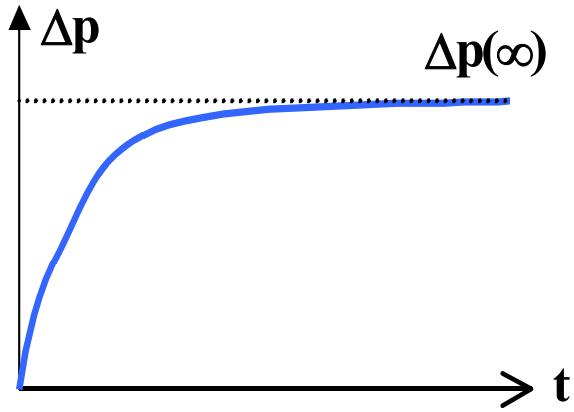
7.1 非平衡载流子的注入与复合6

7.1.4 非平衡载流子的产生

光强恒定，非平衡载流子随时间的变化

产生率：g　　复合率　$\left|\frac{d\Delta p(t)}{dt}\right| = \frac{\Delta p(t)}{\tau}$



$$\frac{d\Delta p}{dt} = g - \frac{\Delta p}{\tau}$$

$$\Delta p(t) = g\tau\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]$$

$$\Delta p(\infty) = g\tau$$

$$\Delta p(t) = \Delta p(\infty)\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]$$

第七章 非平衡载流子

7.1 非平衡载流子的注入与复合
7.2 准费米能级
7.3 复合理论
7.4 陷阱效应
7.5 载流子的扩散运动
7.6 载流子的漂移运动、双极扩散
7.7 连续性方程

