

半导体物理学 Chapter 5

5 非平衡载流子

5.1 非平衡载流子的注入与复合

1. 非简并半导体处于热平衡状态的判据式是什么？
2. 什么是非平衡载流子？它是如何产生的？
3. 什么是非平衡载流子的复合？
4. 请从载流子产生与复合的角度解释热平衡态与非平衡态。

5.2 非平衡载流子的寿命

1. 什么是非平衡载流子的寿命？它与非平衡载流子的复合概率 P 的关系是什么？
2. 什么是非平衡载流子的（净）复合率 U ？
3. 非平衡载流子浓度随时间按指数衰减（n型半导体光注入，光照撤去）： $\Delta p(t) = (\Delta p)_0(t) e^{-\frac{t}{\tau}}$.

5.3 准费米能级

1. 从费米能级角度如何判断半导体的热平衡状态？
2. 什么是准费米能级？为什么可以引入准费米能级？ E_{Fn} 、 E_{Fp} 分别是什么？
3. E_{Fn} 、 E_{Fp} 偏离 E_F 的程度分别如何？

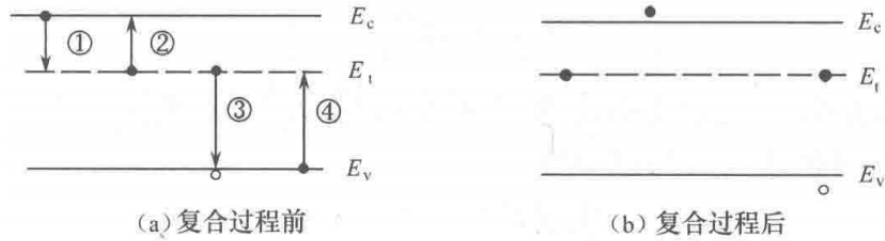
5.4 复合理论

5.4.1 直接复合

1. 什么是直接复合？
2. 请给出产生率 G 、复合率 R 与净复合率 U_d 的关系。
3. 寿命 $\tau = \frac{\Delta p}{U_d} = \frac{1}{r[(n_0 + p_0) + \Delta p]}$.
4. 直接复合适用于直接辐射复合与声子跃迁过程。

5.4.2 间接复合

1. 复合中心是什么？相关物理量 E_t 、 N_t 、 n_t 与 $(N_t - n_t)$ 分别是什么？
2. 如图，请简述间接复合的4个微观过程①②③④。



图：间接复合的4个过程

3. 利用上述①②③④表示稳定条件，并分别解释其含义。
4. 非平衡载流子复合率与寿命

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p - p_1)} \\
 &= \frac{N_t r_n r_p \Delta p (n_0 + p_0 + \Delta p)}{r_n (n_0 + n_1 + \Delta p) + r_p (p_0 + p_1 + \Delta p)} \\
 \tau &= \frac{\Delta p}{U} = \frac{r_n (n_0 + n_1 + \Delta p) + r_p (p_0 + p_1 + \Delta p)}{N_t r_n r_p (n_0 + p_0 + \Delta p)}
 \end{aligned}$$

5. 对于n型半导体，请解释“强n型区”与“高阻区”的含义。

5.4.3 表面复合

表面复合发生在半导体表面。表面处的杂质和表面特有的缺陷在禁带形成复合中心能级，因此在复合机制上，表面复合是一种间接复合。

5.4.4 俄歇复合

载流子发生电子一空穴复合时，把多余的能量或动量通过碰撞转移给另一个载流子，使该载流子跃迁的复合过程叫俄歇复合。俄歇复合涉及三个或多个粒子，是一种非辐射复合，是“碰撞电离”的逆过程。

