

实验十 霍尔效应

霍尔效应是导电材料中的电流与磁场相互作用而产生电动势的效应。

随着半导体材料和制造工艺的发展，人们利用半导体材料制成霍尔元件，由于它的霍尔效应显著而得到实用和发展，现在广泛用于非电量的测量、电动控制、电磁测量和计算装置方面。在电流体中的霍尔效应也是目前在研究中的“磁流体发电”的理论基础。近年来，霍尔效应实验不断有新发现。1980 年原西德物理学家冯·克利青研究二维电子气系统的输运特性，在低温和强磁场下发现了量子霍尔效应，这是凝聚态物理领域最重要的发现之一。目前对量子霍尔效应正在进行深入研究，并取得了重要应用，例如用于确定电阻的自然基准，可以极为精确地测量光谱精细结构常数等。

在磁场、磁路等磁现象的研究和应用中，霍尔效应及其元件是不可缺少的，利用它观测磁场直观、干扰小、灵敏度高、效果明显。

一、实验目的

- 1、掌握霍尔效应原理，理解霍尔元件有关参数的含义和作用
- 2、测定霍尔元件的 V_H-I_S ， V_H-I_M 曲线，了解霍尔电势差 V_H 与霍尔元件工作电流 I_S 、磁感应强度 B 及励磁电流 I_M 之间的关系。
- 3、学习利用霍尔效应测量磁感应强度 B 及磁场分布。
- 4、学习用“对称交换测量法”消除负效应产生的系统误差。
- 5、确定试样的导电类型、载流子浓度及迁移率。

二、实验仪器

霍尔效应实验仪

三、实验原理

如图 2-1 所示，磁场 B 位于 Z 的正向，与之垂直的半导体薄片（霍尔元件）上沿 X 正向通以电流 I_S （称为工作电流），假设载流子为电子（N 型半导体材料），它沿着与电流 I_S 相反的 X 负向运动。

由于洛伦兹力 f_L 作用，电子即向图中虚线箭头所指的位于 y 轴负方向的 B 侧偏转，并使 B 侧形成电子积累，而相对的 A 侧形成正电荷积累。与此同时运动的电子还受到由于两种积累的异种电荷

形成的反向电场力 f_E 的作用。随着电荷积累的增加， f_E 增大，当两力大小相等（方向相反）时， $f_L = -f_E$ ，则电子积累便达到动态平衡。这时在 A、B 两端面之间建立的电场称为霍尔电场 E_H ，相应的电势差称为霍尔电势 V_H 。

设电子按均一速度 $\bar{v}$ ，向图示的 X 负方向运动，在磁场 B 作用下，所受洛伦兹力为：

$$f_L = -e\bar{v}B$$

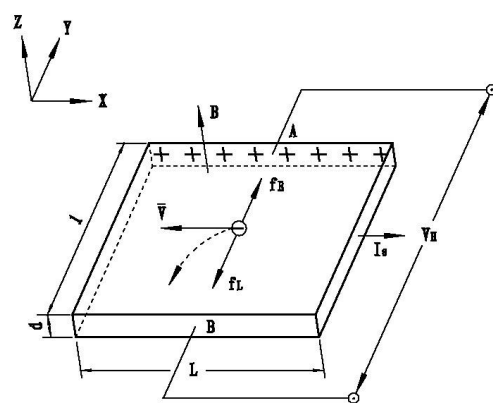


图 2-1

式中： e 为电子电量， $\bar{v}$ 为电子漂移平均速度， B 为磁感应强度。
同时，电场作用于电子的力为：

$$f_E = -eE_H = -eV_H / l$$

式中： E_H 为霍尔电场强度， V_H 为霍尔电势， l 为霍尔元件宽度
当达到动态平衡时：

$$f_L = -f_E \quad \bar{v} B = V_H / l \quad (1)$$

设霍尔元件宽度为 l ，厚度为 d ，载流子浓度为 n ，则霍尔元件的工作电流为

$$I_s = ne\bar{v}ld \quad (2)$$

由(1)、(2)两式可得：

$$V_H = E_H l = \frac{1}{ne} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (3)$$

即霍尔电压 V_H (A、B 间电压)与 I_s 、 B 的乘积成正比，与霍尔元件的厚度成反比，比例系数 $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数。

