第六章 半导体中载流子的输运

6.1 载流子的漂移运动

6.2 载流子的散射

6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

6.4 强电场下的输运

6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系1

6.3.1 迁移率与杂质浓度和温度的关系

几种散射机构同时存在时， $P = P_I + P_{II} + P_{III} + \ldots\ldots$

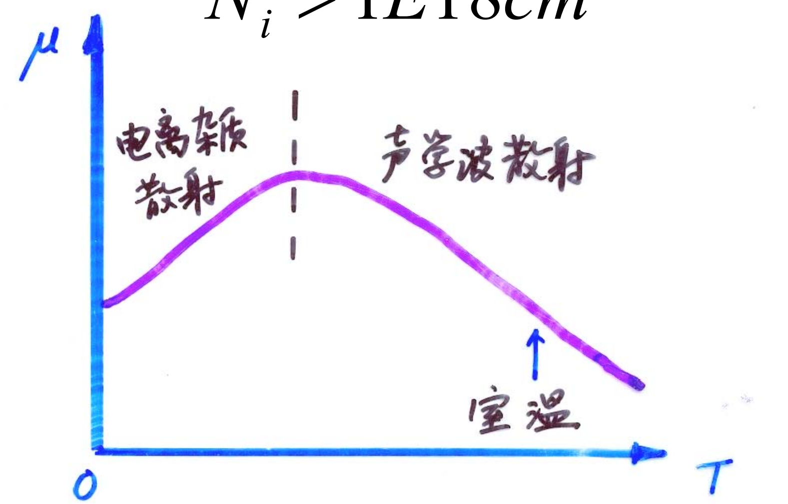
而 $\frac{1}{\tau} = P = \frac{1}{\tau_I} + \frac{1}{\tau_{II}} + \frac{1}{\tau_{III}} + \ldots\ldots \Rightarrow \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_{II}} + \frac{1}{\mu_{III}} + \ldots\ldots$

掺杂Si, Ge：

$$\begin{cases} \text{电离杂质散射} & \mu_i = \frac{q}{m^*}\frac{T^{3/2}}{BN_i} \\ \text{声学波散射} & \mu_s = \frac{q}{m^*}\frac{1}{AT^{3/2}} \end{cases}$$

$$\boxed{\mu = \frac{q}{m^*}\frac{1}{AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}}}$$