7.2 准费米能级1

7.2.1 准平衡

热平衡

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

具有统一的 E_F

—— 热平衡的标志

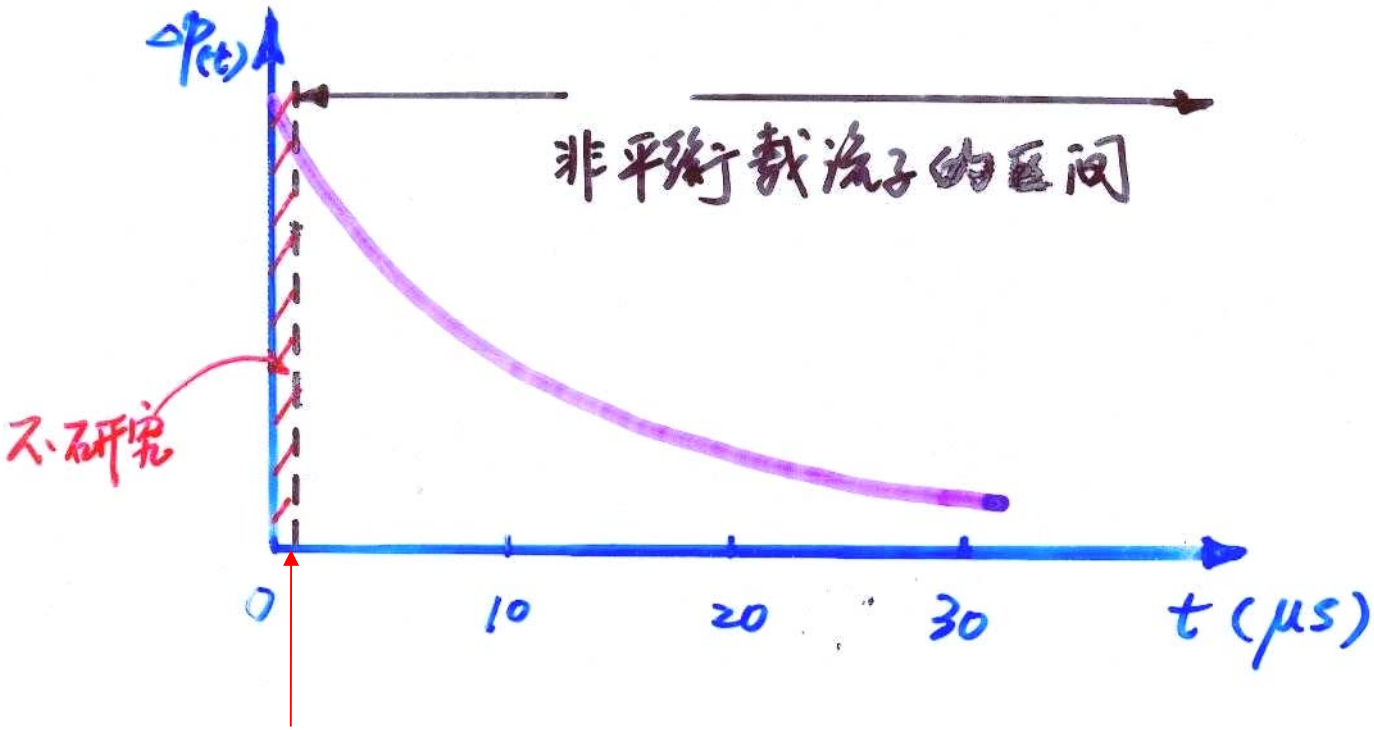
非平衡：没有统一的 E_F

E_F 在各处的不一样 —— 使系统从非平衡向平衡转变的动力

7.2 准费米能级2

7.2.1 准平衡

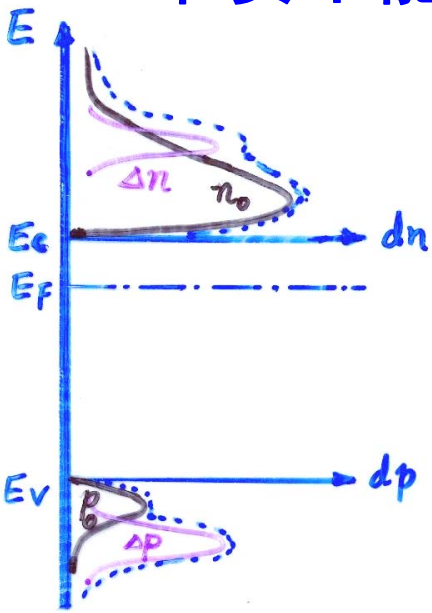
非平衡的含义 —指数量上的非平衡，而在能量分布上还是平衡的（严格地说，准平衡）。



