n n_1 n_t$$

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

电子俘获和发射两个对立过程的内在联系

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

费米能级与复合中心能级重合时导带的平衡电子浓度

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{K_B T}\right)$$

净俘获率：$u_n = r_n[n(N_t - n_t) - n_1 n_t]$

2、空穴的俘获与产生（**Et**）

$$p_1 = N_v \exp(-\frac{E_t - E_v}{K_B T})$$

$$r_p p_1 (N_t - n_t)$$

净俘获率：$u_p = r_p[p n_t - p_1 (N_t - n_t)]$

3、非平衡载流子的复合率

稳定情况，复合中心上电子浓度不变，电子的净俘获率等于空穴的净俘获率，也是非平衡载流子的复合率：

$$u = u_n = u_p$$

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

$$n_t = N_t \frac{(n r_n + p_1 r_p)}{r_n(n+n_1) + r_p(p+p_1)}$$

$$n_1 p_1 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{K_B T}\right) = n_i^2$$

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

热平衡U=0

适用于U>0

产生非平衡载流子U<0

$$u=\frac{N_t r_n r_p (n_0+p_0+\Delta p)\Delta p}{r_n(n_0+n_1+\Delta n)+r_p(p_0+p_1+\Delta p)}$$

4、非平衡载流子的寿命

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

（1）小注入

Δp小，$r_n \approx r_p$

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

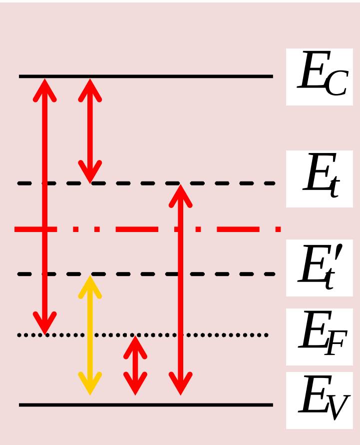
$$n_0 : n_1 : p_0 : p_1 = \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{K_B T}\right) : \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{K_B T}\right) : \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{K_B T}\right) : \exp\left(-\frac{E_t - E_v}{K_B T}\right)$$

小

Et接近Ec

强p型区

p型高阻区



p_0最大

n_1最大

p_0》 n_0

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

$$\tau = \frac{1}{N_t r_p}\frac{n_1}{p_0} = \tau_p \frac{n_1}{p_0}$$

			少子	Et接近价带	Et接近导带
强p型区	$p_0 \gg n_0$	p_0最大	电	$\tau=\tau_n\approx\frac{1}{N_t r_n}$	$\tau=\tau_n\approx\frac{1}{N_t r_n}$
强n型区	$n_0 \gg p_0$	n_0最大	空	$\tau=\tau_p=\frac{1}{N_t r_p}$	$\tau=\tau_p=\frac{1}{N_t r_p}$
p型高阻区	$p_0 \gg n_0$	n_1最大	电	$\tau=\frac{1}{N_t r_p}\frac{n_1}{p_0}=\tau_p\frac{n_1}{p_0}$	$\tau=\tau_n\frac{p_1}{p_0}$
n型高阻区	$n_0 \gg p_0$	P_1最大	空	$\tau=\frac{1}{N_t r_p}\cdot\frac{n_1}{n_0}=\tau_p\cdot\frac{n_1}{n_0}$	$\tau=\tau_n\frac{p_1}{n_0}$

