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？ $np = n_i^2 = N_c N_v \exp(-\frac{E_g}{kT})$
2. 什么是非平衡载流子？它是如何产生的？ 施加外界作用，破坏了热平衡，进入非平衡状态，载流子浓度多出的部分是非平衡载流子
3. 什么是非平衡载流子的复合？ 外部作用撤去后，非平衡状态，恢复到平衡状态，多余电子空穴成对消失（净复合）（从导带回到价态）
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。 热平衡态，产生与复合是相等速率的，外部作用使产生率变大，载流子增多，于是复合率也上升，上升到与产生率相等。

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？ τ：平均存活时间 $\tau = \frac{1}{P}$
2. 什么是非平衡载流子的（净）复合率U？ 单位时间净复合（消失）的电子-空穴数量 $(U = R - G)$
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）：$\Delta p(t) = (\Delta p)_0(t)\, e^{-\frac{t}{\tau}}$.

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

5.3 准费米能级

$n_0 = N_c \exp(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T})$ $p_0 = N_v \exp(-\frac{E_F - E_v}{kT})$

1. 从费米能级角度如何判断半导体的热平衡状态？ 有统一的费米能级是热平衡态的标志（可满足 $np = n_i^2$）
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？ 局部费米能级 价带、导带（局部看）分别各自处于平衡的状态，因而费米能级系统讨论中各自适用 E_{Fn}：导带准费米能级 电子准费米能级 E_{Fp}：价带准费米能级 空穴准费米能级
3. E_{Fn}、E_{Fp}偏离E_F的程度分别如何？ 多数载流子准费米能级偏离较小 少数载流子偏离较多

5.4 复合理论

5.4.1 直接复合

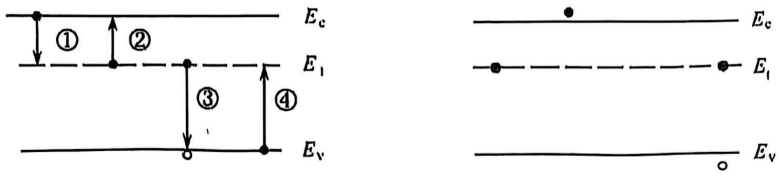
1. 什么是直接复合？ 电子在导带与价带间直接跃迁
2. 请给出产生率G、复合率R与净复合率U_d的关系。 $U_d = R - G$
3. 寿命 $\tau = \dfrac{\Delta p}{U_d} = \dfrac{1}{r[(n_0 + p_0) + \Delta p]}$.
4. 直接复合适用于直接辐射复合与声子跃迁过程。

5.4.2 间接复合

低速复合过程用杂质与缺陷

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。



(a) 复合过程前　　(b) 复合过程后

俘获电子
发射电子
俘获空穴
发射空穴

图：间接复合的4个过程

①+④=②+③　　①-②=③-④.

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

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

5. 对于n型半导体，请解释“强n型区”与“高阻区”的含义。

强n型区：E_F比E_t(E_t')更接近导带(更远离E_i)

高阻：E_F比E_t(E_t')更接近E_i

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—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。

杂质能级可以积累非平衡载流子的作用

2. 什么是陷阱与陷阱中心？

陷阱：有显著陷阱效应的杂质能级

陷阱中心：对应的杂质和缺陷

5.6 载流子的扩散运动

1. 发生扩散运动的条件是什么？ 出现浓度不均匀 ⇒ 出现浓度梯度

2. 浓度梯度$\nabla(\Delta p) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\Delta p(x)$.（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？ 扩散由高浓度向低浓度扩散

D反映了非平衡载流子扩散本领的大小

$$S_p = -D_p\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\Delta p(x) \qquad (S_p = -D_p\cdot\nabla(\Delta p)) \qquad (\vec{J}_p)_{扩} = +q\cdot\vec{S}_p$$

4. 稳态扩散方程的含义是什么？ 稳定情况下，由于扩散作用，在单位t，单位V内积累的非平衡载流子数等于在单位t单位V内由于复合而消失的非平衡载流子数

$$-\nabla\cdot\boldsymbol{S}_p = D_p\nabla^2(\Delta p) = \frac{\Delta p(x)}{\tau} \qquad \left(D_p\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}\Delta p(x) = \frac{\Delta p(x)}{\tau}\right)$$

5. 扩散长度$L = \sqrt{D\tau}$的含义是什么？ 非平衡载流子深入样品的平均距离

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？ 将描述漂移运动的物理量μ与描述扩散运动的物理量D联系在一起

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_0T}{q}$$

2. 电流密度方程式

$$J = J_n + J_p = q\mu_p\left(p\mathscr{E} - \frac{k_0T}{q}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\right) + q\mu_n\left(n\mathscr{E} + \frac{k_0T}{q}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}x}\right)$$

$$= \underbrace{q(\mu_p p + \mu_n n)\vec{E}}_{(J_{漂})} + \underbrace{q\vec{S}_p + (-q)\vec{S}_n}_{(J_{扩})}$$

5.8 连续性方程式

少数载流子所遵循的方程

1. 连续性方程式（各项）物理含义是什么？

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \left(-\frac{1}{q}\frac{\partial(J_p)_{扩}}{\partial x}\right) + \left(-\frac{1}{q}\frac{\partial(J_p)_{漂}}{\partial x}\right) + \left(-\frac{\Delta p}{\tau_p}\right) + g_p$$

$$= D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p\mathscr{E}\frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p\frac{\partial\mathscr{E}}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + g_p$$

$$= -\frac{1}{q}\nabla\cdot\boldsymbol{J}_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} + g_p$$