完成准平衡分布时间（晶格驰豫时间 < 10^{-10} s） << 寿命 τ（~ μs）

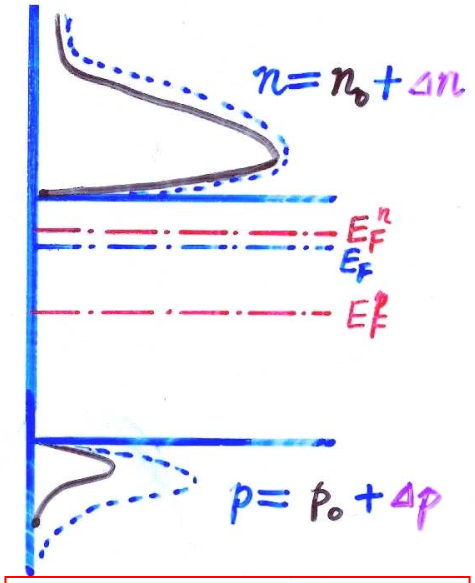
7.2 准费米能级3

7.2.2 准费米能级



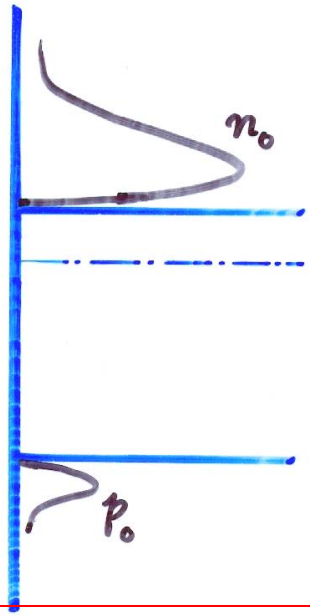
刚注入未达准平衡
（数量不平衡、
能量分布不平衡）

晶格驰豫
$< 10^{-10}$ s



达到准平衡分布
（数量不平衡、
能量分布平衡）

复合
~ μs



热平衡
（数量平衡、
能量分布平衡）

电子子系统与晶格平衡 —— E_F^n

空穴子系统与晶格平衡 —— E_F^p

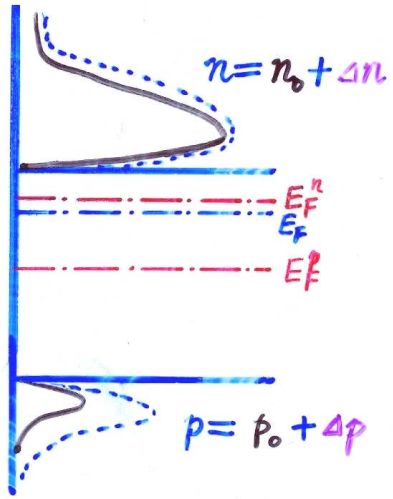
但电子子系与空穴子系不平衡

只能说是准平衡

7.2 准费米能级4

7.2.2 准费米能级

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F^n}{kT}\right) \qquad p = N_V \exp\left(-\frac{E_F^p - E_V}{kT}\right)$$



对于 n 型半导体 $p_0 << \Delta p = \Delta n << n_0$ （小注入）

→ E_F^n 与 E_F 很接近，而 E_F^p 与 E_F 可以有显著的差别。

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

非平衡时 $np \neq n_i^2$

反映了系统偏离热平衡的程度。

例子 $n_0 = 10^{15} cm^{-3}$, $p_0 = 10^5 cm^{-3}$ $\Delta n = \Delta p = 10^{10} cm^{-3}$

$$E_F^n - E_F = kT \ln\frac{n}{n_0} \approx 0$$

$$E_F - E_F^p = kT \ln\frac{p}{p_0} \approx 0.3eV$$

第七章 非平衡载流子

7.1 非平衡载流子的注入与复合
7.2 准费米能级
7.3 复合理论
7.4 陷阱效应
7.5 载流子的扩散运动
7.6 载流子的漂移运动、双极扩散
7.7 连续性方程

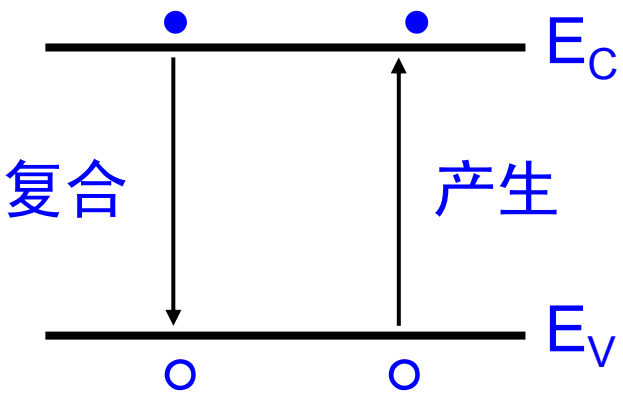
7.3 复合理论1

7.3.1 复合的分类

- 按复合过程分
  - 直接复合
  - 间接复合
- 按复合位置分
  - 体内复合
  - 表面复合
- 按能量交换方式分
  - 辐射复合 （e-光子）
  - 非辐射复合
    - 发射声子 （e-声子）
    - 俄歇复合 （e-e）

7.3 复合理论2

7.3.2 直接复合 —概念引入



—复合过程属于统计性的过程

—带间直接复合

平衡 $R = G$

产生率

复合率（单位时间单位体积内复合掉e-h的对数）

量纲：[$cm^{-3}s^{-1}$]

非平衡 $R \neq G$

净复合率 $U_d = R - G$

复合率 $R \propto np$ 令 $R = rnp$

电子-空穴复合几率（非简并时，r 只与 T 有关，与 n、p 无关）

量纲：[$cm^{3}s^{-1}$]