说明：a.**区是相对的，与复合中心能级位置有关

b.强**区寿命决定于复合中心对少子的俘获系数

c.高阻区寿命与多数载流子浓度成反比

（2）大注入寿命

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

$$\tau=\frac{1}{N_t r_p}+\frac{1}{N_t r_n}=\tau_p+\tau_n$$

5、有效复合中心

$$u=\frac{np-n_i^2}{\tau_p(n+n_1)+\tau_n(p+p_1)}$$

$$u=\frac{N_t r(np-n_i^2)}{n+p+2n_i\cosh(\frac{E_t-E_i}{K_B T})]}$$

分析：a.Et≈Ei，U取极大，

位于禁带中央附近的深能级是最有效的复合中心。

b.远离禁带中心的浅能级不能起有效复合中心的作用。

第四节　非平衡载流子的扩散和漂移运动
爱因斯坦关系式

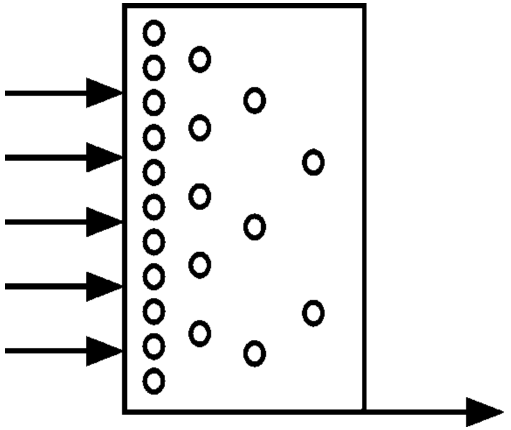
一、非平衡载流子的扩散运动

粒子浓度的不均匀引起的

总的趋势：浓度高向低，最后趋于均匀

1、扩散定律

浓度梯度 $= \dfrac{d\Delta p(x)}{dx}$



扩散流密度Sp：单位时间通过垂直于x轴的单位面积的粒子数

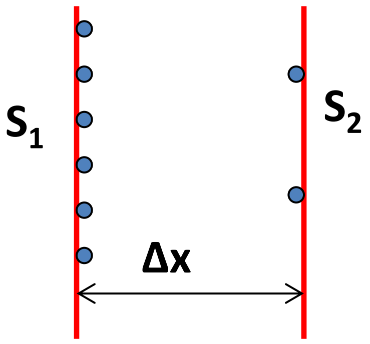
实验发现，扩散流密度与非平衡载流子浓度梯度成正比

$$S_p = -D_p \frac{\mathrm{d}\Delta p(x)}{\mathrm{d}x}$$

2、稳定扩散方程

总的空穴浓度不随时间改变而形成稳定的分布

单位时间在单位体积内积累的空穴数
等于单位体积内由于复合而消失的空穴数



$$-\frac{\mathrm{d}S_p(x)}{\mathrm{d}x} = D_p \frac{\mathrm{d}^2\Delta p(x)}{\mathrm{d}x^2} = \frac{\Delta p(x)}{\tau}$$

稳定扩散方程

电子：

$$S_n = -D_n \frac{\mathrm{d}\Delta n(x)}{\mathrm{d}x}$$

$$D_n \frac{\mathrm{d}^2\Delta n(x)}{\mathrm{d}x^2} = \frac{\Delta n(x)}{\tau_n}$$

扩散电流：

$$(J_p)ry = -qD_P \frac{\mathrm{d}\Delta p(x)}{\mathrm{d}x}$$

$$(J_n)_{?} = qD_n \frac{\mathrm{d}\Delta n(x)}{\mathrm{d}x}$$

二、非平衡载流子漂移运动和爱因斯坦关系式

1、非平衡载流子的漂移电流

在外加电场作用下，载流子作漂移运动，产生漂移电流

$$(J_n)_{漂} = q(n_0 + \Delta n)\mu_n |\boldsymbol{E}| = qn\mu_n |\boldsymbol{E}|$$

$$(J_p)_{漂} = q(p_0 + \Delta p)\mu_p |\boldsymbol{E}| = qp\mu_p |\boldsymbol{E}|$$

非平衡载流子浓度不均匀，同时又有外加电场

$$J_P = (J_P)_{漂} + (J_p)_{\text{�}} = qp\mu_p |\boldsymbol{E}| - qD_p \frac{\mathrm{d}\Delta p}{\mathrm{d}x}$$

$$J_n = (J_n)_{漂} + (J_n)_{\text{�}} = qn\mu_p |\boldsymbol{E}| + qD_n \frac{\mathrm{d}\Delta n}{\mathrm{d}x}$$

迁移率是反映载流子在电场作用下运动难易程度的物理量，
而扩散系数反映存在浓度梯度时载流子运动的难易程度。

2、爱因斯坦关系式

热平衡状态非均匀的n型半导体，其中施主杂质浓度随x的增加而下降。

一方面浓度不均有扩散运动，产生电流；
另一方面由于扩散电荷分布不均形成内场，漂移运动
平衡条件下，不存在宏观电流，
电子总电流和空穴总电流分布为零

$$J_n = (J_n)_{\text{漂}} + (J_n)_{?} = 0$$

$$J_p = (J_p)_{\text{漂}} + (J_p)_{?} = 0$$

$$n_0(x)\mu_n|\boldsymbol{E}| = -D_n \frac{\mathrm{d}n_0(x)}{\mathrm{d}x}$$

$$|\boldsymbol{E}| = -\frac{\mathrm{d}V(x)}{\mathrm{d}x}$$

$$n_0(x) = N_c \exp[-\frac{E_c - qV(x) - E_F}{K_B T}]$$

$$\frac{\mathrm{d}n_0(x)}{\mathrm{d}x} = n_0(x)\frac{q}{K_B T}\frac{\mathrm{d}V(x)}{\mathrm{d}x}$$

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{K_B T}{q}$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{K_B T}{q}$$

爱因斯坦关系式

非简并情况下载流子迁移率和扩散系数之间的关系