$N_i > 1E18cm^{-3}$



6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系2

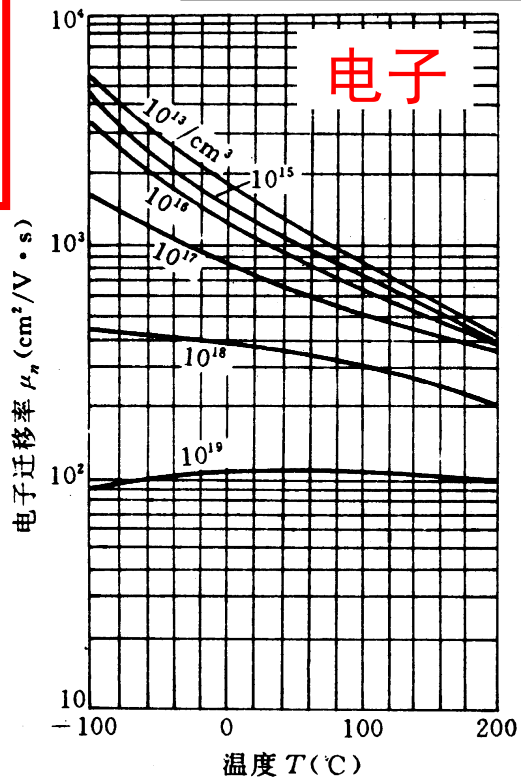
6.3.1 迁移率与杂质浓度和温度的关系

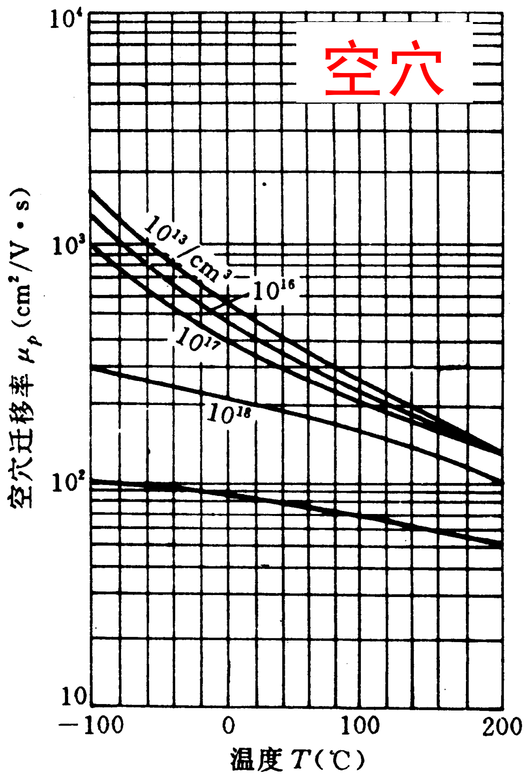
室温（300 K）下，高纯 Si、Ge、GaAs 的迁移率

	μ_n (cm^2/V·s)	μ_p (cm^2/V·s)
Si	1350	500
Ge	3900	1900
GaAs	8000	3000

$$\boxed{\mu = \frac{q}{m^*}\frac{1}{AT^{3/2}+\dfrac{BN_i}{T^{3/2}}}}$$

Si 迁移率随温度的变化关系





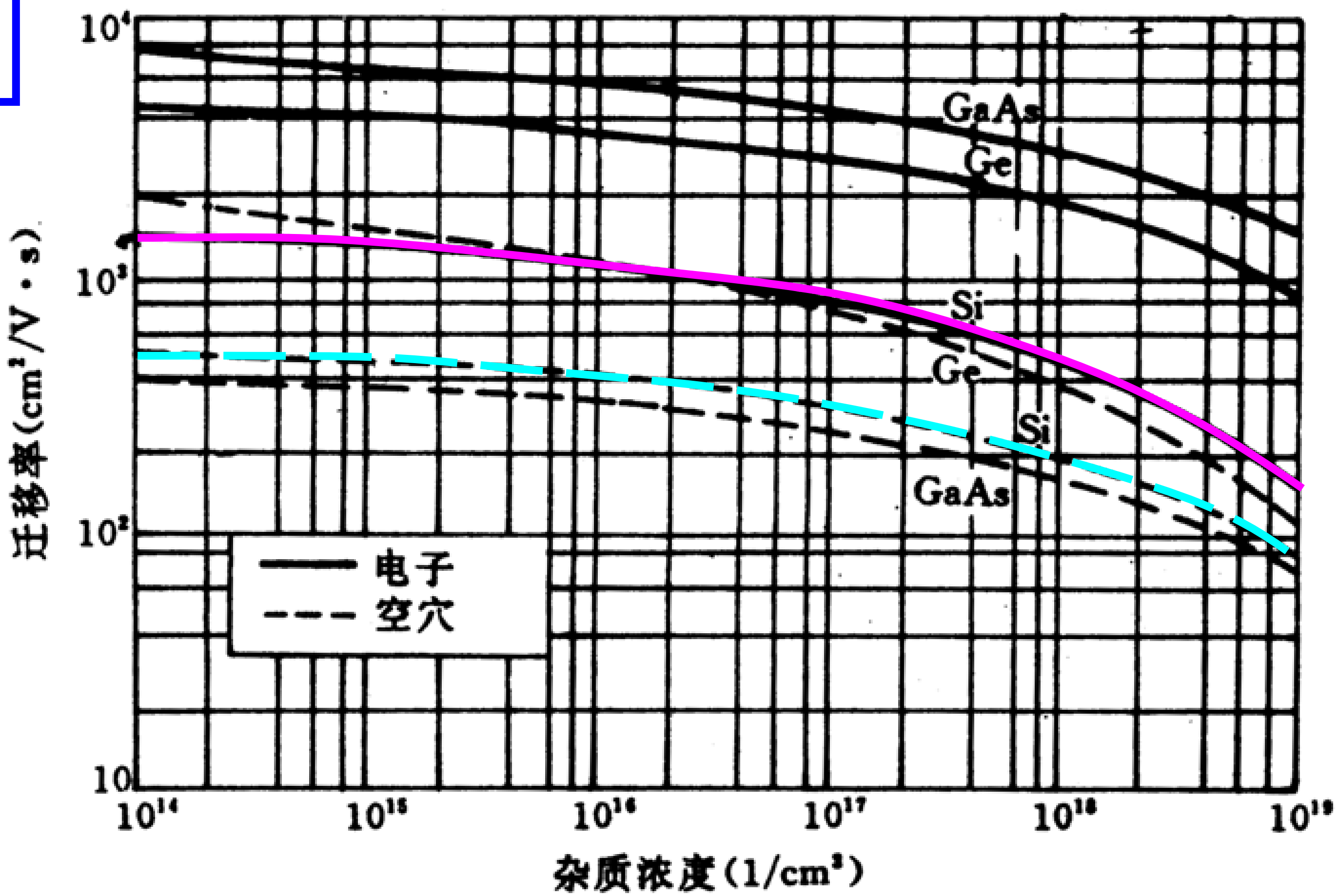
by云墨一点

6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系3

6.3.1 迁移率与杂质浓度和温度的关系

$$\mu = \frac{q}{m^*}\frac{1}{AT^{3/2}+\frac{BN_i}{T^{3/2}}}$$

迁移率随杂质浓度的变化关系（实线：电子，虚线：空穴）