（非平衡）单位t单位V内少数载流子数量变化等于单位t单位V内由于扩散、漂移和其它因素所积累的数量减去因复合而消失的数量

2. 牵引长度$L(\mathscr{E}) = \mathscr{E}\mu\tau$的含义是什么？它与扩散长度的关系是什么？ 载流子在电场作用下在寿命τ时间内所漂移的距离

3. 如何利用连续性方程式理解稳态扩散方程？

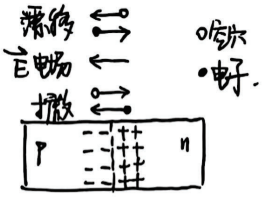
稳态时：$\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ 仅扩散（不考虑漂移）：$(J_p)_{漂} \equiv 0$

取$g_p = 0$ 有 $D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\Delta p}{\tau_p}$

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

pn结(接触)区域小，由于电子、空穴浓度差，电子从n区扩散到p区，空穴从p区扩散到n区，故留下了不可移动的电荷施主/受主，它们所带电荷为空间电荷，所在区域为空间电荷区。

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？ 空间电荷产生了从n区指向p区的电场 —内建电场，内建电场下的漂移运动与扩散运动方向相反。
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？

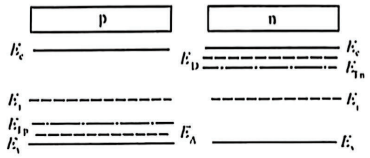
扩散、漂移两种电流大小相等方向相反 ⇒ 互相抵消 . $\Sigma I=0$ → 热平衡了。

有效相对减少了空间电荷数量

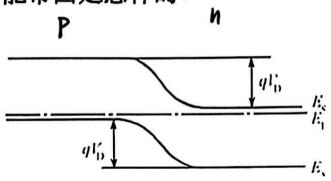
6.1.3 pn 结能带图

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？

能带的移动是pn结空间电荷区中存在内建电场的结果



(a) n、p 型半导体的能带



(b) 平衡状态 pn 结能带图

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？ 电子从n到p要爬一个高坡 qV_D，空穴从p到n亦如此。

6.1.4 pn 结接触电势差

1. 势垒高度 $qV_D = E_{Fn} - E_{Fp}$.（费米能级）

$N_D \approx n_{n0} = n_i \exp\left(\frac{(E_F)_n - E_i}{k_0T}\right)$　　$N_A \approx p_{p0} = n_i \exp\left(\frac{E_i - (E_F)_p}{k_0T}\right)$

$\therefore \frac{N_A N_D}{n_i^2} = \exp\frac{(E_F)_n - (E_F)_p}{k_0T}$ ⇒ $V_D = \frac{k_0T}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}$

2. 电势差 $V_D = \frac{k_0T}{q}\ln\frac{n_{n0}}{n_{p0}} = \frac{k_0T}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}$，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

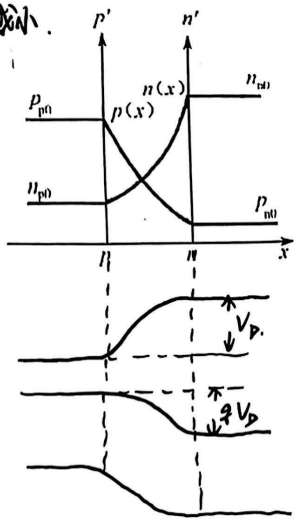
电势越低、电子电势能越高，则电子浓度越小。空穴刚反之。

1. 电子浓度 $n(x) = n_{n0}\exp\left[\frac{qV(x) - qV_D}{k_0T}\right]$，　$n_{p0} = n_{n0}\exp\left[-\frac{qV_D}{k_0T}\right]$
2. 空穴浓度 $p(x) = p_{p0}\exp\left[-\frac{qV(x)}{k_0T}\right]$，$n_{n0} = p_{p0}\exp\left[-\frac{qV_D}{k_0T}\right]$

必结论 $n \cdot p = n_{n0} \cdot p_{p0} \exp\left[-\frac{qV_D}{k_0T}\right] = n_i^2$（平衡状态）