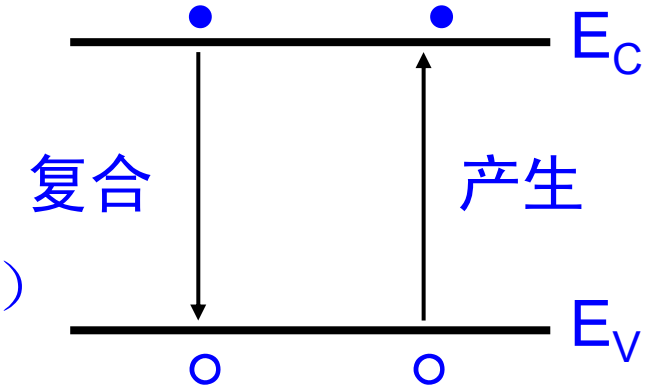
产生率 $G \propto (n_{导带} - n)(n_{价带} - p) \propto n_{导带} \cdot n_{价带}$（常数， 只与 T 有关）

7.3 复合理论3

7.3.2 直接复合

热平衡时 $G_0 = R_0 = rn_0p_0 = rn_i^2$

$\boxed{G \equiv G_0 = rn_i^2}$（常数， 只与 T 有关）



净复合率 $U_d = R - G = r\left(np - n_i^2\right)$

$= r\left[\left(n_0 + \Delta n\right)\left(p_0 + \Delta p\right) - n_0p_0\right]$

$= r\left(n_0 + p_0\right)\Delta p + r\Delta p^2$ —— 取决于多子

7.3 复合理论4

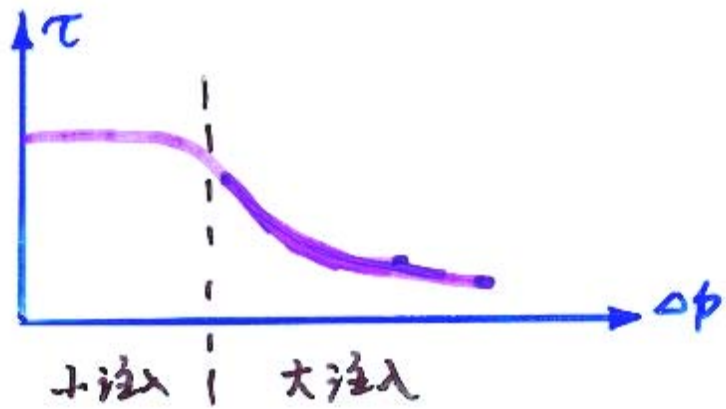
7.3.2 直接复合

一非平衡载流子寿命 τ

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

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

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



小注入 $(n_0 + p_0) >> \Delta p$

$$\tau = \frac{1}{r(n_0 + p_0)} = \begin{cases} \dfrac{1}{rn_0} & \text{（n 型）} \\ \dfrac{1}{rp_0} & \text{（p 型）} \end{cases}$$