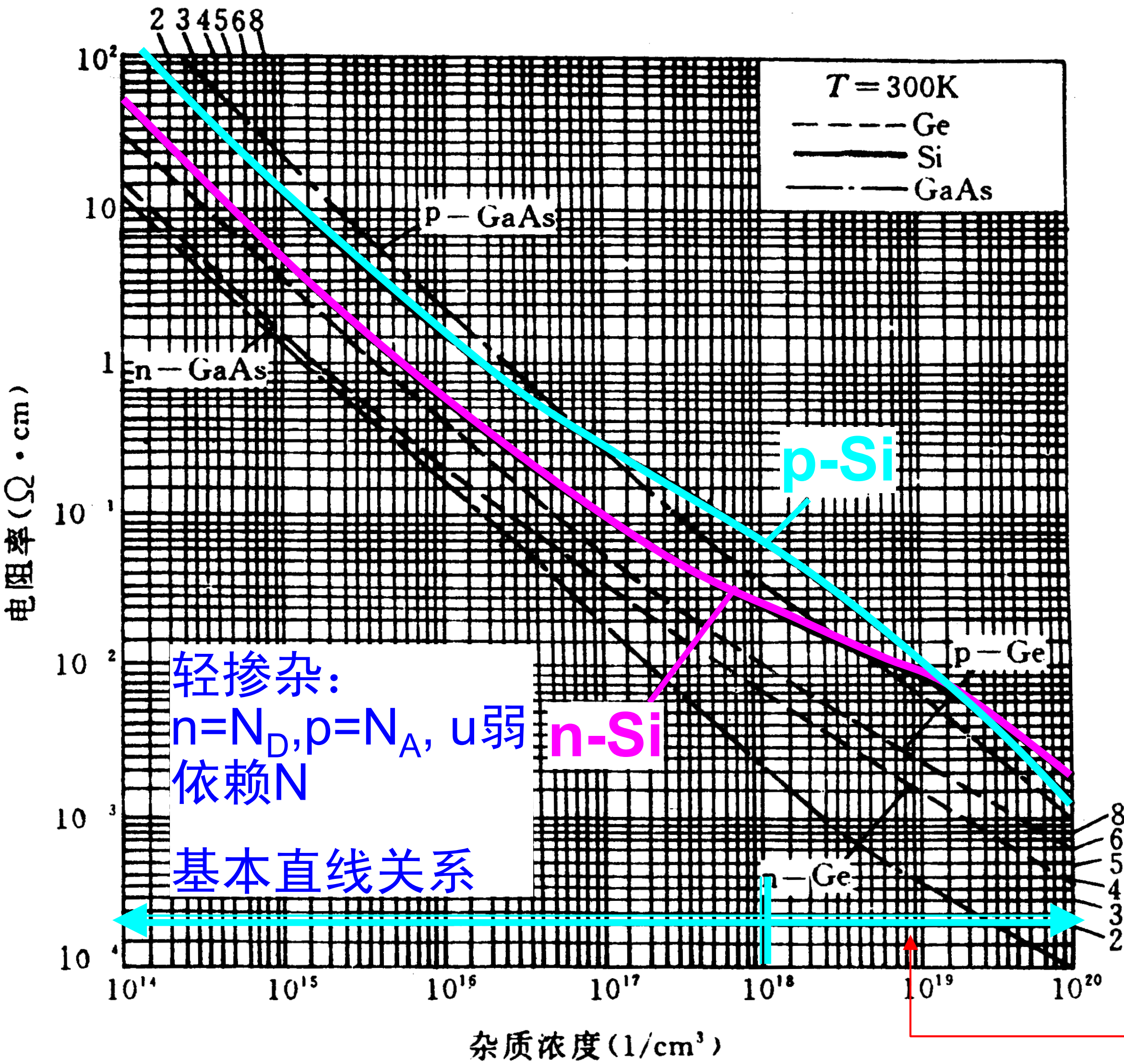


补偿半导体

$$N_i = N_A + N_D$$

6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系4

6.3.2 电阻率与杂质浓度的关系



$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p}$$

n 型 $\rho = \dfrac{1}{nq\mu_n}$

p 型 $\rho = \dfrac{1}{pq\mu_p}$

本征 $\rho_i = \dfrac{1}{qn_i(\mu_n + \mu_p)}$

重掺杂：不完全电离；N增加，u减小

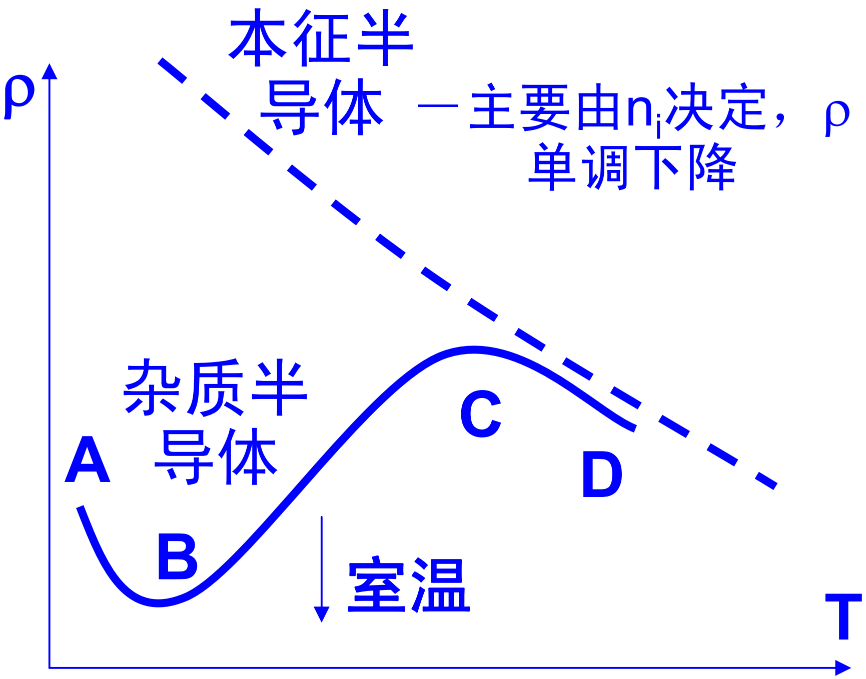
偏离直线关系

6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系5

6.3.2 电阻率与温度的关系

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p}$$

- 杂质半导体
  - 载流子来源
    - 杂质电离1
    - 本征激发2
  - 迁移率因素
    - 电离杂质散射3
    - 晶格散射4