5.5 陷阱效应

1. 陷阱效应是在有非平衡载流子的情况下发生的一种效应，请简述这一效应。
2. 什么是陷阱与陷阱中心？

5.6 载流子的扩散运动

1. 发生扩散运动的条件是什么？
2. 浓度梯度 $\nabla(\Delta p) = \frac{d}{dx}\Delta p(x)$. (一维情况)
3. 扩散定律中扩散系数 D 反映了什么？负号的含义是什么？

$$S_p = -D_p \frac{d}{dx}\Delta p(x) \quad (S_p = -D_p \cdot \nabla(\Delta p))$$

4. 稳态扩散方程的含义是什么？

$$-\nabla \cdot S_p = D_p \nabla^2(\Delta p) = \frac{\Delta p(x)}{\tau} \quad \left(D_p \frac{d^2}{dx^2} \Delta p(x) = \frac{\Delta p(x)}{\tau} \right)$$

5. 扩散长度 $L = \sqrt{D\tau}$ 的含义是什么？

5.7 载流子的漂移扩散、爱因斯坦关系式

1. 爱因斯坦关系式描述了哪两个物理量之间的关系？

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_0 T}{q}$$

2. 电流密度方程式

$$J = J_n + J_p = q\mu_p \left(p\mathcal{E} - \frac{k_0 T}{q} \frac{dp}{dx} \right) + q\mu_n \left(n\mathcal{E} + \frac{k_0 T}{q} \frac{dn}{dx} \right)$$

5.8 连续性方程式

1. 连续性方程式（各项）物理含义是什么？

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= \left(-\frac{1}{q} \frac{\partial(J_p)_{\text{扩}}}{\partial x} \right) + \left(-\frac{1}{q} \frac{\partial(J_p)_{\text{漂}}}{\partial x} \right) + \left(-\frac{\Delta p}{\tau_p} \right) + g_p \\ &= D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \mathcal{E} \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + g_p \\ &= -\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} + g_p \end{aligned}$$

2. 牵引长度 $L(\mathcal{E}) = \mathcal{E}\mu\tau$ 的含义是什么？它与扩散长度的关系是什么？
3. 如何利用连续性方程式理解稳态扩散方程？

半导体物理学 Chapter 6

6 pn 结

6.1 pn 结及其能带图

6.1.1 pn 结的形成和杂质分布

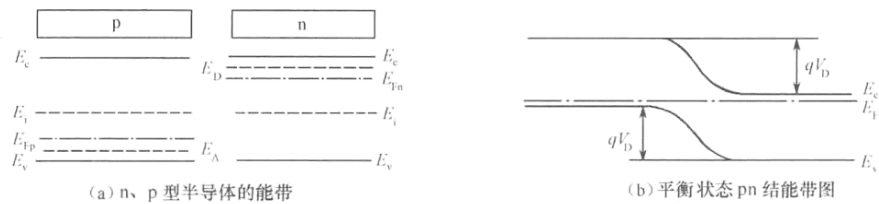
突变结与线性缓变结。

6.1.2 空间电荷区

1. 什么是空间电荷与空间电荷区？
2. 什么是内建电场？它的方向是怎样的？
3. 什么是平衡 pn 结？平衡 pn 结中载流子的两种运动是怎样的？对应的电流满足什么关系？

6.1.3 pn 结能带图

1. 形成 pn 结时候，能带为什么会移动？平衡 pn 结的能带图是怎样的？



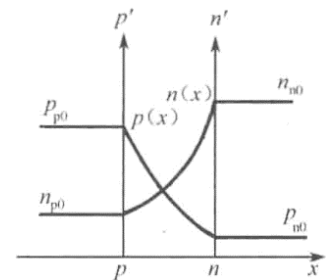
2. 平衡 pn 结费米能级处处相等恰好标志了每种载流子的扩散电流和漂移电流互相抵消。
3. pn 结的势垒指什么？什么是势垒区？

6.1.4 pn 结接触电势差

1. 势垒高度 $qV_D = E_{Fn} - E_{Fp}$ 。
2. 电势差 $V_D = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$ ，与掺杂浓度、温度、材料的禁带宽度有关。

