

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, $P = P_I + P_{II} + P_{III} + \dots$

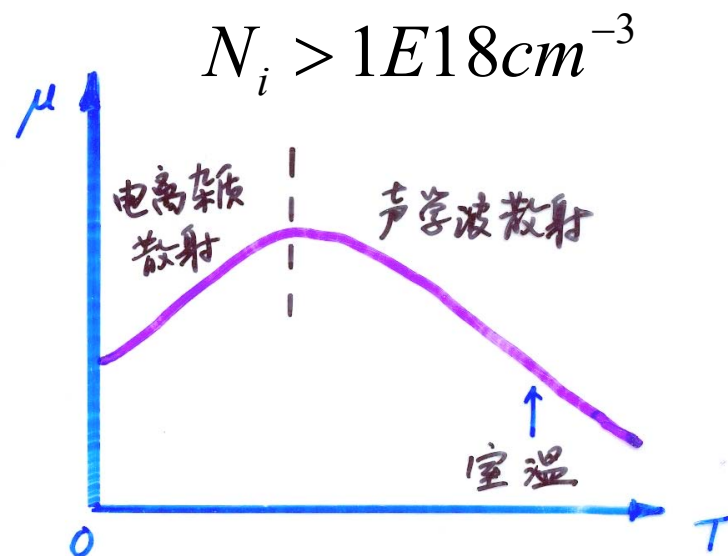
而 $\frac{1}{\tau} = P = \frac{1}{\tau_I} + \frac{1}{\tau_{II}} + \frac{1}{\tau_{III}} + \dots \Rightarrow \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_{II}} + \frac{1}{\mu_{III}} + \dots$

掺杂Si, Ge:

电离杂质散射 $\mu_i = \frac{q}{m^*} \frac{T^{3/2}}{BN_i}$

声学波散射 $\mu_s = \frac{q}{m^*} \frac{1}{AT^{3/2}}$

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



6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系₂

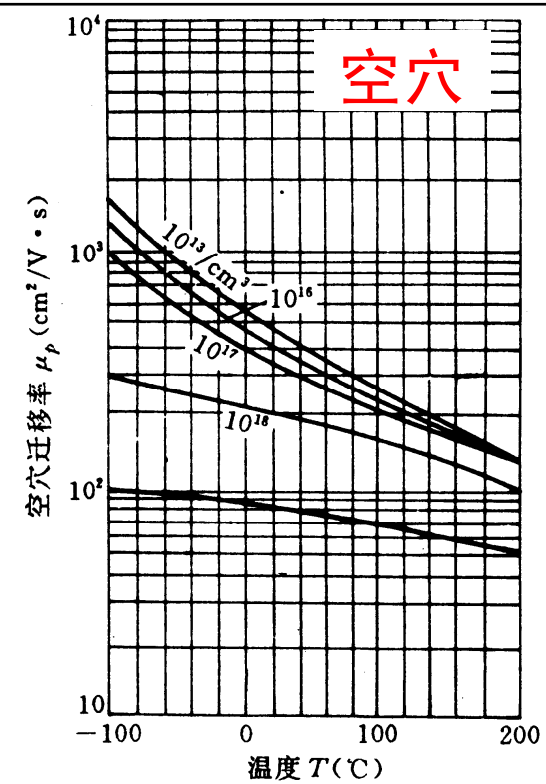
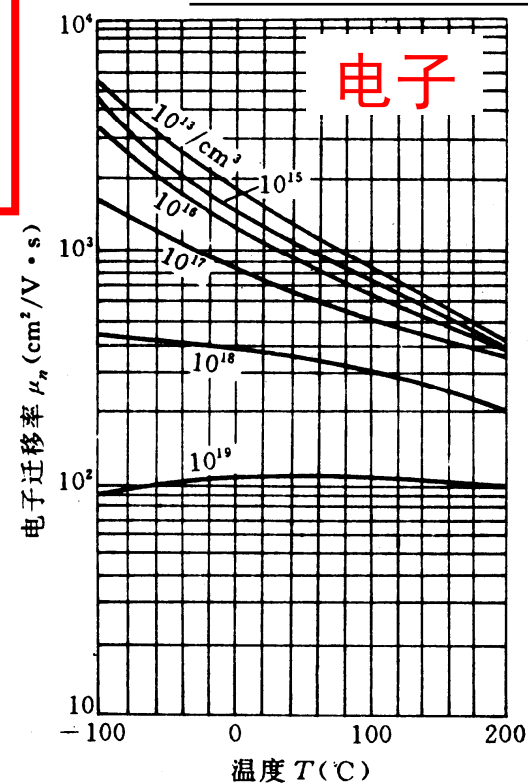
6.3.1 迁移率与杂质浓度和温度的关系