3. 什么是耗尽层？

虽然杂质电离但载流子浓度很小，约等于0 像是"耗尽了"（更接近本征？）



能带中的能量是对电子而言的

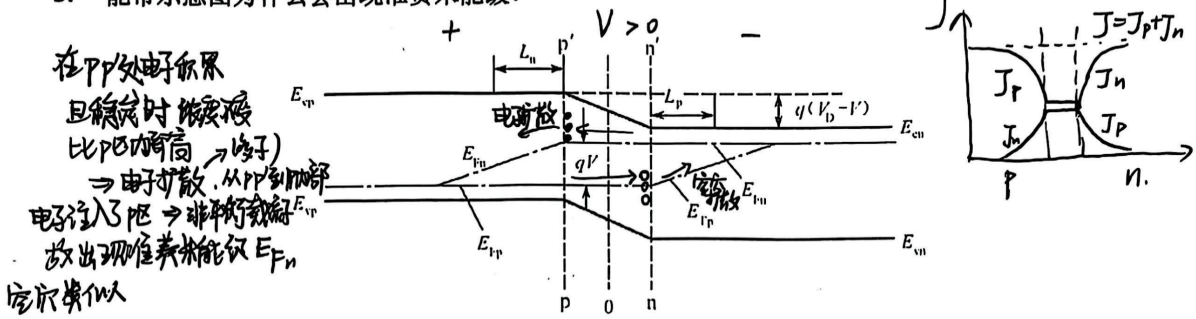
6.2 pn 结电流-电压特性

6.2.1 非平衡状态下的 pn 结

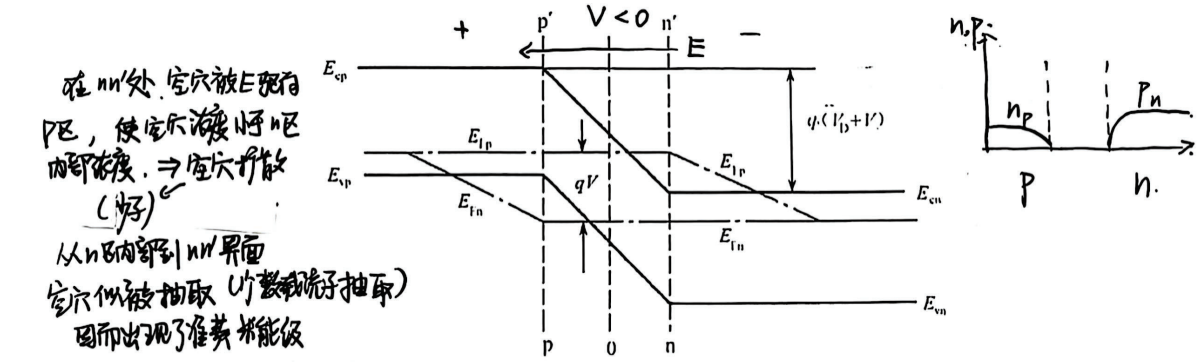
1. 外加电压 V，势垒高度如何变化？ V>0，p正，⇒正向偏压，势垒高度减小 V<0，势垒高度变大 高度 $q(V_D-V)$

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？如第2问，出现了非平衡子少数载流子的注入（或抽取）



在pp'处电子积累
且能级时 能级减
比p区内部高 →好）
⇒电子扩散，从pp'到内部
电子注入了p区 ⇒非平衡少数载流子
故出现准费米能级 E_{Fn}
空穴类似



在nn'处，空穴被E吸引
p区，使空穴浓度小于n区
内部浓度，⇒空穴扩散
（好）
从n区内部到nn'界面
空穴似被抽取（少数载流子抽取）
因而出现了准费米能级

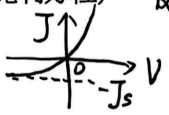
6.2.2 理想 pn 结模型及其电流—电压方程

1. 理想 pn 结模型需要满足哪些假设条件？ ①小注入条件 ②突变耗尽层 −V 近乎全在耗尽层上 ③耗尽层内，电子与空穴的热平衡 ④理想结构 边界条件

2. pn 结具有单向导电性或整流性，请简述 pn 结的整流效应。

$$J=J_s\left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)-1\right]$$ （肖克利方程）

正向电流密度 随正向偏压指数增大
反向电流密度 有饱和值 $-J_s$



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（尤其是高频下），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 $C=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V}$.

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 $Q=qN_Ax_p=qN_Dx_n$.

2. 泊松方程 $\frac{d^2}{dx^2}V(x)=-\frac{\rho(x)}{\varepsilon_r\varepsilon_0}$.

3. 边界条件：势垒区外电中性，无电场；以 p 型中性区为零电势。

4. 势垒区宽度 $X_D=x_n+x_p=\sqrt{V_D\left(\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{q}\right)\left(\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}\right)}$

$\xrightarrow{\text{有外加电压}V}\sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(N_A+N_D)(V_D-V)}{qN_AN_D}}$.

$X_D=\sqrt[3]{\frac{12\varepsilon_r\varepsilon_0(V_D-V)}{qA}}$

$C_T'=\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0}{X_D}$

对硅 $\varepsilon_r=11.9$

$X_D\approx\sqrt{\frac{1.3\times10^{-7}V_D}{N_B}}$ (cm)

$|Q|=qX_pN_A=qX_nN_D$

$X_D=X_n+X_p$

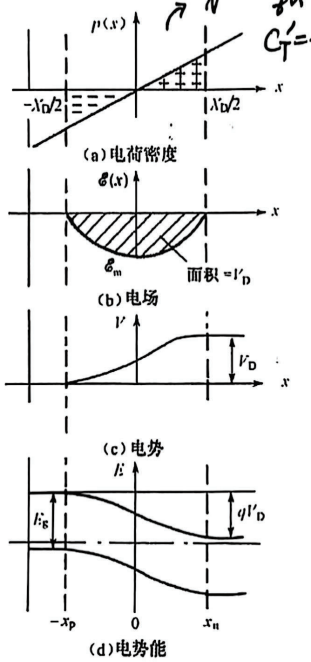
$X_p=\frac{N_DX_D}{N_D+N_A}$ $X_n=\frac{N_AX_D}{N_D+N_A}$