大注入 $(n_0 + p_0) << \Delta p$

$$\tau = \frac{1}{r\Delta p}$$

影响 τ 的因素

1° 多子浓度 n_0（p_0）

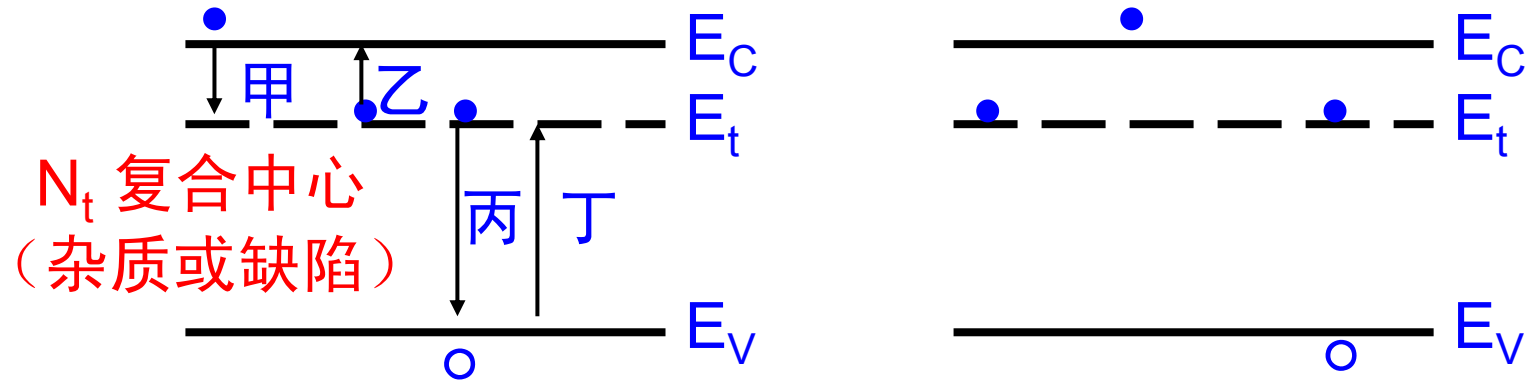
2° r

3° Δp

7.3 复合理论5

7.3.3 间接复合

一间接复合的四个基本过程



甲：电子俘获率 = $r_n n(N_t - n_t)$

电子俘获系数　量纲：[$cm^3 s^{-1}$]

乙：电子发射率 = s_n_t

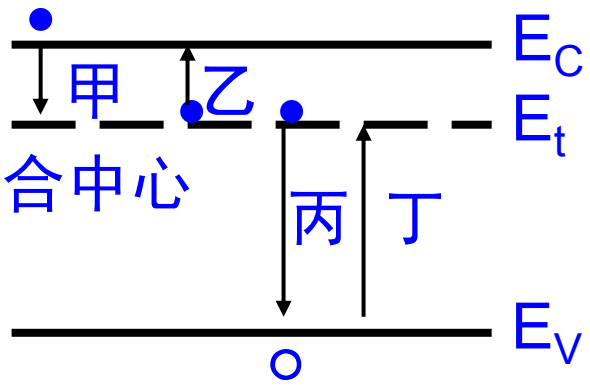
电子激发几率　量纲：[s^{-1}]

丙：空穴俘获率 = $r_p p n_t$

丁：空穴发射率 = $s_+(N_t - n_t)$

7.3 复合理论6

7.3.3 间接复合



N_t 复合中心

—复合率

稳态时　甲＋丁＝乙＋丙

甲－乙＝丙－丁＝净复合率 U

s_-，s_+ 为常数（只与 T 有关，与 n、p 无关）

可用平衡态来求 s_-，s_+　热平衡时　甲＝乙　丙＝丁

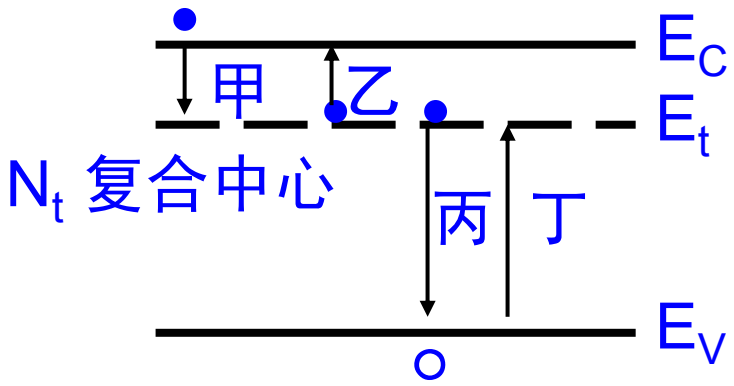
$$s_- n_t = r_n n_0 (N_t - n_t)$$

设 $n_t = \dfrac{N_t}{1+\exp\left(\dfrac{E_t - E_F}{kT}\right)}$ $\longrightarrow$ $s_- = r_n n_1$ 其中 $n_1 = N_C \exp\left(-\dfrac{E_C - E_t}{kT}\right)$

同理 $s_+ = r_p p_1$ 其中 $p_1 = N_V \exp\left(-\dfrac{E_t - E_V}{kT}\right)$

7.3 复合理论7

7.3.3 间接复合



一复合率

稳态时　甲＋丁＝乙＋丙

$s_- = r_n n_1$　　$s_+ = r_p p_1$　常数

代入稳态条件，$r_n n\left(N_t - n_t\right) + r_p p_1\left(N_t - n_t\right) = r_n n_1 n_t + r_p p n_t$