6.1.5 pn 结的载流子分布

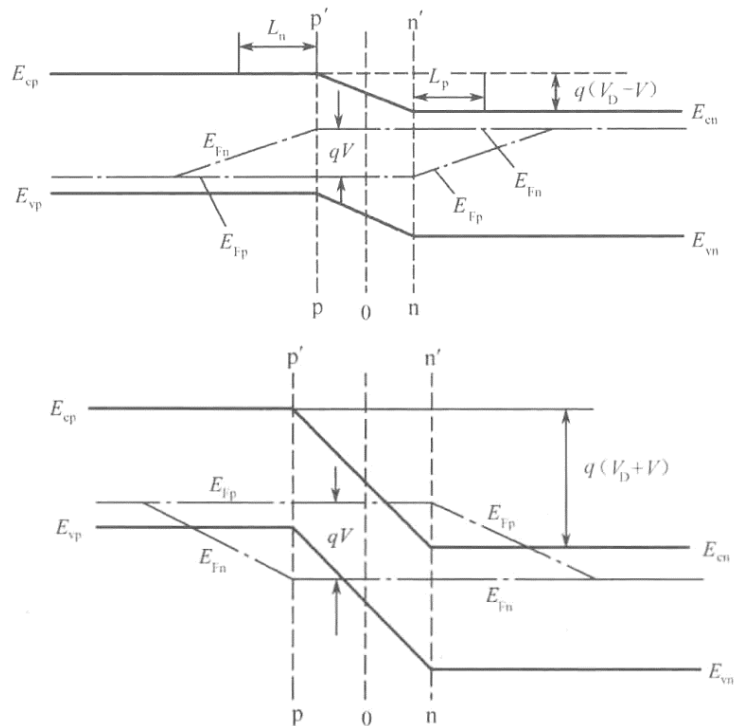
1. 电子浓度 $n(x) = n_{n0} \exp\left[\frac{qV(x) - qV_D}{k_0 T}\right]$ ， $n_{p0} = n_{n0} \exp\left[-\frac{qV_D}{k_0 T}\right]$
2. 空穴浓度 $p(x) = p_{p0} \exp\left[-\frac{qV(x)}{k_0 T}\right]$ ， $n_{n0} = n_{p0} \exp\left[-\frac{qV_D}{k_0 T}\right]$
3. 什么是耗尽层？



6.2 pn 结电流-电压特性

6.2.1 非平衡状态下的 pn 结

1. 外加电压 V ，势垒高度如何变化？
2. 正向偏压时，电子扩散流与空穴扩散流是如何形成的？方向是怎样的？反向偏压呢？
3. 能带示意图为什么会出现准费米能级？



6.2.2 理想 pn 结模型及其电流—电压方程

1. 理想 pn 结模型需要满足哪些假设条件？
2. pn 结具有单向导电性或整流性，请简述 pn 结的整流效应。

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right] \quad (\text{肖克利方程})$$

6.3 pn 结电容

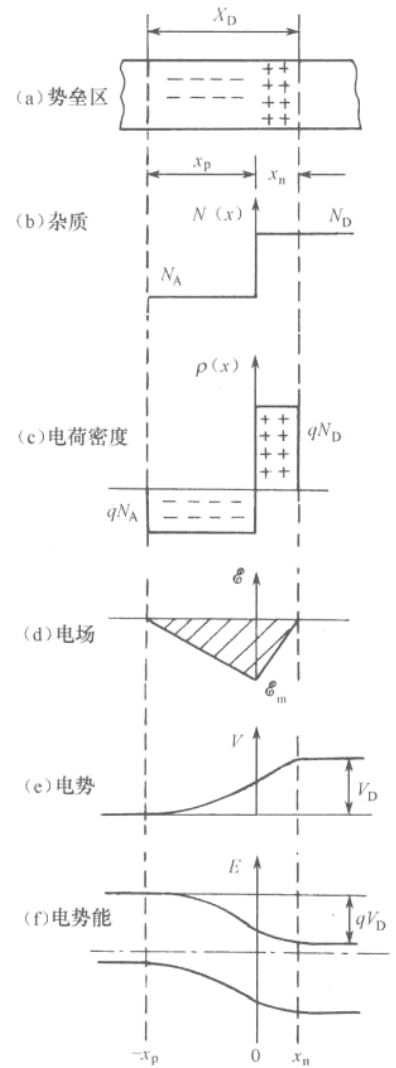
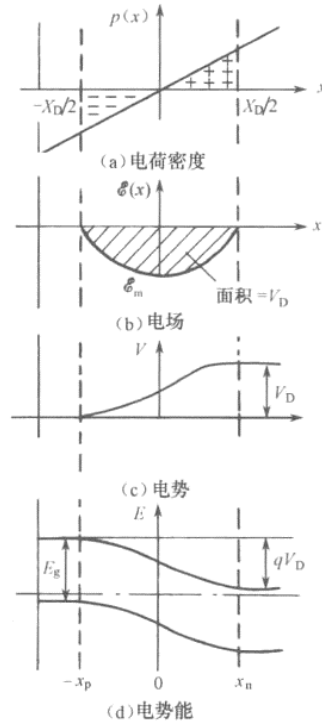
6.3.1 pn 结电容的来源