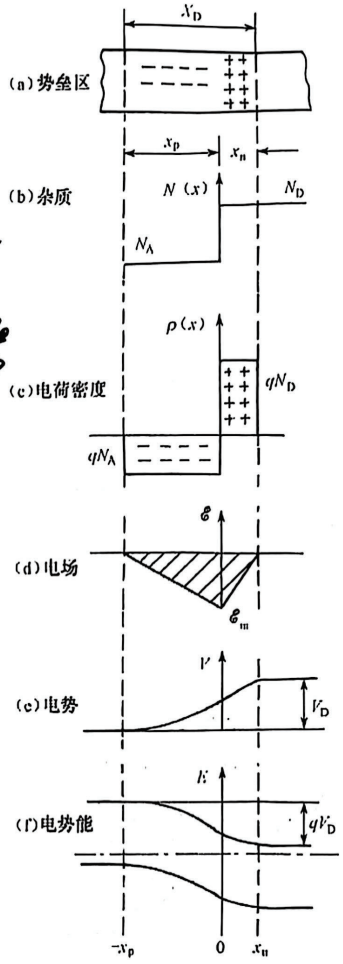
$|Q|=\frac{N_AN_Dq X_D}{N_A+N_D}$

单位面积

$C_T'=\left|\frac{dQ}{dV}\right|=\sqrt{\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0qN_AN_D}{2(N_A+N_D)(V_D-V)}}$

$=\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0}{X_D}$.





6.4 pn 结击穿

1. 什么是 pn 结击穿？有哪几种？

对pn结反向施加反向电压增大到某一数值 V_{BR} 时，反向电流开始迅速增大，此时反向偏压 V_{BR} 为击穿电压

雪崩击穿、隧道击穿、(齐纳击穿)、热击穿 → 热不稳定性引起的

2. pn 结击穿的基本原因是载流子数目的增大。

雪崩：反向偏压很大时，势垒区电场很强，电子漂移运动的能量很大，与晶格原子碰撞后，把价键电子碰撞出来，形成的空穴成可导电（高能电子/空穴 把满带电子激发）

3. 请简述雪崩击穿与隧道击穿（齐纳击穿）的机理。

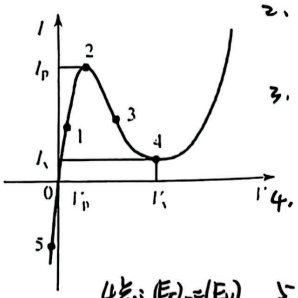
齐纳：反向偏压大 势垒高，能带倾斜大，n区导带底低于p区价带顶，且间隔小 ⇒ 电子隧道穿过可以穿过禁带