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

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

Si 迁移率随温
度的变化关系

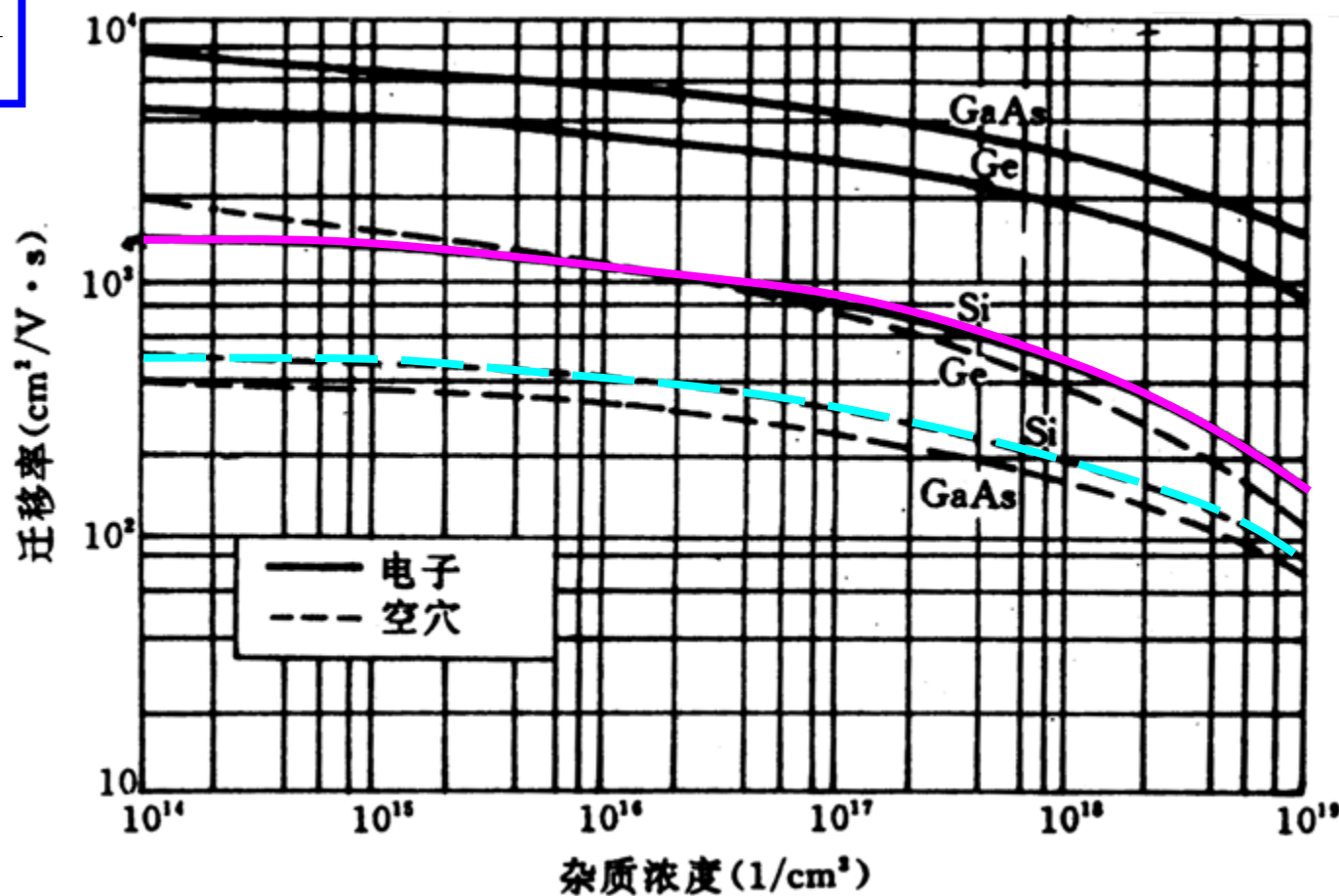


6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系³

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）

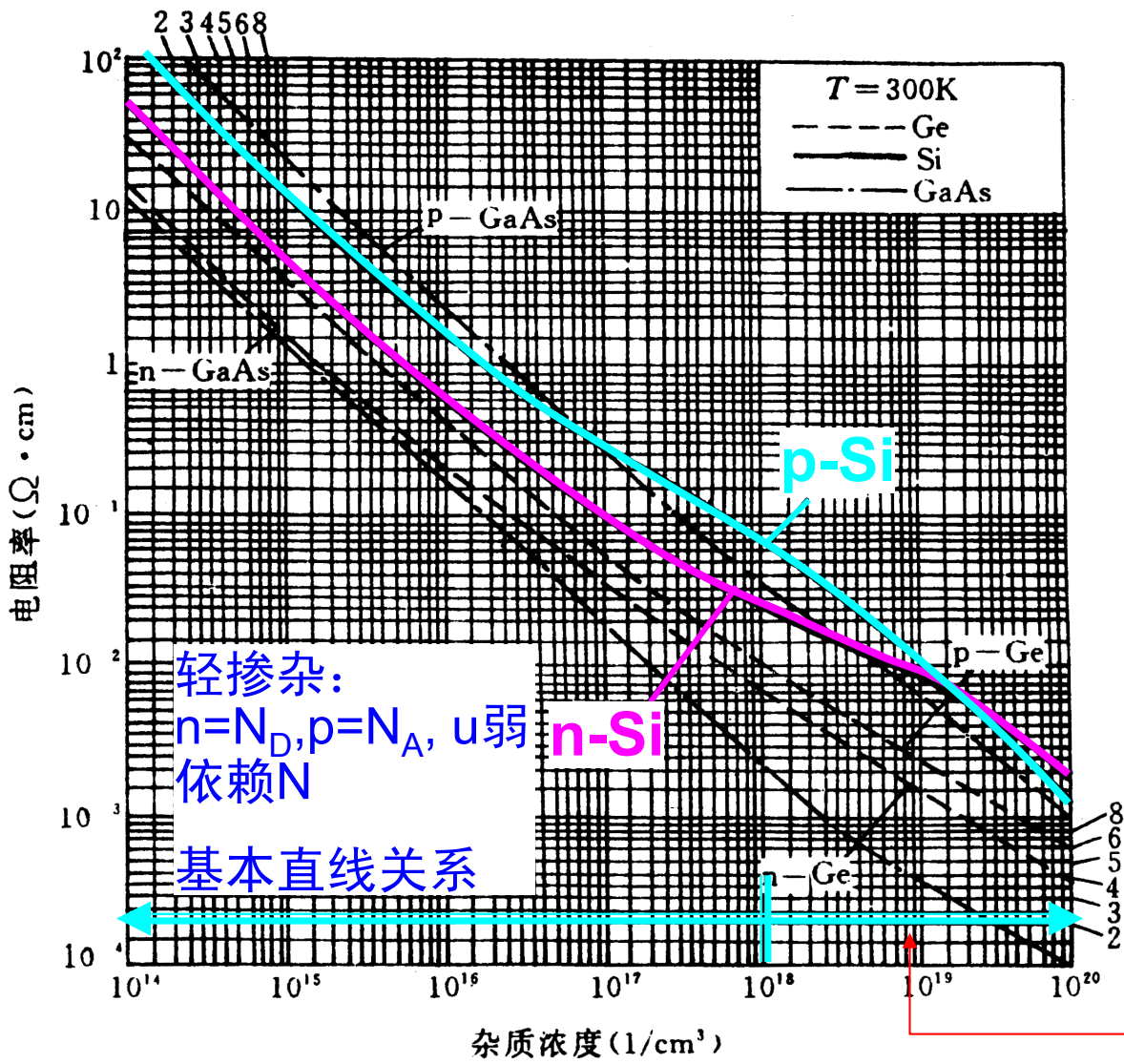


补偿半导体

$$N_i = N_A + N_D$$

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



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

$\left\{ \begin{array}{ll} \text{n 型} & \rho = \frac{1}{nq\mu_n} \\ \text{p 型} & \rho = \frac{1}{pq\mu_p} \\ \text{本征} & \rho_i = \frac{1}{qn_i(\mu_n + \mu_p)} \end{array} \right.$