	载流子变化		迁移率变化	
	1	2	3	4
AB	随T增加	忽略	随T增加	忽略
BC	全电离	次要	次要	随T降低
CD	次要	随T增加	次要	次要

第六章 半导体中载流子的输运

6.1 载流子的漂移运动

6.2 载流子的散射

6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

6.4 强电场下的输运

by云墨一点

6.4 强电场下的输运1

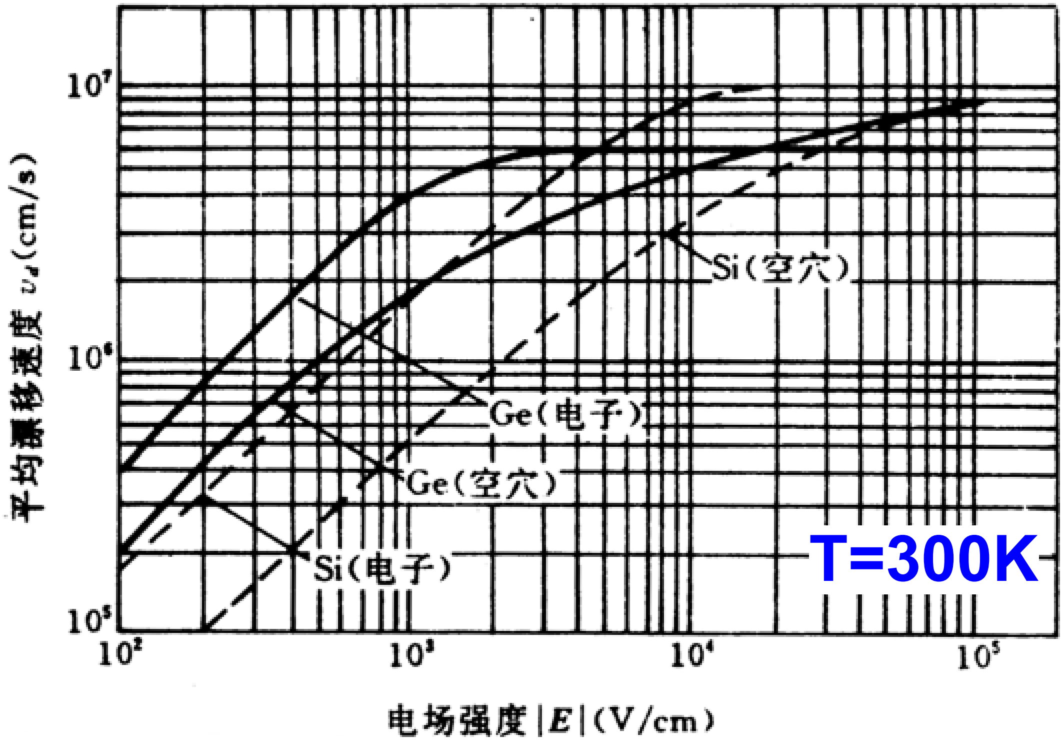
6.4.1 欧姆定律的偏离和热载流子

现象：

1—低场下 $v_d \propto E$ 线性关系

2—中等强度电场 $v_d \propto E^{1/2}$
亚线性关系

3—强场下 v_d 饱和



解释：$\boxed{\mu = \dfrac{q}{m^*}\tau}$

1º 低场下 $v_d << \bar{v}_T \sim 10^7$ cm/s， τ 决定于 $\bar{v}_T$ ，与 v_d 无关，与 E 无关.

2º 中场下（$E \geq 10^{3\sim4}$ V/cm）$v_d \sim \bar{v}_T$ τ 决定于 $\bar{v}_T$ 和 v_d，

$E\uparrow \quad \tau\downarrow \quad \mu\downarrow$