4. 低浓度掺杂利于雪崩击穿，高浓度掺杂利于隧道击穿。

5. 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

1. 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。



2点：$(E_F)_p=(E_V)_n$

4点：$(E_F)_p=(E_V)_n$

2. 隧道二极管有哪三个显著的优点。

① 多子隧道效应 → 噪声较低

② 简并半导体 → 工作温度范围大

③ 量子效应过渡时间短 → 工作频率可以很高

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

在热力学温度为零时，真空中电子静止电子的能量 E_0 与其费米能级 E_F 的差

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？电子亲合能 χ 是什么？

χ（或 $q\chi$）：E_c 到 E_0 的能量间隔

导带底电子逸出体外所需的最小能量

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

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？

半导体表面与内部的电势差

金半接触后，费米能级拉开，使金属、半导体之间存在电势差 — 接触电势差

（弥补了补偿了原来费米能级的不同）

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

仅在阻挡层情况下有意义

半导体一侧：

$qV_D = |W_m - W_s|$

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？

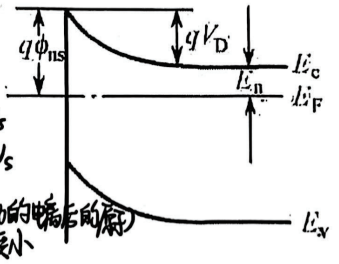
金属一侧：

$q\phi_{ns} = qV_D + E_n = W_m - \chi$

$q\phi_{ps} = qV_D + E_p = E_g + \chi - W_m$

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？

	阻挡层	反阻挡层
n	$W_m > W_s$	$W_m < W_s$
p	$W_m < W_s$	$W_m > W_s$

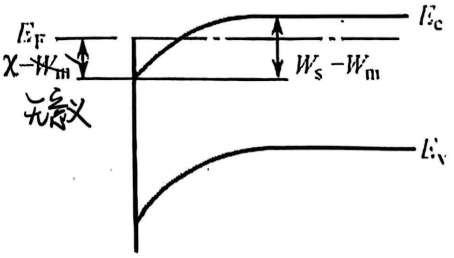


（空间电荷主要不可移动的电离施主的贡献）

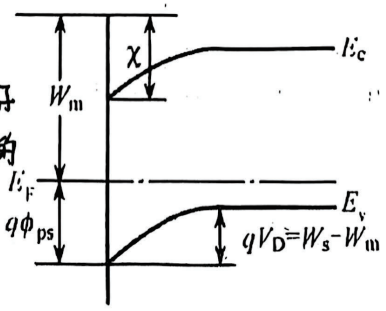
势垒区载流子浓度小

是高阻的区域

称为阻挡层

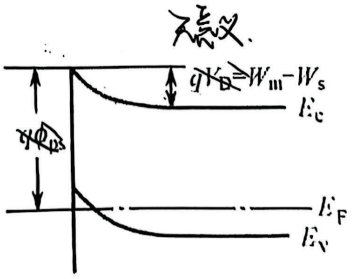


反阻挡层无"势垒高度"这种概念



空间电荷区是多数载流子由金属流向半导体导致的

是高电导，是反阻挡层



正向电压 对应正向电流 对应多数载流子由半导体到金属所形成的电流

7.2 金属半导体接触整流理论

金属一侧接V，半导体一侧接0　则表面势变为$(V_s)_0+V$

请简述阻挡层的整流作用。

在金属半导体两端加电压，主要降落在阻挡层上（因为高阻区）

加正向电压时，会使得半导体一侧势垒变小；反向电压 使其变大

⇒ 正反向电压对于n.p型金半接触是不一样的

正向电压：n：$V>0$　p：$V<0$

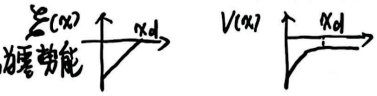
7.2.1 扩散理论

1. 扩散理论适用于厚阻挡层，什么是厚阻挡层？　势垒宽度比电子平均自由程大得多（电子通过势垒区会发生多次碰撞）

以n型为例

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

以$(E_F)_m$为零势能



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

3. 什么是肖特基势垒？　厚度依赖于外加电压，金半接触形成厚阻挡层，该阻挡层（空间电荷区为电离施主原子）具有整流作用，而对载流子形成势垒。
肖特基势垒高度是金属一侧的势垒高度

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？　阻挡层较薄，载流子平均自由程远大于势垒宽度 x_d，势垒高度起主要作用（形状不重要）
只要有足够的能量去越过势垒顶点，就可以自由地通过阻挡层

7.2.3 不考虑相反的接触情况，隧道效应

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）？
① 正向电流是多数载流子
不需要少数载流子积累
高频特性好
② 正向导通电压小（反向电流大）

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

以n型为例

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

不会影响原器件电流电压特性
不产生明显附加阻抗，而且不会使半导体内部平衡载流子浓度发生显著改变

1. 什么是欧姆接触？实际一般如何制作欧姆接触？　利用隧道效应

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？

一般半导体材料有很高的表面态密度，因此与金属接触时均会形成势垒

半导体物理学 Chapter 8

8 半导体表面与 MIS 结构

表面：晶体周期性结构在表面中断，破坏了对称性
⇒ 会构成表面的特殊结构和性质

8.1 表面态

理想表面：
表面层中原子排列的对称性与体内原子完全相同，且表面上不附着任何原子或分子的半无限晶体表面

表面态：表面周期性结构（晶格）破坏不
从而在禁带中引入附加能级
（电子表面态对的电子的能态）
这些附加能级上的电子局限在表面附近，
沿向体内指数衰减
这种能态为表面态。