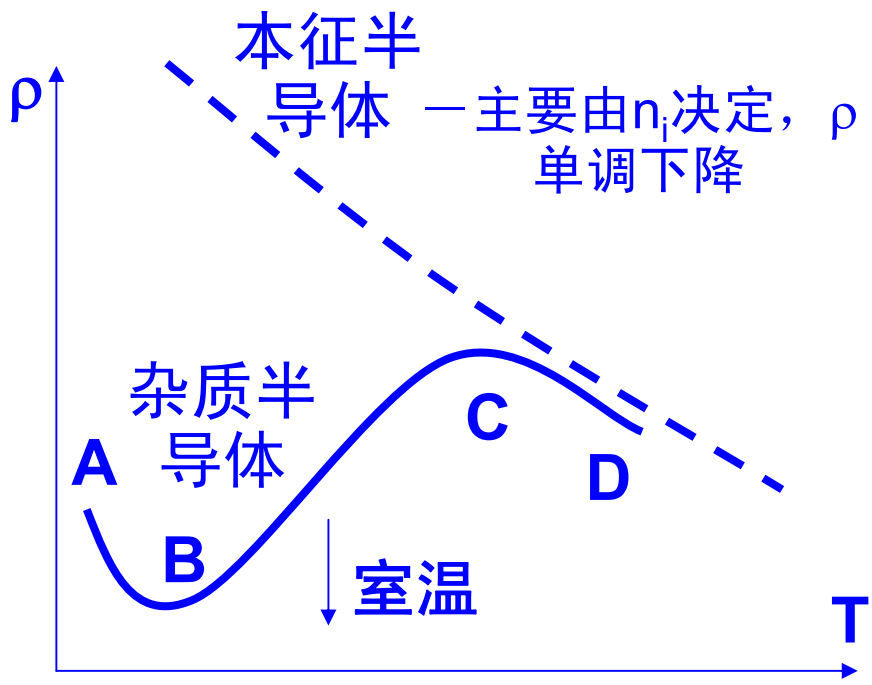
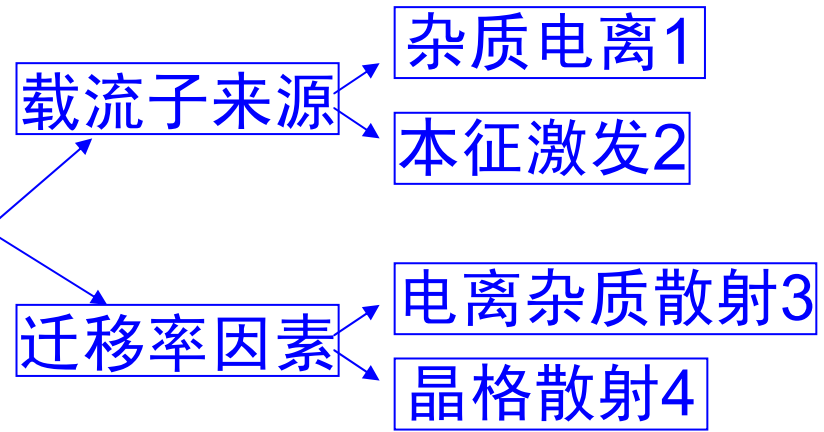
重掺杂: 不完全电离; N增加, u减小
偏离直线关系