3º 强场下，发射光学声子成为动量驰豫和能量驰豫的主要机制，速度可以饱和

by云墨一点

6.4 强电场下的输运2

6.4.1 欧姆定律的偏离和热载流子

强场下载流子的平均动能明显高于热平衡时的值
——— 热载流子

1° 热载流子受电离杂质散射弱，但声子散射（特别是光学声子）可以很强；

2° 热载流子可以在等价或不等价能谷间转移.

半导体物理

主讲人：蒋玉龙

微电子学楼312室，65643768

Email: yljiang@fudan.edu.cn

http://10.14.3.121

第七章 非平衡载流子

7.1 非平衡载流子的注入与复合1

7.1.1 非平衡载流子的产生

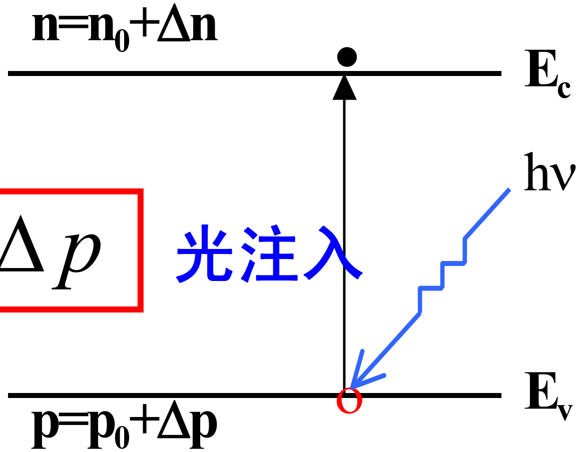
一平衡载流子浓度　　在热平衡状态下的载流子浓度 n_0, p_0

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right) \qquad p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{kT}\right) \qquad n_0 p_0 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2$$