1. 什么是理想表面？
2. 什么是表面态？

8.2 表面电场效应

如：① 功函数不同的金半接触
② 半导体表面外吸附带电离子
③ MIS结构下，金属与半导体间施加电压

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？

① 金属与半导体间功函数差为零
② 在绝缘层内没有任何电荷且绝缘层完全不导电
③ 绝缘体与半导体界面处不存在任何界面态

8.2.1 空间电荷层及表面势

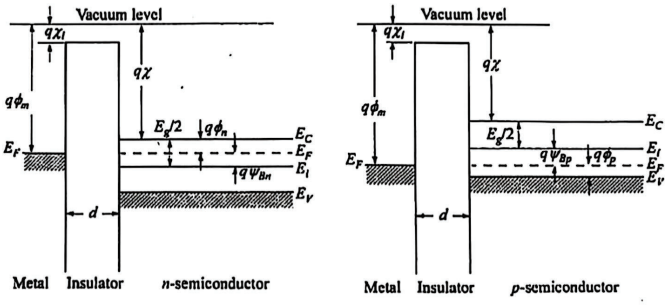
MIS结构相当于电容，半导体侧，电荷分布在一定厚度的表面层内

1. 这里的空间电荷层及表面势V_s是如何定义的？

空间电荷层两端电势差（半导体内部为0）为V_s

2. 什么是平带状态？

表面势为0
半导体表面处能带不发生弯曲
理想MIS结构下
要求$V_G=0$



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？

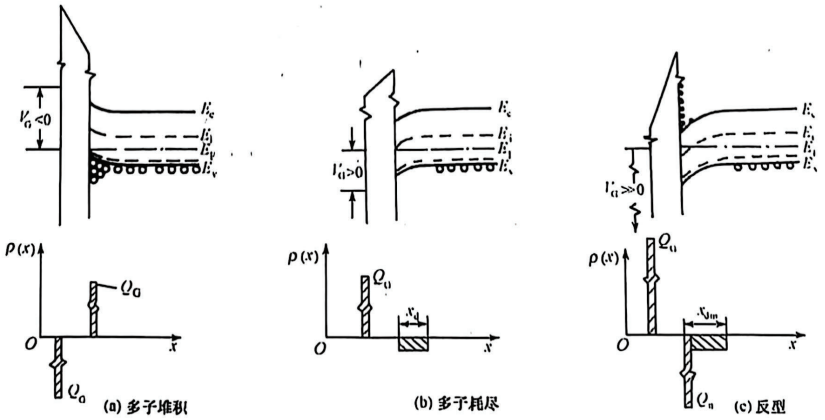
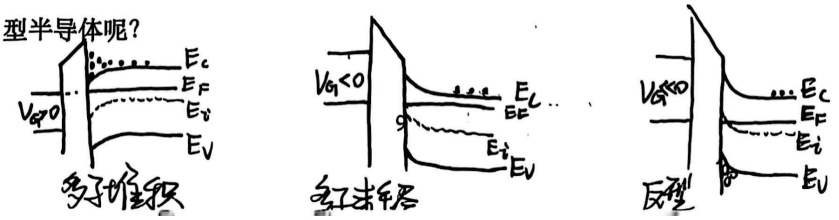


图 8-5 由 p 型半导体构成的理想 MIS结构在各种 V_G 下的表面势和空间电荷分布

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。

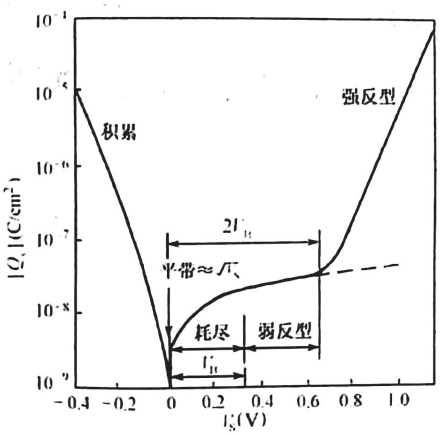
令 $L_D=\sqrt{\dfrac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0 T}{q^2 p_0}}$，$F\left(\dfrac{qV}{k_0T},\dfrac{n_0}{p_0}\right)=\sqrt{\left[\exp\left(-\dfrac{qV}{k_0T}\right)+\dfrac{qV}{k_0T}-1\right]+\dfrac{n_0}{p_0}\left[\exp\left(\dfrac{qV}{k_0T}\right)-\dfrac{qV}{k_0T}-1\right]}$（即 $F(x,y)=\sqrt{(e^{-x}+x-1)+y(e^{x}-x-1)}$），有

$$\mathscr{E}_s=\pm\frac{\sqrt{2}k_0T}{qL_D}F\left(\frac{qV_s}{k_0T},\frac{n_0}{p_0}\right)$$ ～与 V_s 同号

$$Q_s=-\varepsilon_{rs}\varepsilon_0\mathscr{E}_s=\mp\frac{\sqrt{2}\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T}{qL_D}F\left(\frac{qV_s}{k_0T},\frac{n_0}{p_0}\right)$$ ～与 V_s 反号

$$C_s=\left|\frac{\partial Q_s}{\partial V_s}\right|=\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D}\frac{\left[-\exp\left(-\frac{qV_s}{k_0T}\right)+1\right]+\frac{n_0}{p_0}\left[\exp\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)-1\right]}{F\left(\frac{qV_s}{k_0T},\frac{n_0}{p_0}\right)}$$

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，$N_A=4\times10^{15}\,cm^{-3}$ 的 p 型硅中，$|Q_s|$ 与表面势 V_s 的函数关系

$\dfrac{n_0}{p_0}\ll1$

$F(x,y)\simeq(e^{-x}+x-1)^{\frac{1}{2}}$

1. 堆积状态 $V_G<0$ $\quad F\simeq e^{-\frac{x}{2}}=e^{-\frac{qV_s}{2k_0T}}$
   a) F 函数近似
   b) 表面电场 $\quad \mathscr{E}_s=-\dfrac{\sqrt{2}k_0T}{qL_D}\exp\left(-\dfrac{qV_s}{2k_0T}\right)$ $\quad Q_s=-\varepsilon_{rs}\varepsilon_0\mathscr{E}_s$
   c) 表面电荷密度
   d) 微分电容 $\quad C_s=\left|\dfrac{\partial Q_s}{\partial V_s}\right|=\dfrac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D}\exp\left(-\dfrac{qV_s}{2k_0T}\right)$
2. 平带状态 $V_G=0=V_s$
   a) F 函数近似 $\quad F=0 \quad \mathscr{E}=0 \quad Q_s=0$
   b) 表面电场
   c) 表面电荷密度 $\quad C_s\approx\dfrac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D}\dfrac{\frac{qV_s}{k_0T}}{\sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)^2}}=\dfrac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{L_D}$
   d) 微分电容
3. 耗尽状态 $V_G>0$ $\quad F\simeq\sqrt{x}=\left(\dfrac{qV_s}{k_0T}\right)^{\frac{1}{2}}$
   a) F 函数近似 $\quad \mathscr{E}_s=\dfrac{\sqrt{2}}{L_D}\cdot\left(\dfrac{k_0T}{q}\right)^{\frac{1}{2}}(V_s)^{\frac{1}{2}}=\left(\dfrac{2qN_AV_s}{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}}$ $\quad C_s=\left|\dfrac{\partial Q_s}{\partial V_s}\right|=\dfrac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D}\left(\dfrac{k_0T}{qV_s}\right)^{\frac{1}{2}}$
   b) 表面电场
   c) 表面电荷密度 $\quad Q_s=-\varepsilon_{rs}\varepsilon_0\mathscr{E}_s=-(2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0qN_AV_s)^{\frac{1}{2}}$