1. pn 结电容破坏了其整流特性，包括势垒电容与扩散电容。
2. 引入微分电容的概念表示 pn 结电容 $C = \frac{dQ}{dV}$ 。

6.3.2 突变结的势垒电容

1. 势垒区中单位面积上所累积的空间电荷的数值 $Q = qN_A x_p = qN_D x_n$ 。

- 泊松方程 $\frac{d^2}{dx^2} V(x) = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$.
- 边界条件：势垒区外电中性，无电场；以 p 型中性区为零电势。
- 势垒区宽度 $X_D = x_n + x_p = \sqrt{V_D \left(\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}$
- 有外加电压 V $\sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 (N_A + N_D) (V_D - V)}{q N_A N_D}}$.

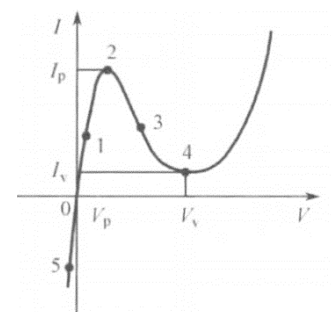


6.4 pn 结击穿

- 什么是 pn 结击穿？有哪几种？
- pn 结击穿的基本原因是载流子数目的增大。
- 请简述雪崩击穿与隧道击穿（齐纳击穿）的机理。
- 低浓度掺杂利于雪崩击穿，高浓度掺杂利于隧道击穿。
- 当击穿电压 $V_{BR} < 4E_g/q$ 时，隧道击穿； $V_{BR} > 6E_g/q$ 时，雪崩击穿； V_{BR} 在两者之间，两种机构均起作用。