根据材料的电导率 $\sigma = ne\mu$ 的关系，还可以得到：

$$R_H = \mu / \sigma = \mu\rho \text{ 或 } \mu = |R_H|\sigma \quad (4)$$

式中： μ 为载流子的迁移率，即单位电场下载流子的运动速度，一般电子迁移率大于空穴迁移率，因此制作霍尔元件时大多采用 N 型半导体材料。

当霍尔元件的材料和厚度确定时，

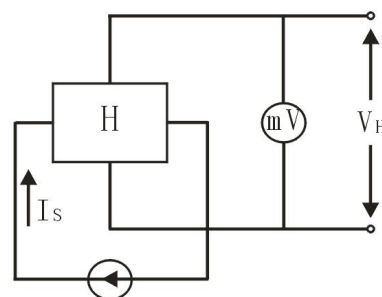
$$\text{设： } K_H = R_H / d = 1 / ned \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (3) 中得：

$$V_H = K_H I_s B \quad (6)$$

式中： K_H 称为元件的灵敏度，它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流下的霍尔电势大小，其单位是 $[mV / mA \cdot T]$ ，

一般要求 K_H 愈大愈好。霍尔元件测量磁场的基本电路（如图 2-2），将霍尔元件置于待测磁场的相应位置，并使元件平面与磁感应强度 B 垂直，在其控制端输入恒定的工作电流 I_s ，霍尔元件的霍尔电势输出端接毫伏表，测量霍尔电势 V_H 的值。



实验系统误差及其消除

测量霍尔电势 V_H 时，不可避免的会产生一些副效应，由此而产生的附加电势叠加在霍尔电势上，形成测量系统误差，这些副效应有：

(1) 不等位电势 V_0

由于制作时，两个霍尔电势不可能绝对对称的焊在霍尔片两侧（图 2-3a）、霍尔片电阻率不均匀、控制电流极的端面接触不良（图 2-3b）都可能造成 A、B 两极不处在同一等位面上，此时虽未加磁场，但 A、B 间存在电势差 V_0 ，此称不等位电势， $V_0 = I_s R_0$ ， R_0 是两等位面间的电阻，由此可见，在 R_0 确定的情况下，

V_0 与 I_s 的大小成正比，且其正负随 I_s 的方向而改变。

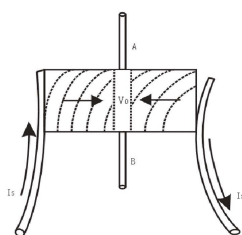


图 2-3a

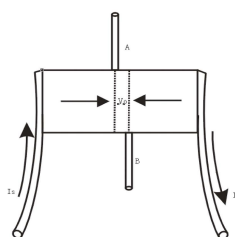


图 2-3b

(2) 爱廷豪森效应

当元件 x 方向通以工作电流 I_s ， z 方向加磁场 B 时，由于霍尔片内的载流子速度服从统计分布，有快有慢。在到达动态平衡时，在磁场的作用下慢速快速的载流子将在洛伦兹力和霍尔电场的共同作用下，沿 y 轴分别向相反的两侧偏转，这些载流子的动能将转化为热能，使两侧的温升不同，因而造成 y 方向上的两侧的温差 ($T_A - T_B$)。因为霍尔电极和元件两者材料不同，电极和元件之间形成温差电偶，这一温差在 A 、 B 间产生温差电动势 V_E ， $V_E \propto IB$ 。这一效应称爱廷豪森效应， V_E 的大小与正负符号与 I 、 B 的大小和方向有关，跟 V_H 与 I 、 B 的关系相同，所以不能在测量中消除。

(3) 伦斯脱效应

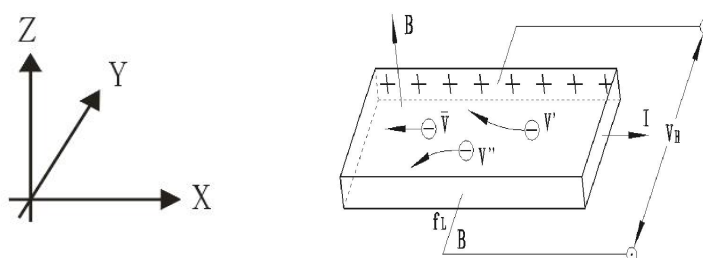


图 2-4 正电子运动平均速度 图中 $V' < \bar{V}$ $V'' > \bar{V}$

由于控制电流的两个电极与霍尔元件的接触电阻不同，控制电流在两电极处将产生不同的焦耳热，引起两电极间的温差电动势，此电动势又产生温差电流（称为热电流） Q ，热电流在磁场作用下将发生偏转，结果在 y 方向上产生附加的电势差 V_H ，且 $V_H \propto QB$ 这一效应称为伦斯脱效应，由上式可知 V_H 的符号只与 B 的方向有关。

(4) 里纪一杜勒克效应

如 (3) 所述霍尔元件在 x 方向有温度梯度 $\frac{dT}{dx}$ ，引起载流子沿梯度方向扩散而有热电流 Q 通过元件，在此过程中载流子受 z 方向的磁场 B 作用下，在 y 方向引起类似爱廷豪森效应的温差 $T_A - T_B$ ，由此产生的电势差 $V_H \propto QB$ ，其符号与 B 的方向有关，与 I_s 的方向无关。