把 L_D 中 p_0 代入 N_A，代入有 $C_s=\left(\dfrac{N_Aq\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{2V_s}\right)^{\frac{1}{2}}$

耗尽层近似：认为 $\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{qN_A}{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}$ $\Rightarrow V(x)=\frac{qN_A(x_d-x)^2}{2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}$ $V(0)=V_s=\frac{qN_Ax_d^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_0}$

$\therefore x_d=\sqrt{\frac{2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{qN_A}}\cdot\sqrt{V_s}$ $\mathcal{E}_s=\left[-\frac{d}{dx}V(x)\right]_{x=0}=\frac{qN_A}{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}x_d=\sqrt{\frac{2qN_A}{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}V_s}$

$Q_s=-qN_Ax_d=-\varepsilon_{rs}\varepsilon_0\mathcal{E}_s$

d) 微分电容

e) 耗尽层近似是如何处理的？

$V_G>>0$

4. 反型状态

以 $V_s=2V_B$ 为临界 $V_s\geq 2V_B$ 强反型 否则为弱反型

或：表面处少数载流子浓度 n_s 是否超过体内多数载流子浓度 p_0

a) 什么是强反型与临界强反型？如何判定？ $qV_B=E_i-E_F$ 是禁带中央能量与费米能级的差

b) 什么是 MIS 结构的开启电压？ 当 $V_s=2V_B$ 时，金属上加的电压 V_T 称为开启电压

c) F 函数近似 $p_0=n_i\exp\left(\frac{E_i-E_F}{k_0T}\right)$ $\Rightarrow V_B=\frac{k_0T}{q}\ln\frac{N_A}{n_i}$

d) 表面电场 弱→临界：$n_s=\frac{n_i^2}{p_0}\exp\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)\geq n_i\exp\left(\frac{qV_B}{k_0T}\right)$ $\therefore V_s\geq 2V_B$

e) 表面电荷密度 $F=\left[\frac{qV_s}{k_0T}\left(1-\exp\frac{-qV_s}{k_0T}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\approx\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)^{\frac{1}{2}}$

f) 微分电容 故与耗尽层其本一致 （不过，临界时 $V_s=2V_B$）

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？ 强反型时 $F\simeq\left(\frac{n_0}{p_0}\right)^{\frac{1}{2}}\exp\left(\frac{qV_s}{2k_0T}\right)$ $(V_s>>2V_B)$

V_G高频高幅时，少数载流子产生速率不及电压、电场变化速度，反型层来不及建立，只能依靠耗尽层向内部延伸而产生大量受主离子来满足电场的需求 此时 x_d 可以很大 $(\gg x_{dm})$

8.3 MIS 结构的 C-V 特性

$\mathcal{E}_s=\frac{\sqrt{2}k_0T}{qL_D}F=\left(n_s\cdot\frac{2k_0T}{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}}$ $Q_s=-\varepsilon_{rs}\varepsilon_0\mathcal{E}_s$

$C_s=\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D}\left(\frac{n_0}{p_0}\right)^{\frac{1}{2}}\exp\left(\frac{qV_s}{2k_0T}\right)=\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D}\left(\frac{n_s}{p_p}\right)^{\frac{1}{2}}$

8.3.1 理想 MIS 结构的 C-V 特性

强反型下，x_{dm} 最小值不变 $x_{dm}=\left(\frac{4\varepsilon_{rs}\varepsilon_0V_B}{qN_A}\right)^{\frac{1}{2}}$

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 $V_T=V_G\big|_{V_s=2V_B}=-\frac{Q_s}{C_0}+V_s$ （代入 $V_s=2V_B$ 时的 V_s 与 Q_s 即可）

$C_0=\frac{\varepsilon_{r0}\varepsilon_0}{d_0}$

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

AB段：负偏压，$V_s<0$ 且 $|V_s|$ 较大 堆积状态，半导体几乎导通

$\frac{C}{C_0}=\frac{1}{1+\frac{\sqrt{2}L_D}{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}\cdot\exp\left(\frac{qV_s}{2k_0T}\right)}$ $C\approx C_0$

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。

BC段：$V_s<0$ 但 V_s 较小，耗尽状态 C变小

C点：平带电容

$\frac{C}{C_0}\Big|_{V_s=0}=\frac{C_{FB}}{C_0}=\frac{1}{1+\frac{\varepsilon_{r0}}{\varepsilon_{rs}}\left(\frac{\varepsilon_0\varepsilon_0k_0T}{q^2N_Ad_0^2}\right)^{\frac{1}{2}}}$

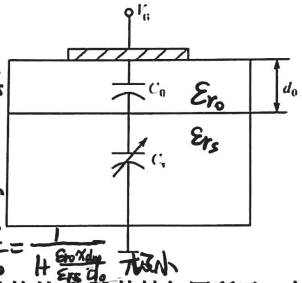
CD：耗尽状态

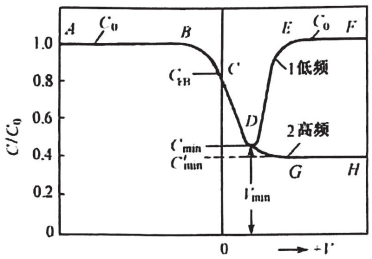
$\frac{C}{C_0}=\frac{1}{1+\left(\frac{2\varepsilon_{r0}\varepsilon_0V_G}{\varepsilon_{rs}qN_Ad^2}\right)^{\frac{1}{2}}}$