6.5 pn 结隧道效应

- 重掺杂的 pn 结是隧道结，利用多子隧道效应工作，其电流-电压特性如图。请简述 pn 结的隧道效应，并用能带图加以说明。
- 隧道二极管有三个显著的优点。



半导体物理学 Chapter 7

7 金属和半导体接触

7.1 金属半导体接触及其能级图

7.1.1 金属和半导体的功函数

1. 金属功函数 W_m 的大小标志着电子在金属中束缚的强弱。它是如何定义的？ E_0 是什么？

$$W_m = E_0 - (E_F)_m$$

2. 半导体的功函数是如何定义的？电子亲和能 χ 是什么？

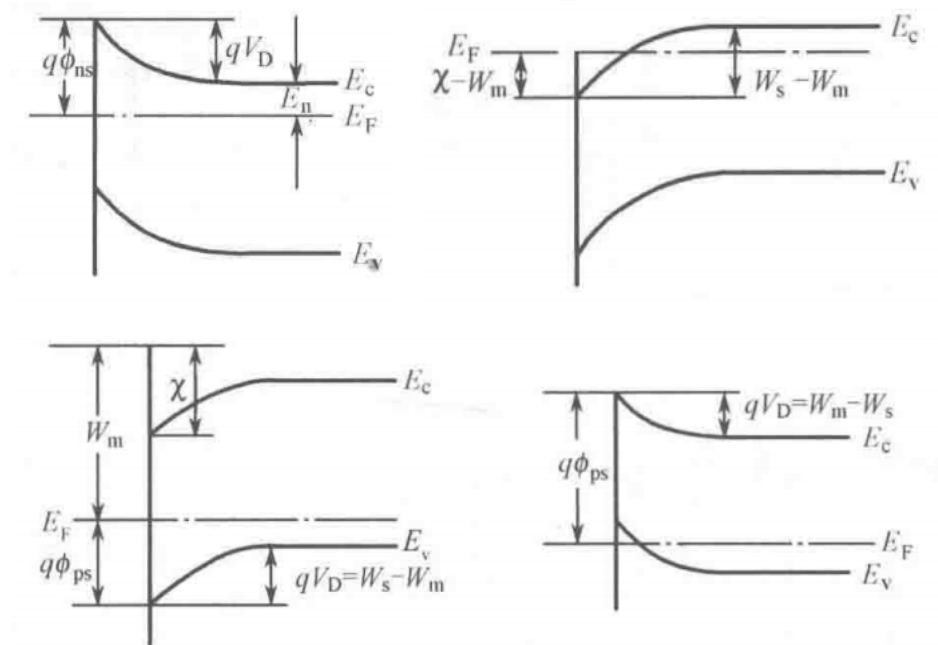
$$W_s = E_0 - (E_F)_s$$

7.1.2 接触电势差

1. 接触电势差 V_{ms} 、表面势 V_s 分别是什么？

$$\frac{W_s - W_m}{q} = V_{ms} + V_s$$

2. 忽略金属和半导体接触的间隙 D ，半导体和金属两侧的势垒高度分别是什么？
3. 什么是阻挡层与反阻挡层？形成n型、p型阻挡层与反阻挡层的条件分别是什么？



7.2 金属半导体接触整流理论

请简述阻挡层的整流作用。

7.2.1 扩散理论

1. 扩散理论适用于厚阻挡层，什么是厚阻挡层？
2. 势垒区可近似为耗尽层。以 n 型阻挡层为例，利用泊松方程可以求解得到势垒厚度

$$x_d = \sqrt{-\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{qN_D}[(V_s)_0 + V]}$$

3. 什么是肖特基势垒？
4. 电流密度

$$J = J_{sD} \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right]$$

7.2.2 热电子发射理论

1. 什么是热电子发射理论？
2. 式 $J = J_{sT} \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right]$ 中 J_{sT} 是强烈依赖于温度的函数。

7.2.4 肖特基势垒二极管

1. 利用金属—半导体整流接触特性制成的二极管称为肖特基势垒二极管，和 pn 结二极管都具有单向导电性。
2. 肖特基二极管与 pn 结二极管相比，特性上有哪些区别（或者说优点）？