得　$n_t = N_t \dfrac{r_n n + r_p p_1}{r_n\left(n + n_1\right) + r_p\left(p + p_1\right)}$

净复合率 U ＝ 甲－乙 ＝ 丙－丁 ＝ $\dfrac{N_t r_n r_p\left(np - n_i^2\right)}{r_n\left(n + n_1\right) + r_p\left(p + p_1\right)}$

7.3 复合理论8

7.3.3 间接复合

一非平衡载流子寿命 τ

净复合率 $U=\dfrac{N_t r_n r_p\left(np-n_i^2\right)}{r_n\left(n+n_1\right)+r_p\left(p+p_1\right)}$

$$U=\frac{N_t r_n r_p\left(n_0\Delta p+p_0\Delta n+\Delta n\cdot\Delta p\right)}{r_n\left(n_0+\Delta n+n_1\right)+r_p\left(p_0+\Delta p+p_1\right)}$$

小注入 $(n_0+p_0)>>\Delta p,\Delta n$

$r_n\sim r_p$

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

1° $\Delta n=\Delta p$ $\quad U=\dfrac{N_t r_n r_p\left(n_0+p_0\right)\Delta p}{r_n\left(n_0+n_1\right)+r_p\left(p_0+p_1\right)}$

$$\tau=\frac{\Delta p}{U}=\frac{r_n\left(n_0+n_1\right)+r_p\left(p_0+p_1\right)}{N_t r_n r_p\left(n_0+p_0\right)}=\tau_p\frac{n_0+n_1}{n_0+p_0}+\tau_n\frac{p_0+p_1}{n_0+p_0}$$

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

7.3 复合理论9

7.3.3 间接复合

一非平衡载流子寿命 τ

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

2° $\Delta n \neq \Delta p$ 若 n 型，$n_0 > p_0$ 电子 — 多子 空穴 — 少子

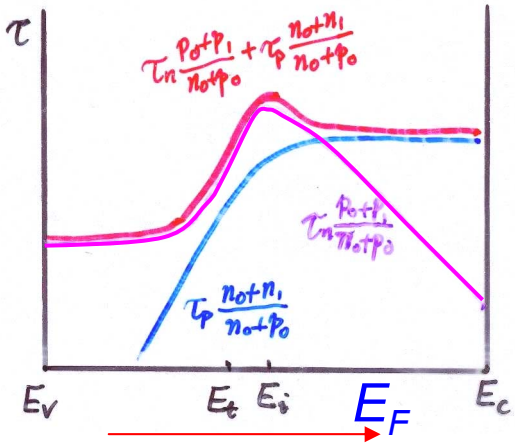
$$U=\frac{N_t r_n r_p n_0\Delta p}{r_n\left(n_0+n_1\right)+r_p\left(p_0+p_1\right)}$$

$$\tau_{少子}=\frac{\Delta p}{U}=\frac{r_n\left(n_0+n_1\right)+r_p\left(p_0+p_1\right)}{N_t r_n r_p n_0}=\tau$$

$$\tau_{多子}=\frac{\Delta n}{U}=\frac{\Delta n}{\Delta p}\frac{\Delta p}{U}=\frac{\Delta n}{\Delta p}\tau$$

若 p 型，……

7.3 复合理论10



7.3.3 间接复合

—不同导电类型的 τ（设 E_t 位于禁带下半部）

导电类型	强 n 型	高阻（很弱 n 型）	强 p 型
	E_C E_F E_t E_V	E_t E_V	E_C E_t E_F E_V
$\max(n_0,p_0,n_1,p_1)$	n_0	p_1	p_0
τ	$\tau=\tau_p=\dfrac{1}{N_t r_p}$	$\tau=\dfrac{p_1}{N_t r_n}\dfrac{1}{n_0}$	$\tau=\tau_n=\dfrac{1}{N_t r_n}$
$\Delta n=\Delta p$	$\tau=\tau_p\dfrac{n_0+n_1}{n_0+p_0}+\tau_n\dfrac{p_0+p_1}{n_0+p_0}$	$\tau_p=\dfrac{1}{N_t r_p}$	$\tau_n=\dfrac{1}{N_t r_n}$