

7.1 非平衡载流子的注入与复合⁶

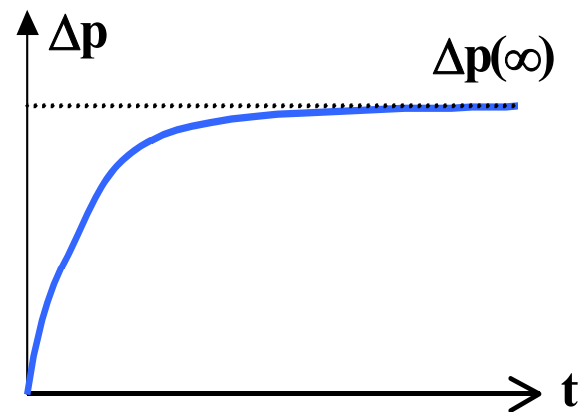
7.1.4 非平衡载流子的产生

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

$$\left\{ \begin{array}{l} n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \\ p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \end{array} \right.$$

具有统一的 E_F
—— 热平衡的标志

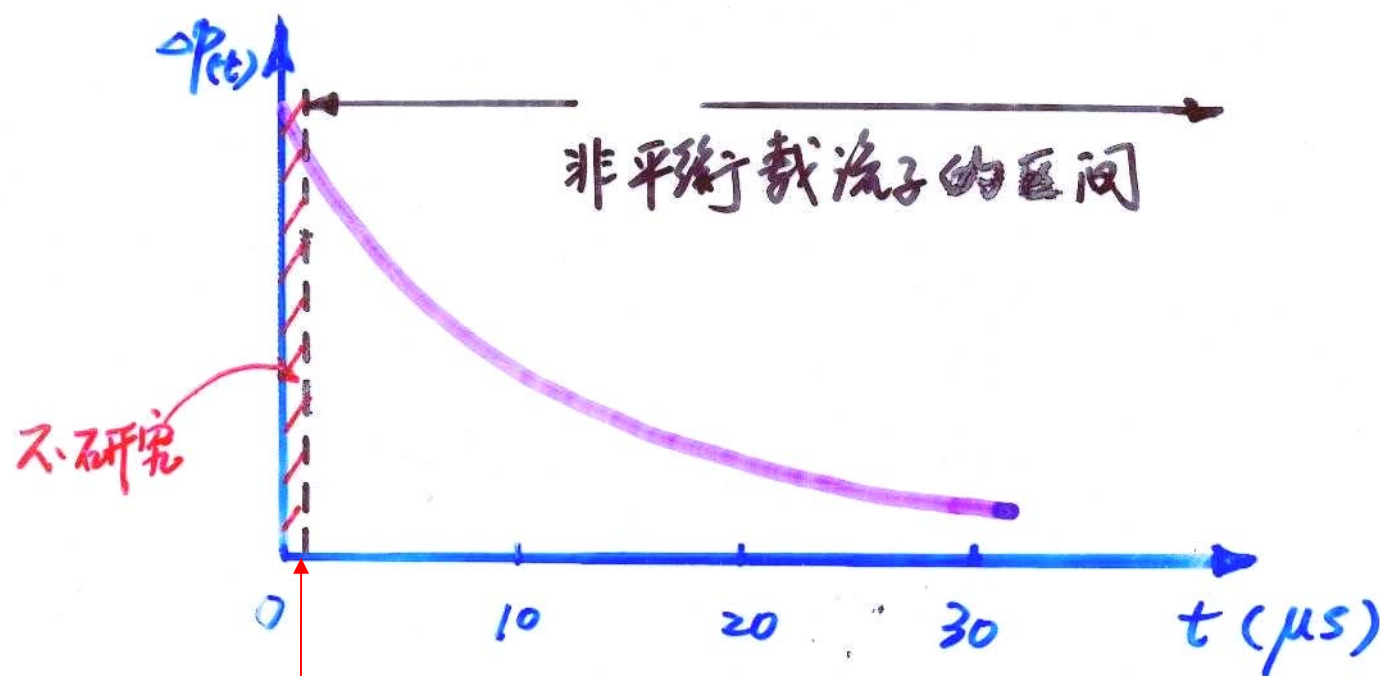
非平衡：没有统一的 E_F

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

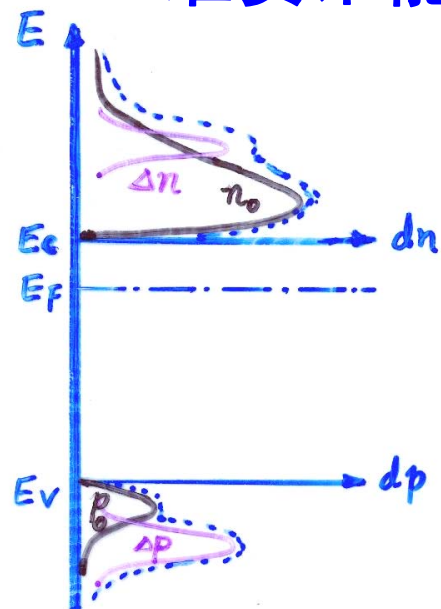
非平衡的含义 一指数量上的非平衡，而在能量分布上还是平衡的（严格地说，**准平衡**）。