7.3 少数载流子的注入和欧姆接触

7.3.1 少数载流子的注入

在金半接触的整流接触上加正向电压时，势垒降低，电子向表面流动，而空穴流入半导体形成自外向内的空穴扩散流，因此，部分正向电流是由少数载流子空穴荷载的。

7.3.2 欧姆接触

1. 什么是欧姆接触？实际一般如何制作欧姆接触？
2. 为什么不能用选择金属功函数来形成反阻挡层来获得欧姆接触？

半导体物理学 Chapter 8

8 半导体表面与 MIS 结构

8.1 表面态

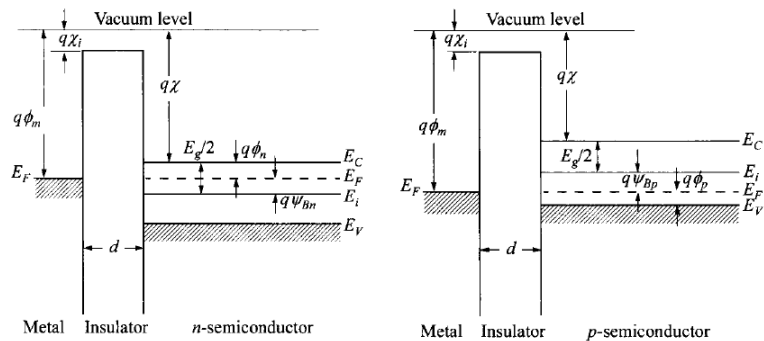
1. 什么是理想表面？
2. 什么是表面态？

8.2 表面电场效应

1. 如何在半导体表面层内产生电场？
2. 理想的 MIS 结构需要满足哪些条件？

8.2.1 空间电荷层及表面势

1. 这里的空间电荷层及表面势 V_s 是如何定义的？
2. 什么是平带状态？



3. 随着金属与半导体间所加电压 V_G 变化，表面势与空间电荷区的电荷分布可归纳为哪三种情况？

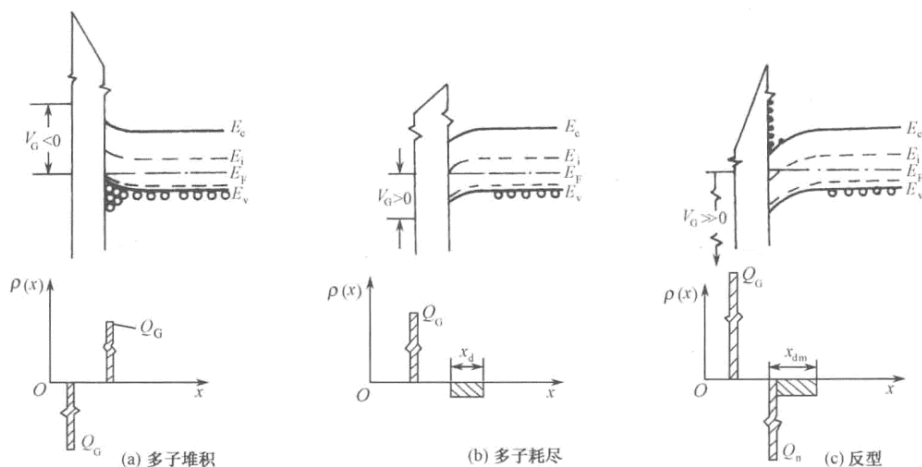


图 8-5 由 p 型半导体构成的理想 MIS 结构在各种 V_G 下的表面势和空间电荷分布

4. 对于 n 型半导体呢？

8.2.2 表面空间电荷层的电场、电势和电容

以 p 型半导体为例, $\rho(x) = q(n_D^+ - p_A^- + p - n)$, 利用泊松方程求解。

$$\text{令 } L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0 T}{q^2 p_0}}, \quad F\left(\frac{qV}{k_0 T}, \frac{n_0}{p_0}\right) = \sqrt{\left[\exp\left(-\frac{qV}{k_0 T}\right) + \frac{qV}{k_0 T} - 1\right] + \frac{n_0}{p_0} \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - \frac{qV}{k_0 T} - 1\right]} \quad (\text{即})$$

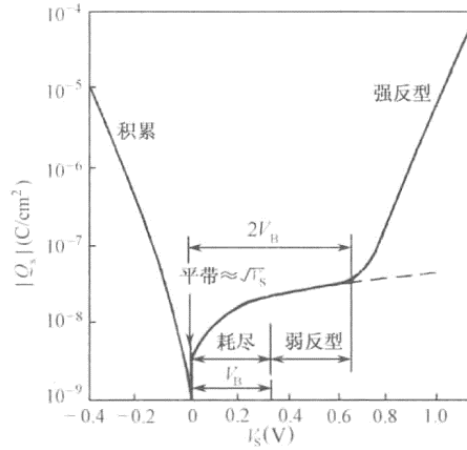
$$F(x, y) = \sqrt{(e^{-x} + x - 1) + y(e^x - x - 1)}, \quad \text{有}$$

$$\mathcal{E}_s = \pm \frac{\sqrt{2} k_0 T}{q L_D} F\left(\frac{qV_s}{k_0 T}, \frac{n_0}{p_0}\right)$$

$$Q_s = -\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 \mathcal{E}_s = \mp \frac{\sqrt{2} \varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0 T}{q L_D} F\left(\frac{qV_s}{k_0 T}, \frac{n_0}{p_0}\right)$$

$$C_s = \left| \frac{\partial Q_s}{\partial V_s} \right| = \frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2} L_D} \frac{\left[-\exp\left(-\frac{qV_s}{k_0 T}\right) + 1 \right] + \frac{n_0}{p_0} \left[\exp\left(\frac{qV_s}{k_0 T}\right) - 1 \right]}{F\left(\frac{qV_s}{k_0 T}, \frac{n_0}{p_0}\right)}$$

