

6.4 霍尔效应

➤ <实验前的思考>

1. 变温霍尔效应能用来测量半导体材料的哪些电学特性？
2. 霍尔效应如何判断载流子导电类型？
3. 本实验是否可应用于任何形状的霍尔样品？对不规则霍尔样品，如何测量其霍尔效应？

➤ <实验原理>

如果给半导体样品通一个小的样品电流，并在电流的垂直方向上加以磁场，就可以在与电流和磁场都垂直的方向上产生一个电势差，这种现象称为霍尔效应。这是1879年霍尔(E.H.Hall)在研究导体在磁场中受力的性质时发现的，1985年德国克利青(Klaus von Klitzing)发现量子霍尔效应获得诺贝尔奖。1998年华裔科学家崔琦、斯坦福大学的Laughlin和哥伦比亚大学的Stormer因发现分数量子霍尔效应也获得诺贝尔奖。

霍尔效应对分析和研究半导体材料的电学特性具有十分重要的意义。通过霍尔效应测量不仅可以计算**霍尔系数 R_H** 、判断半导体材料的**导电类型**、计算**载流子浓度**及**迁移率 μ_H** 和**电导率 σ** ，还可以从低温杂质弱电离区到高温本征激发温度范围内的变温霍尔效应来计算半导体的**禁带宽度 E_g** 及**杂质电离能 E_i** 。

假如有一块厚为 a ，宽为 d ，长为 l 的**标准**矩形n型半导体样品，如果沿 $+x$ 方向加一个小电流 I_x ，并在 $+z$ 方向加一个磁场 B_z ，则沿 $-x$ 运动的载流子电子在洛伦兹力 $F=q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ 的作用下，将向 $-y$ 方向偏转并在界面处积累，形成一个电场 E_H ，产生一个电场力 $F_B=q E_H$ ，这个电场力将阻止电子偏转，最终电场力和洛伦兹力达到平衡，并在A和C两端产生电势差 V_H ，称为霍尔电势。

$$\begin{cases} q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}_Z) = qE_H \\ V_H = E_H d \\ I_x = nqvad \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_H = vB_Z d = \frac{I_x}{nqad} B_Z d = \frac{I_x B_Z}{nqa} = R_H \frac{I_x B_Z}{a}$$

R_H 定义为霍尔系数。

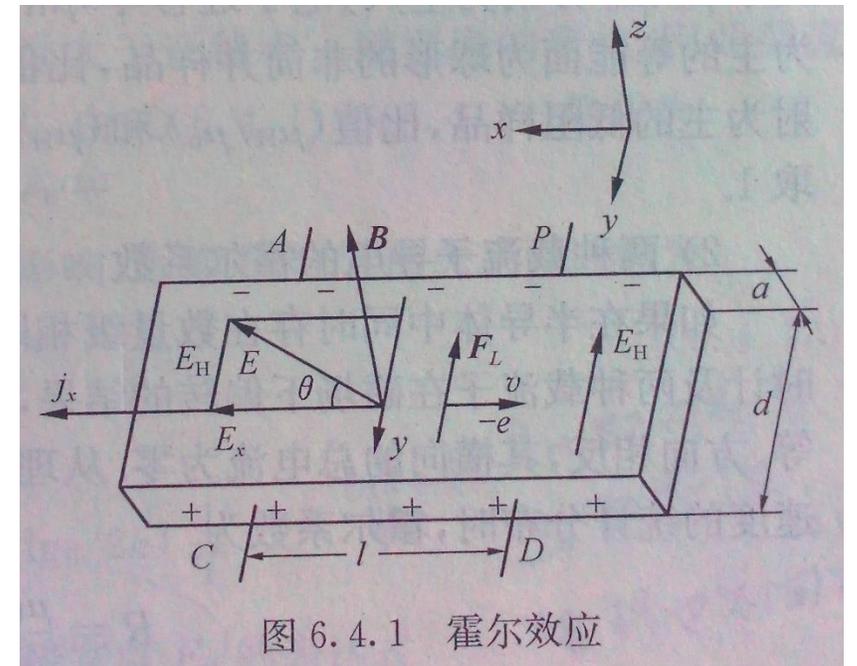


图 6.4.1 霍尔效应

即

$$R_H = -\frac{1}{ne} \text{ (n型)} \quad R_H = \frac{1}{pe} \text{ (p型)} \quad R_H = \frac{V_H a}{I_x B_z} \text{ (m}^3\text{/C)}$$