外界作用（光、电等）破坏平衡态，产生非平衡载流子

$$n = n_0 + \Delta n \qquad p = p_0 + \Delta p \qquad \boxed{\Delta n = \Delta p}$$

光注入



小注入　n 型　$p_0 << \Delta n << n_0 \Rightarrow \begin{cases} n \approx n_0 \\ p = \Delta p \end{cases}$

　　　　p 型

大注入 Δn（或 Δp）>> (n_0 +p_0)

7.1 非平衡载流子的注入与复合2

7.1.1 非平衡载流子的产生

小注入的例子

—非平衡少数载流子更重要

小注入　n 型　$p_0 << \Delta n << n_0 \Rightarrow \begin{cases} n \approx n_0 \\ p = \Delta p \end{cases}$

例：掺杂浓度$N_D = 1.5\times10^{15}cm^{-3}$的n型半导体硅

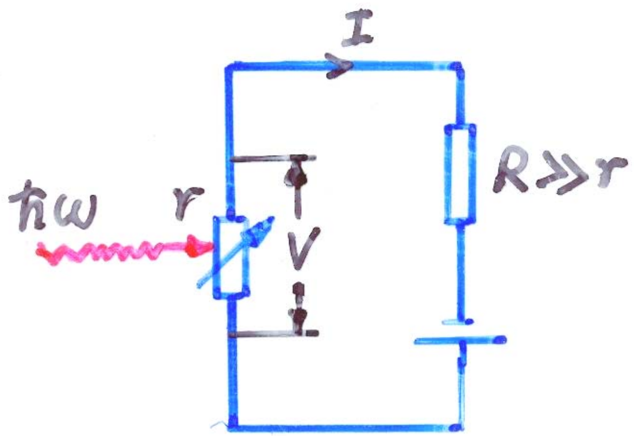
$$n_0 = 1.5\times10^{15}cm^{-3} \quad p_0 = n_i^2/n_0 = 1.5\times10^{5}cm^{-3} \quad \Delta n = \Delta p = 10^{10}cm^{-3}$$

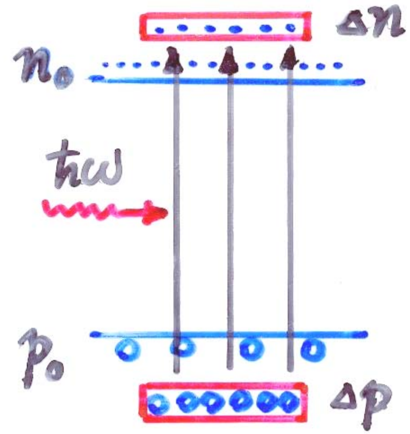
$$\boxed{n = n_0 + \Delta n \approx n_0 = 1.5\times10^{15}cm^{-3}} \quad \boxed{p = p_0 + \Delta p \approx \Delta p = 10^{10}cm^{-3}}$$

7.1 非平衡载流子的注入与复合3

7.1.2 附加光电导现象

附加光电导





$$\Delta p = \Delta n$$

$$\downarrow$$

$$\Delta\sigma = \Delta p q(\mu_n + \mu_p)$$

$$\downarrow$$

$$V = Ir = I\frac{1}{\sigma}\frac{l}{S}$$

$$\downarrow$$

$$\Delta V = I\frac{l}{S}\left(-\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0^2}\right)$$