其中, L_D 为德拜长度, Q_s 与 C_s 是单位面积的电量与电容。



室温下, $N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 p 型硅中, $|Q_s|$ 与表面势 V_s 的函数关系

1. 堆积状态

- F 函数近似
- 表面电场
- 表面电荷密度
- 微分电容

2. 平带状态

- F 函数
- 表面电场
- 表面电荷密度
- 微分电容

3. 耗尽状态

- F 函数近似
- 表面电场

- c) 表面电荷密度
 - d) 微分电容
 - e) 耗尽层近似是如何处理的?
4. 反型状态
- a) 什么是强反型与临界强反型? 如何判定?
 - b) 什么是 MIS 结构的开启电压?
 - c) F 函数近似
 - d) 表面电场
 - e) 表面电荷密度
 - f) 微分电容
 - g) 耗尽层宽度为什么会出现极大值?
5. 什么是深耗尽状态? 它是如何形成的?

8.3 MIS 结构的 C-V 特性

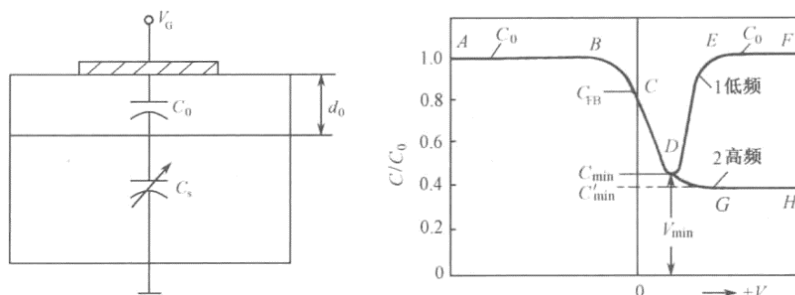
8.3.1 理想 MIS 结构的 C-V 特性

仍以 p 型半导体为例。

1. 电压降分布 $V_G = V_0 + V_s = -\frac{Q_s}{C_0} + V_s$, 微分可得到

$$C = -\frac{dQ_s}{dV_G} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} - \frac{dQ_s}{dV_s}} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_s}}$$

2. MIS 结构电容相当于绝缘层电容和半导体空间电荷层电容的串联。



3. 理想 MIS 结构的 C-V 特性如图所示。各段曲线分别代表什么状态? 为什么形成这种曲线?
4. 图中 C 点随参杂浓度和绝缘层厚度变化是如何变化的?
5. 随着频率变化, 曲线是如何变化的? 随着杂质浓度变化呢?
6. n 型半导体 C-V 特性图像是怎样的?

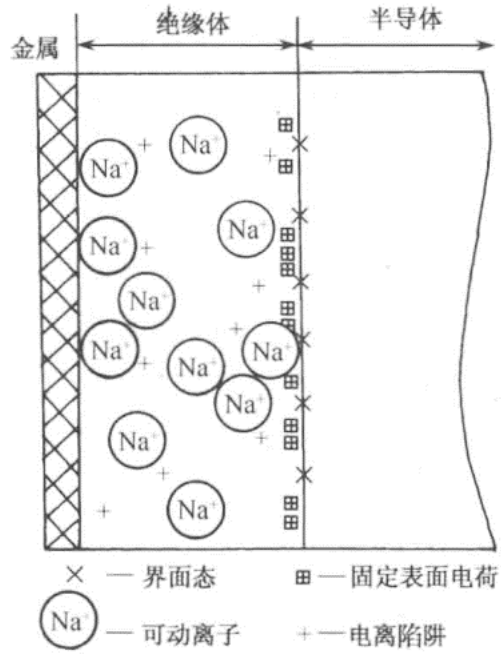
8.3.2-3 其他因素对 MIS 结构 C-V 特性的影响

1. 什么是平带电压? 受哪两种常见因素影响?
2. 平带电压存在时, 对 C-V 特性的影响是怎样的?