在实验中， I_x ， B_z ， a 是已知的，而 V_H 可以通过测量得到。只要知道 V_H ，就可以判断其导电类型和载流子浓度。

应用1：判断导电类型和计算载流子浓度

根据测量出的 V_H 数值和符号，可以判断样品的导电类型：

如果 $V_H > 0$ ，则 $R_H > 0$ ，则为p型半导体；

如果 $V_H < 0$ ，则 $R_H < 0$ ，则为n型半导体；

应用2：计算电导率 σ 和迁移率 μ_H

根据**电阻率**的定义（电阻与横截面积的乘积与长度之比值）

$$\rho = \frac{RS}{L} = \frac{V_\sigma ad}{I_x l}$$

对应的**电导率 σ**

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I_x l}{V_\sigma ad} \quad (\Omega \cdot \text{cm}^{-1})$$

再根据**迁移率 μ_H** 定义（单位电场强度下所产生的载流子平均漂移速度），得

$$\begin{cases} j = \sigma E \\ j = nqv \Rightarrow j = nq\mu_H E = \sigma E \Rightarrow \mu_H = \frac{\sigma}{nq} = |R_H| \cdot \sigma \\ v = \mu_H E \end{cases}$$

$$\mu_H = |R_H| \cdot \sigma \quad (\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$$

应用3: 计算禁带宽度 E_g 及杂质电离能 E_i

$$E_g = \frac{\Delta(\lg R) 2K}{\Delta(1/T) \lg e} \quad E_g = -\frac{\Delta(\lg \sigma)}{\Delta(1/T)} \cdot \frac{2K}{\lg e}$$

$$E_i = \frac{\Delta(\lg RT^{3/4}) 2K}{\Delta(1/T) \lg e}$$

根据变温曲线 ($\lg R_H - 1/T$ 或 $\lg \sigma - 1/T$ 曲线) 中**高温本征导电区**的曲线斜率求 E_g , 根据变温曲线中**低温杂质电离区**的曲线斜率求 E_i , 最后根据**杂质饱和电离区**的曲线形态判断其**散射机理**。