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

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

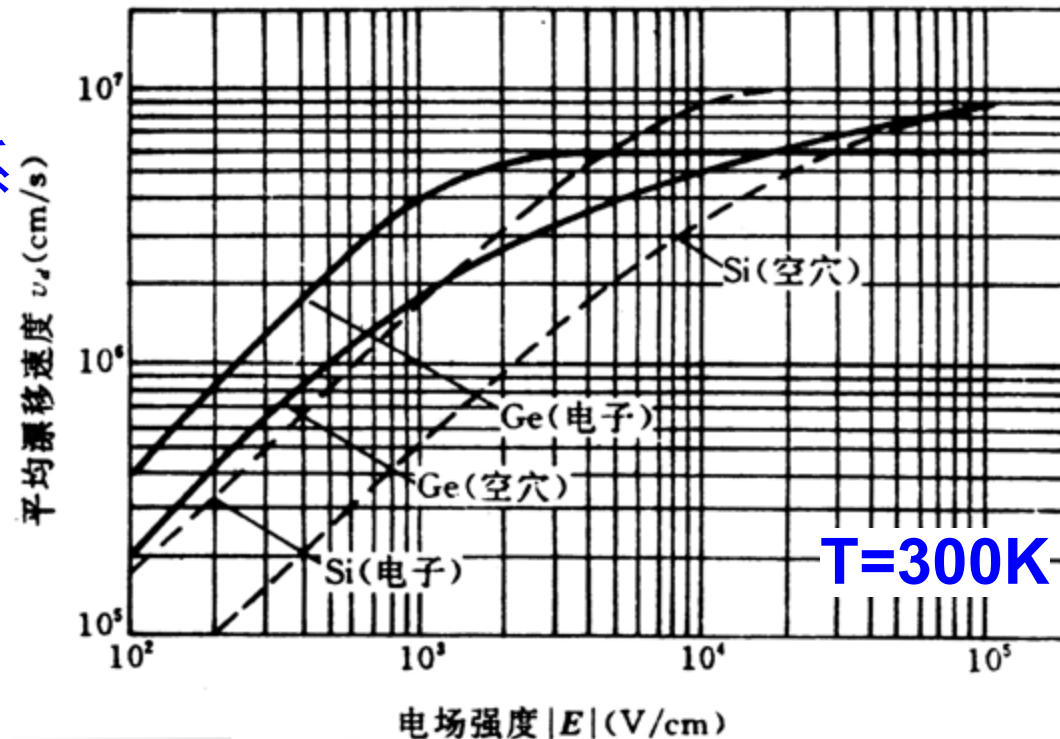
3—强场下 v_d 饱和

解释:
$$\mu = \frac{q}{m^*} \tau$$

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

2° 中场下 ($E \geq 10^3 \sim 10^4$ V/cm) $v_d \sim \bar{v}_T$ τ 决定于 \bar{v}_T 和 v_d ,
 $E \uparrow \quad \tau \downarrow \quad \mu \downarrow$

3° 强场下, 发射光学声子成为动量弛豫和能量弛豫的主要机制,
速度可以饱和



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

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

7.1 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

—平衡载流子浓度

在热平衡状态下的载流子浓度 n_0, p_0

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right)$$

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{kT}\right)$$

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

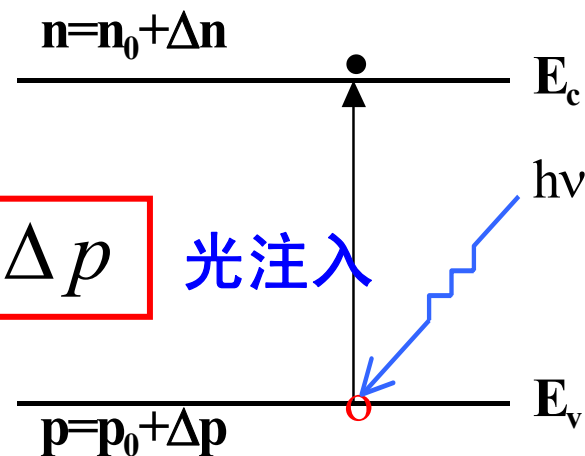
外界作用（光、电等）破坏平衡态，产生
非平衡载流子

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

$$\Delta n = \Delta p$$

光注入



小注入 n 型
 p 型

$$p_0 \ll \Delta n \ll n_0 \Rightarrow \begin{cases} n \approx n_0 \\ p = \Delta p \end{cases}$$