为了减少和消除以上效应的附加电势差，利用这些附加电势差与霍尔元件工作电流 I_s ，磁场 B （即相应的励磁电流 I_M ）的关系，采用对称（交换）测量法进

行测量。

$$\begin{aligned}\text{当} +I_S, +I_M \text{ 时} \quad V_{AB1} &= +V_H + V_0 + V_E + V_N + V_R \\ \text{当} +I_S, -I_M \text{ 时} \quad V_{AB2} &= -V_H + V_0 - V_E + V_N + V_R \\ \text{当} -I_S, -I_M \text{ 时} \quad V_{AB3} &= +V_H - V_0 + V_E - V_N - V_R \\ \text{当} -I_S, +I_M \text{ 时} \quad V_{AB4} &= -V_H - V_0 - V_E - V_N - V_R\end{aligned}$$

对以上四式作如下运算则得：

$$\frac{1}{4} (V_{AB1} - V_{AB2} + V_{AB3} - V_{AB4}) = V_H + V_E$$

可见，除爱廷豪森效应以外的其他副效应产生的电势差会全部消除，因爱廷豪森效应所产生的电势差 V_E 的符号和霍尔电势 V_H 的符号，与 I_S 及 B 的方向关系相同，故无法消除，但在非大电流、非强磁场下， $V_H \gg V_E$ ，因而 V_E 可以忽略不计，由此可得：

$$V_H \approx V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (7)$$

四、实验方法与步骤

1、按仪器面板上的文字和符号提示将霍尔效应测试仪与霍尔效应实验仪正确连接。

2、测量霍尔元件的零位（不等位）电势 V_0 和不等位电阻 R_0

I. 用连接线将中间的霍尔电压输入端短接，调节调零旋钮使电压表显示 0.00mV；

II. 将 I_M 电流调节到最小

III. 调节霍尔工作电流 $I_S = 3.00\text{mA}$ ，利用 I_S 换向开关改变霍尔工作电流输入方向分别测出零位霍尔电压 V_{01} 、 V_{02} ，并计算不等位电阻：

$$R_{01} = \frac{V_{01}}{I_S}, R_{02} = \frac{V_{02}}{I_S} \quad (8)$$

3、测量霍尔电压 V_H 与工作电流 I_S 的关系

I、先将 I_S 、 I_M 都调零，调节中间的霍尔电压表，使其显示为 0mV。

II、将霍尔元件移至电磁铁中心，调节 $I_M = 500\text{mA}$ ，调节 $I_S = 0.5\text{mA}$ ，按表中 I_S 、 I_M 正负情况切换“实验架”上的方向，分别测量霍尔电压 V_H 值（ V_1 ， V_2 ， V_3 ， V_4 ）并填入表格。以后 I_S 每次递增 0.50mA，测量各 V_1 ， V_2 ， V_3 ， V_4 值。绘出 $I_S - V_H$ 曲线，验证线性关系。

4、测量霍尔电压 V_H 与励磁电流 I_M 的关系

I、先将 I_M 、 I_S 调零，调节 I_S 至 3.00mA。

II、调节 $I_M = 100$ 、150、200……500mA(间隔为 50mA)，分别测量霍尔电压 V_H 值并填入表格。

根据表 2 中所测得的数据，绘出 $I_M - V_H$ 曲线，验证线性关系的范围，分析当 I_M 达到一定值以后， $I_M - V_H$ 直线斜率变化的原因。

5、测量电磁铁中磁感应强度 B 的分布

I、先将 I_M 、 I_S 调零，调节中间的霍尔电压表，使其显示为 0mV。

II、将霍尔元件置于电磁铁中心，调节 $I_M=500\text{mA}$ ，调节 $I_S=3.00\text{mA}$ ，测量相应的 V_H 。

III、将霍尔元件从中心向边缘移动每隔 5mm 选一个点测出相应的 V_H ，并填入表格。

IV、由以上所测 V_H 值，依据公式： $V_H=K_H I_S B$

$$\text{得到: } B = \frac{V_H}{K_H I_S}$$

计算出各点的磁感应强度，并绘 $B-X$ 图，得出电磁铁中 B 的分布。

6、先将“ V_H 、 V_σ 输出”倒向 V_σ “功能切换”置 V_σ 。在零磁场下，取 $I_S=0.2\text{mA}$ ，测量 V_{AC} （即 V_σ ）。注意： I_S 取值不能大于 0.2mA

7、确定样品的导电类型。计算霍尔元件的霍尔灵敏度、载流子浓度 n ，电导率和迁移率。