完成准平衡分布时间
(晶格弛豫时间 $< 10^{-10}$ s) \ll 寿命 τ ($\sim \mu\text{s}$)

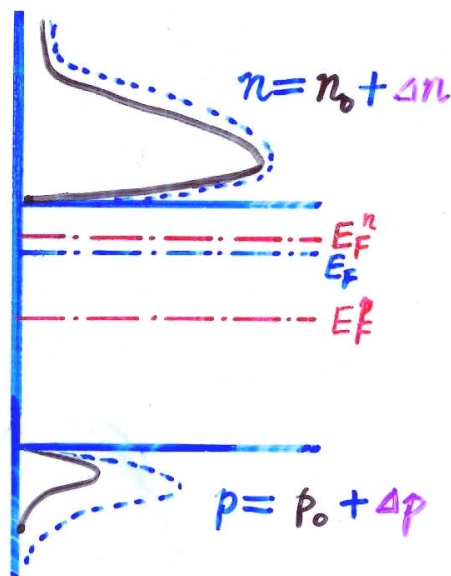
7.2 准费米能级₃

7.2.2 准费米能级



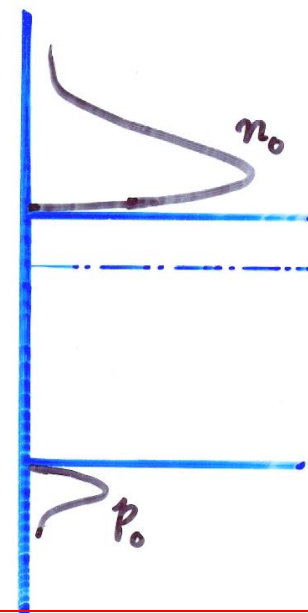
刚注入未达准平衡
(数量不平衡、
能量分布不平衡)

晶格弛豫
 $< 10^{-10}$ s



达到准平衡分布
(数量不平衡、
能量分布平衡)

复合
 $\sim \mu$ s



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

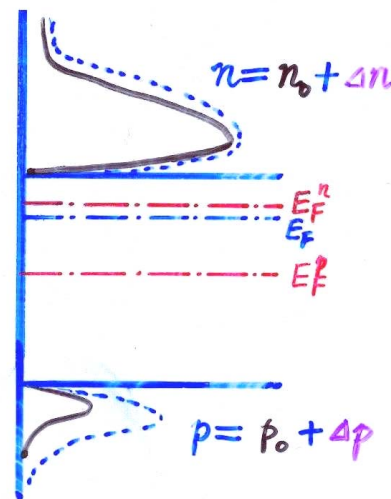
只能说是准平衡

7.2 准费米能级₄

7.2.2 准费米能级

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

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



对于 n 型半导体 $p_0 \ll \Delta p = \Delta n \ll n_0$ (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

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

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

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

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

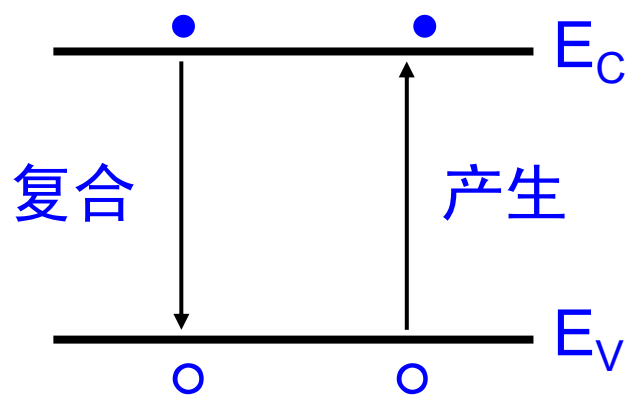
按复合过程分 { 直接复合
间接复合

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： $[\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}]$

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： $[\text{cm}^3\text{s}^{-1}]$