大注入 Δn (或 Δp) $\gg (n_0 + p_0)$

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

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

例：掺杂浓度 $N_D = 1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的n型半导体硅

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

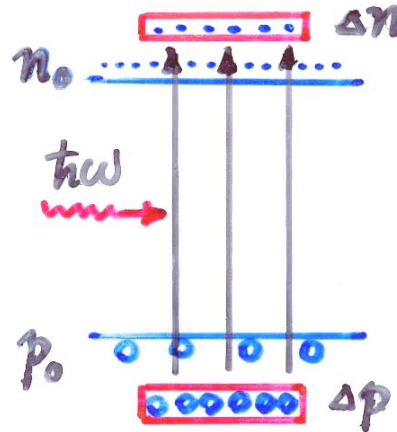
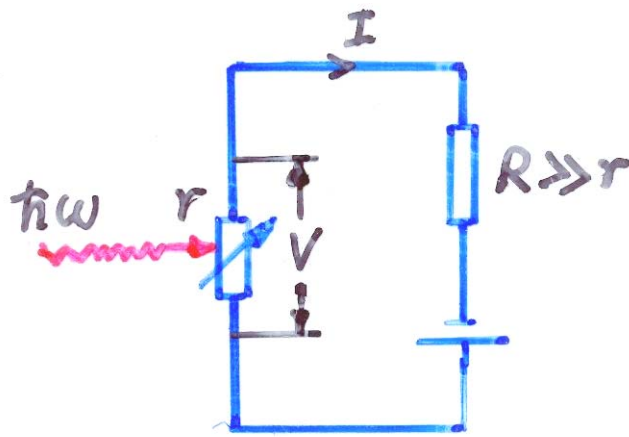
$$n = n_0 + \Delta n \approx n_0 = 1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

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

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



$$\Delta p = \Delta n$$

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

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

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

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

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）

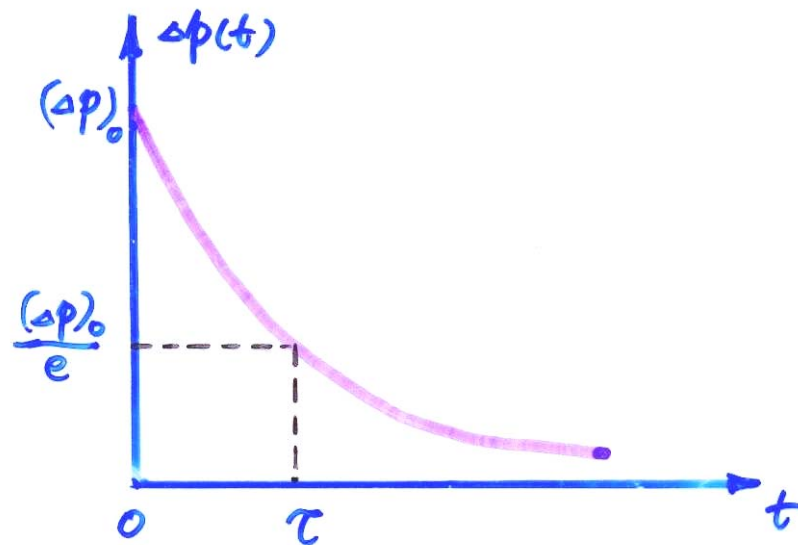
$\Delta p(t)$ ——在 t 时刻非平衡载流子的浓度

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

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

令 $\tau = \frac{1}{P}$

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

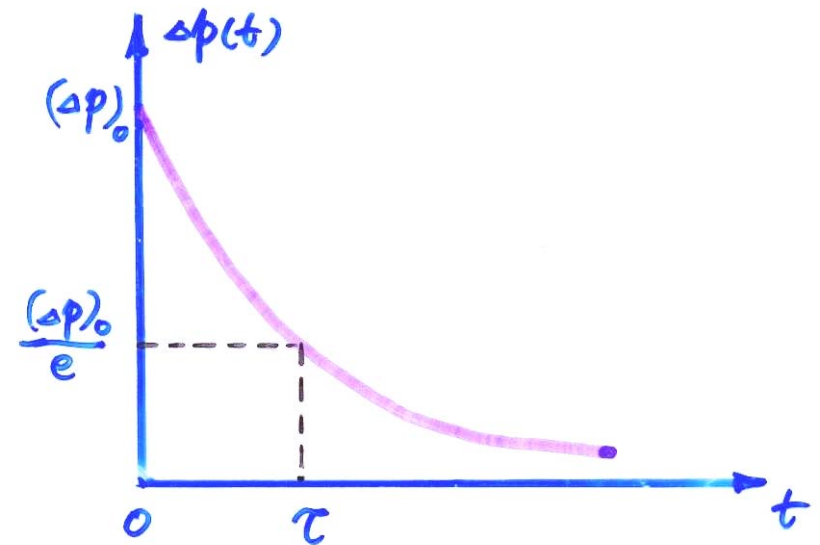


7.1 非平衡载流子的注入与复合⁵

7.1.3 非平衡载流子的复合

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

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



非平衡载流子的平均寿命

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

τ 高纯 Si $\geq 10^3 \mu\text{s}$
高纯 Ge $\geq 10^4 \mu\text{s}$
高纯 GaAs $\leq 10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ s}$