其中 K 为玻尔兹曼常数, $K=1.380 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$,

$$\lg e = 0.4343$$

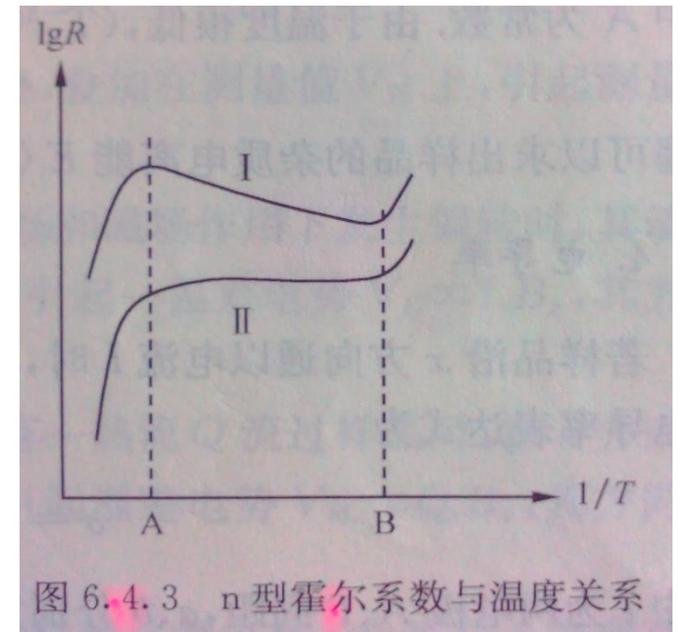


图 6.4.3 n型霍尔系数与温度关系

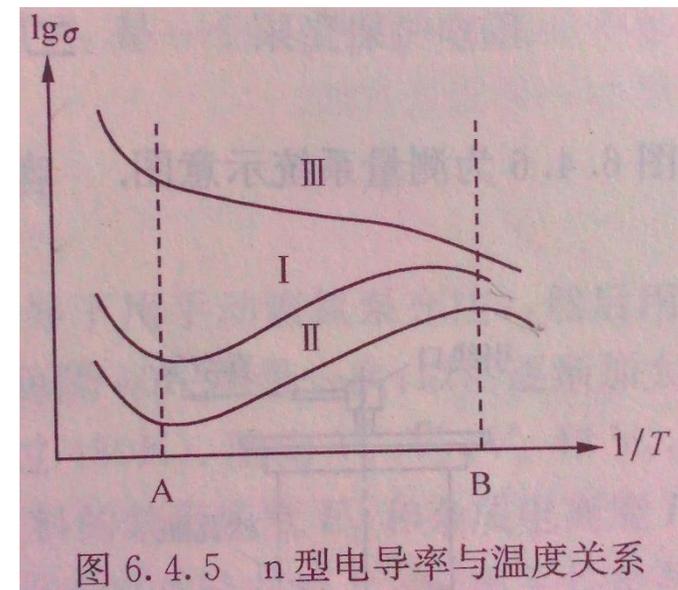


图 6.4.5 n型电导率与温度关系

计算结果的修正

由于载流子具有一定的速度分布，并且不断受到散射而改变运动速度。考虑上述因素，霍尔系数公式修正为

$$R_H = \left(\frac{\mu_H}{\mu_p}\right) \frac{1}{pq} \quad \text{和} \quad R_H = -\left(\frac{\mu_H}{\mu_n}\right) \frac{1}{nq}$$

其中 μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的电导迁移率，

修正项取值：

1. $=3\pi/8$ 对应以晶格散射为主的非简并样品，
2. $=1.93$ 对应以电离杂质散射为主的低阻样品，
3. $=1$ 对应高度简并情况的低阻样品。

消除热、磁负效应所引起的附加电势

在霍尔效应实验中，在电场和温度梯度同时存在情况下，外加磁场就会产生热磁负效应，产生附加电势，主要有如下几种：

- (1) 能斯脱效应：焦耳热导致的附加电势差 V_N 。
- (2) 爱廷豪森效应：电子在磁力和电场力作用下偏转释放热能产生的温差附加电势 V_E
- (3) 里纪-勒杜克效应：温度梯度场产生的温差附加电势 V_{RL} 。
- (4) 电极位置不对称产生的附加电压降差 V_0 。

为了消除热磁负效应所引起的附加电势，采用电流、磁场换向的测量方法：

$$V_1 (+B, +I), \quad V_2 (+B, -I), \quad V_3 (-B, -I), \quad V_4 (-B, +I)$$

$$V_H \cong \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$$

➤ <实验内容>

1. 测量室温下霍尔样品的霍尔电势 V_H 和电导电势 V_σ 为，判断样品的导电类型，计算室温下样品的载流子浓度 n ，电导率 σ ，迁移率 μ_H
2. 在 -195°C —— 100°C 范围内测量样品的变温曲线（ $\lg R_H - 1/T$ 和 $\lg \sigma - 1/T$ ），并根据曲线计算禁带宽度 E_g 和杂质电离能 E_i 。

➤ <思考题>

1. 如何确定样品的散射机理？
2. 如何确定样品的导电类型？
3. 在变温过程中，温度是如何对载流子产生影响，并从而影响霍尔效应的？
4. 这种测量方法是否可以用于不规则样品？