$$\downarrow$$

$$\Delta V \propto \Delta p$$

间接检验非平衡少子的注入

7.1 非平衡载流子的注入与复合4

7.1.3 非平衡载流子的复合　$p = p_0 + \Delta p \Rightarrow p_0$

问题：外界注入撤消后，非平衡载流子怎么变化？ —— 复合

设 $t = 0$ 时　$\Delta p = (\Delta p)_0$

P —— 非平衡载流子的复合几率（单位时间内非平衡载流子被复合掉的几率）（小注入条件下，P 为常数）

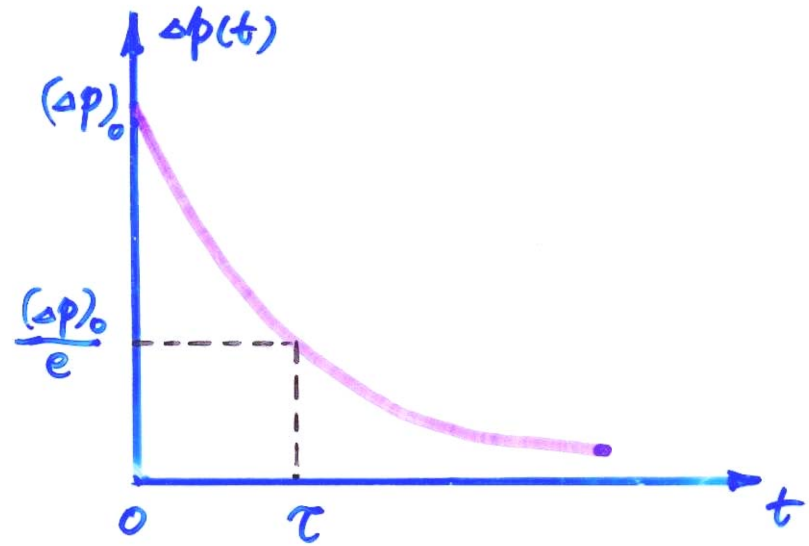
$\Delta p(t)$ —— 在 t 时刻非平衡载流子的浓度

$$\frac{d\Delta p(t)}{dt} = -P \cdot \Delta p(t)$$

$$\Delta p(t) = (\Delta p)_0 \exp(-Pt)$$

令　$\tau = \dfrac{1}{P}$

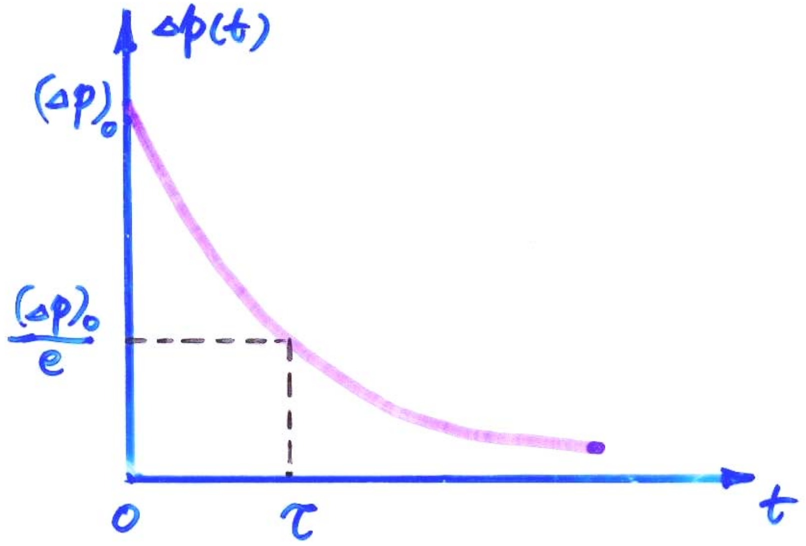
则　$\boxed{\Delta p(t) = (\Delta p)_0 \exp(-t/\tau)}$



7.1 非平衡载流子的注入与复合5

7.1.3 非平衡载流子的复合

$$\boxed{\Delta p(t) = (\Delta p)_0 \exp(-t/\tau)}$$



复合率 $$\boxed{\left|\frac{d\Delta p(t)}{dt}\right| = \frac{\Delta p(t)}{\tau}}$$

非平衡载流子的平均寿命

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty t d\Delta p(t)}{\int_0^\infty d\Delta p(t)} = \tau \qquad \tau = \frac{1}{P}$$

τ 高纯 Si ≥ 10^3 μs

高纯 Ge ≥ 10^4 μs

高纯 GaAs ≤ 10^{-8}~10^{-9} s