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

7.3 复合理论₃

7.3.2 直接复合

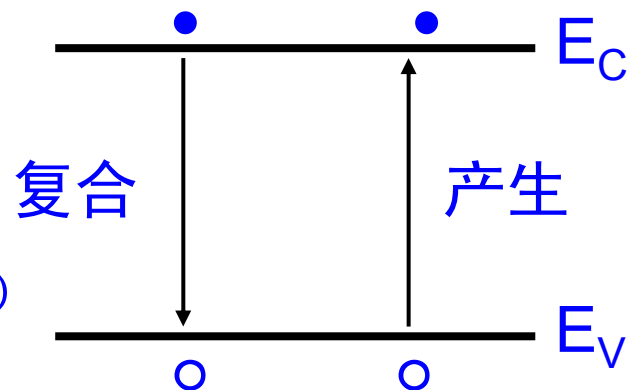
热平衡时 $G_0 = R_0 = rn_0p_0 = rn_i^2$

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

净复合率 $U_d = R - G = r(np - n_i^2)$

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

$$= r(n_0 + p_0)\Delta p + r\Delta p^2 \quad \text{—— 取决于多子}$$



7.3 复合理论₄

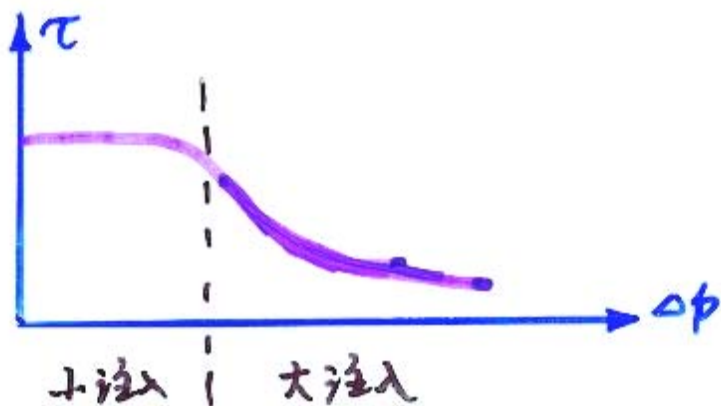
7.3.2 直接复合

— 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 $(n_0 + p_0) \gg \Delta p$

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

大注入 $(n_0 + p_0) \ll \Delta p$

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

影响 τ 的因素

1° 多子浓度 n_0 (p_0)

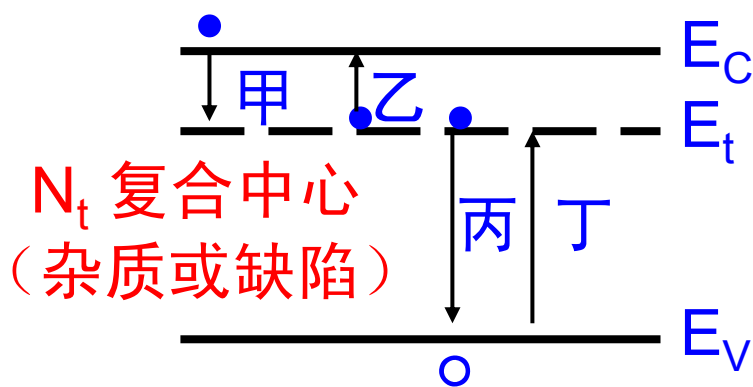
2° r

3° Δp

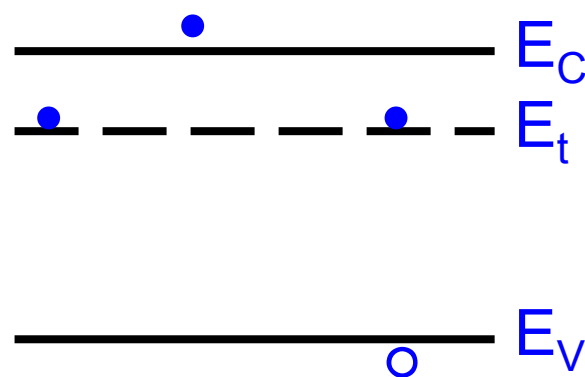
7.3 复合理论₅

7.3.3 间接复合

—间接复合的四个基本过程



跃迁前



跃迁后

甲：电子俘获率 = $r_n n (N_t - n_t)$
 \uparrow 电子俘获系数 量纲：[cm³s⁻¹]

乙：电子发射率 = $s_- n_t$
 \uparrow 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 = $s_+ (N_t - n_t)$