3. 两种因素都存在时, $V_{\text{FB}} = -V_{\text{ms}} - \frac{1}{C_0} \int_0^{d_0} \frac{x\rho(x)}{d_0} dx = \frac{W_{\text{m}} - W_{\text{s}}}{q} - \frac{1}{C_0} \int_0^{d_0} \frac{x\rho(x)}{d_0} dx$

8.4 硅—二氧化硅系统的性质

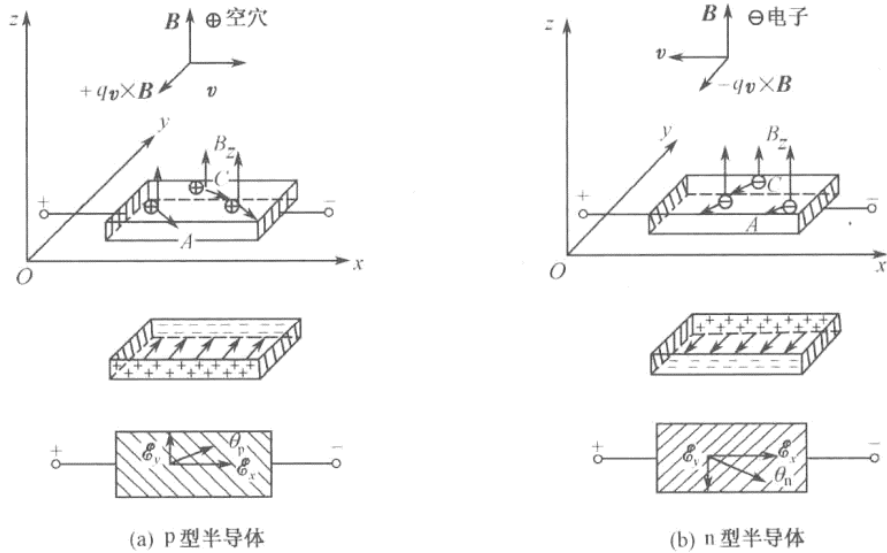
硅—二氧化硅系统中存在多种形式的电荷或能量状态, 可归纳为 4 种基本类型。



半导体物理学 霍尔效应

$$\mathcal{E}_y = R_H J_x B_z$$

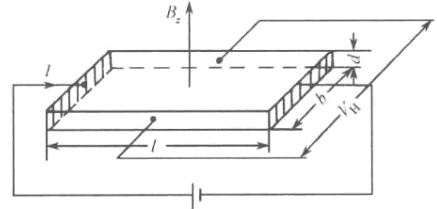
1. 式中 R_H 为霍尔系数，对于仅存在一种载流子的 p 型、n 型半导体，其值分别是什么？
2. 霍尔角是如何定义的？对于 p 型、n 型有何不同？



3. 实验中，如何测量霍尔系数 R_H ？

$$R_H = \frac{V_H d}{I_x B_z}$$

4. 对于两种载流子的霍尔效应，其霍尔系数 R_H 是怎样的？



随温度如何变化？

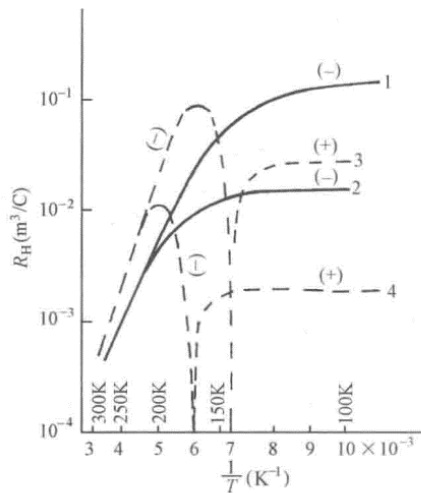


图 12-4 铟化钢霍尔系数与温度的关系

1— $n=5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ；2— $n=5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

3— $p=3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ；4— $p=4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$