耗尽后进入反型

EF：若 f 低频，代入反型的 C_s 可有 $\frac{C}{C_0}=\cdots\to 1$

GH：若 f 高频 ⇒ 深耗尽状态 $C_s=\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{x_{dm}}$ 故 $\frac{C}{C_0}=\frac{1}{1+\frac{\varepsilon_{r0}x_{dm}}{\varepsilon_{rs}d_0}}$ 无法小

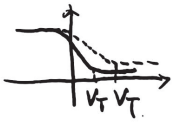




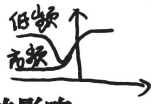
3. 理想 MIS 结构的 C-V 特性如图所示。各段曲线分别代表什么状态？为什么形成这种曲线？

4. 图中 C 点随参杂浓度和绝缘层厚度变化是如何变化的？ 随 N_A 或 d_0 增大而增大

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

功函数不同，绝缘层中带电荷 使半导体表面层不处于平带状态，为了恢复平带状态而施加的电压

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？ $V_{FB}<0$ 向左平移 $|V_{FB}|$ $V_{FB}>0$ 则向右平移 $|V_{FB}|$

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

半导体物理学 霍尔效应

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

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？

电场和电流之间的夹角

2. 霍尔角是如何定义的？对于 p 型、n 型有何不同？

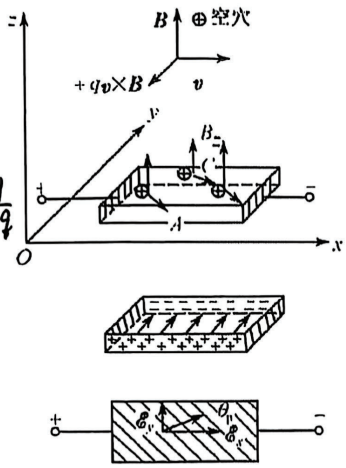
$q v_x B_z = q \mathscr{E}_y$

$J_x = p q v_x$

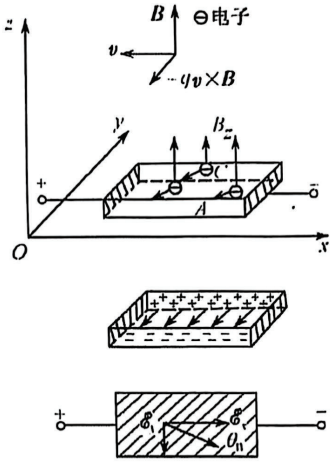
$\therefore R_H = \frac{\mathscr{E}_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pq}$

$(R_H)_p = \frac{1}{pq} > 0$

$\tan\theta_p = \frac{\mathscr{E}_y}{\mathscr{E}_x}$



(a) p型半导体



(b) n型半导体

$(-q)\cdot(-v_x) B_z = -q \mathscr{E}_y$

$J_x = n(-q)(-v_x)$

$R_H = \frac{\mathscr{E}_y}{J_x B_z} = -\frac{1}{nq}$

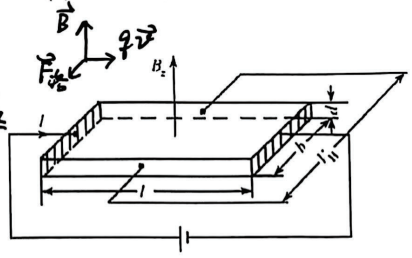
$(R_H)_n = -\frac{1}{nq} < 0$

$\tan\theta_n = -\left|\frac{\mathscr{E}_y}{\mathscr{E}_x}\right|$

3. 实验中，如何测量霍尔系数R_H？

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

$R_H = \frac{\mathscr{E}_y}{J_x B_z} = \frac{V_H}{d} \frac{bd}{I_x B_z}$



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？

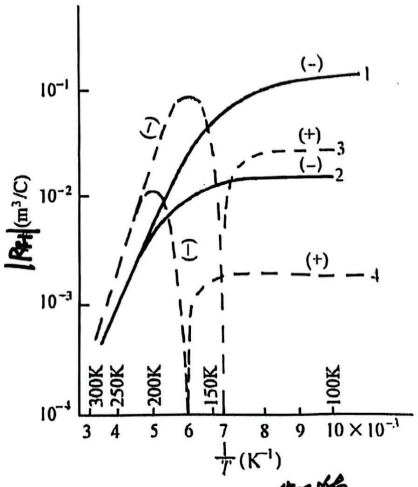
$R_H = \frac{1}{q} \frac{p - nb^2}{(p+nb)^2}$ $\left(b = \frac{\mu_n}{\mu_p}\right)$

一般 $b>1$

n型保持负，不变号

p型在高温下变号

温度高时，$|R_H|$减小



绝对值

图 12-4 锑化铟霍耳系数与温度的关系

1—$n=5\times10^{13}\,cm^{-3}$；2—$n=5\times10^{14}\,cm^{-3}$

3—$p=3\times10^{14}\,cm^{-3}$；4—$p=4\times10^{15}\,cm^{-3}$