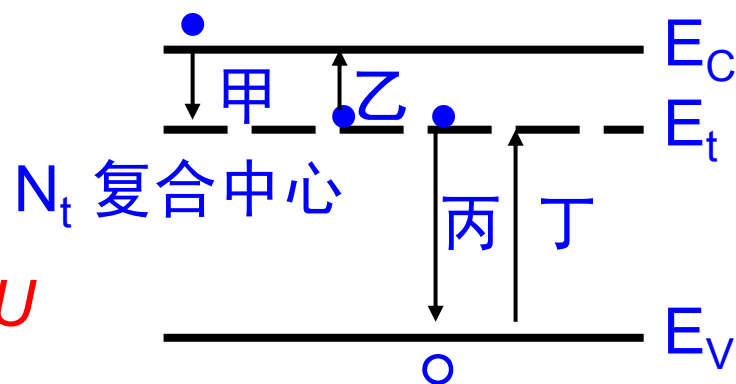
7.3 复合理论₆

7.3.3 间接复合

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

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

7.3 复合理论₇

7.3.3 间接复合

— 复合率

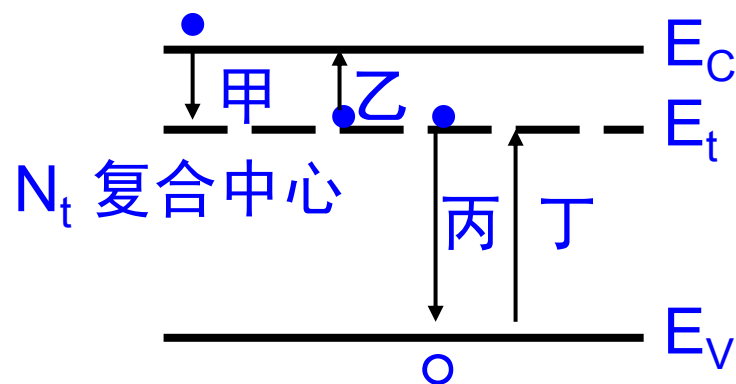
稳态时 甲 + 丁 = 乙 + 丙

$$S_- = r_n n_1 \quad S_+ = r_p p_1 \quad \text{常数}$$

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

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

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



7.3 复合理论₈

7.3.3 间接复合

—非平衡载流子寿命 τ

净复合率 $U =$

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

$$U = \frac{N_t r_n r_p (n_0 \Delta p + p_0 \Delta n + \Delta n \cdot \Delta p)}{r_n (n_0 + \Delta n + n_1) + r_p (p_0 + \Delta p + p_1)} \xrightarrow[\text{小注入 } r_n \sim r_p]{(n_0 + p_0) \gg \Delta p, \Delta n} \boxed{= \frac{N_t r_n r_p (n_0 \Delta p + p_0 \Delta n)}{r_n (n_0 + n_1) + r_p (p_0 + p_1)}}$$

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

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

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

7.3 复合理论⁹

7.3.3 间接复合

— 非平衡载流子寿命 τ

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

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

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

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

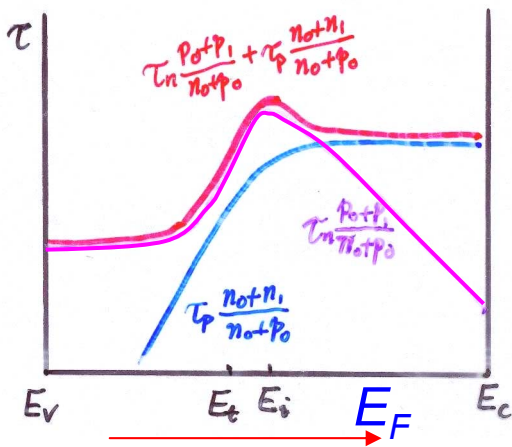
$$\tau_{\text{多子}} = \frac{\Delta n}{U} = \frac{\Delta n}{\Delta p} \frac{\Delta p}{U} = \frac{\Delta n}{\Delta p} \tau$$

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	—————	—————	—————

$\max(n_0, p_0, n_1, p_1)$	n_0	p_1	p_0
τ	$\tau = \tau_p = \frac{1}{N_t r_p}$	$\tau = \frac{p_1}{N_t r_n} \frac{1}{n_0}$	$\tau = \tau_n = \frac{1}{N_t r_n}$
$\Delta n = \Delta p$	$\tau = \tau_p \frac{n_0 + n_1}{n_0 + p_0} + \tau_n \frac{p_0 + p_1}{n_0 + p_0}$	$\tau_p = \frac{1}{N_t r_p}$	$\tau_n = \frac{1}{N_t r_n}$