

实验五 霍尔效应实验

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。1879年美国霍普金斯大学研究生霍尔在研究金属导电机理时发现了这种电磁现象，故称霍尔效应。后来曾有人利用霍尔效应制成测量磁场的磁传感器，但因金属的霍尔效应太弱而未能得到实际应用。随着半导体材料和制造工艺的发展，人们又利用半导体材料制成霍尔元件，由于它的霍尔效应显著、结构简单、形小体轻、无触点、频带宽、动态特性好、寿命长，因而被广泛应用于自动化技术、检测技术、传感器技术及信息处理等方面。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。

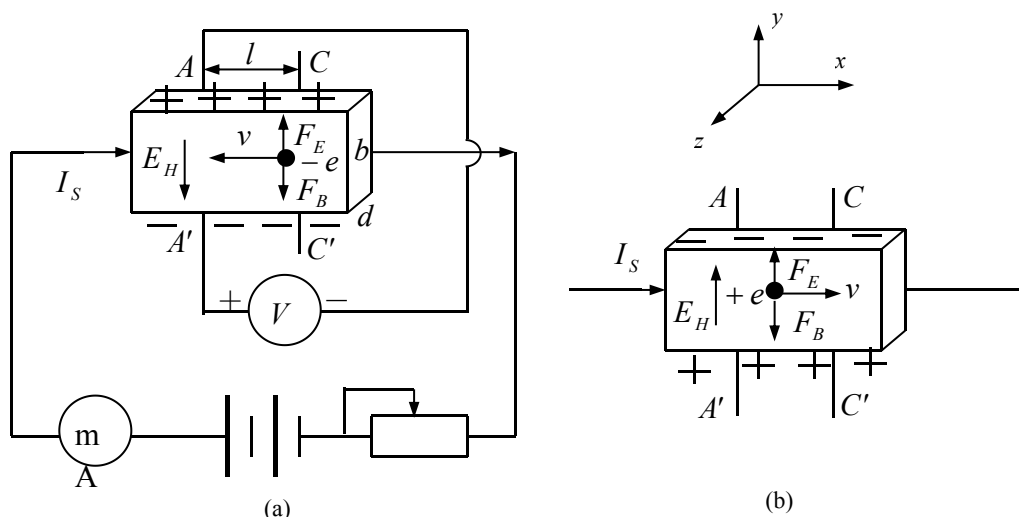
在磁场、磁路等磁现象的研究和应用中，霍尔效应及其元件是不可缺少的，利用它观测磁场直观、干扰小、灵敏度高、效果明显。霍尔效应也是研究半导体性能的基本方法，通过霍尔效应实验所测定的霍尔系数，能够判断半导体材料的导电类型，载流子浓度及载流子迁移率等重要参数。

【实验原理】

1. 霍尔效应：霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力作用而引起的偏转。当带电粒子（电子或空穴）被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直电流和磁场方向上产生正负电荷的聚积，从而形成附加的横向电场，即霍尔电场 E_H 。如图 24-1 所示的半导体试样，若在 x 方向通以电流 I_s ，在 z 方向加磁场 B ，则在 y 方向即试样 A-A' 电极两侧就开始聚集异号电荷而产生相应的附加电场。电场的指向取决于试样的导电类型。对图 24-1 (a) 所示的 N 型试样，霍尔电场逆 y 方向，(b) 的 P 型试样则沿 y 方向。即有：

$$E_H(Y) < 0 \Rightarrow (\text{N型})$$

$$E_H(Y) > 0 \Rightarrow (\text{P型})$$



(a) 载流子为电子 (N 型) (b) 载流子为空穴 (P 型)

图 1 霍尔效应实验原理示意图

显然，霍尔电场 E_H 是阻止载流子继续向侧面偏移，当载流子所受的横向电场力 eE_H 与洛伦兹力 $e\bar{v}B$ 相等，样品两侧电荷的积累就达到动态平衡，故有：

$$eE_H = e\bar{v}B \quad (1)$$

其中 E_H 为霍尔电场， \bar{v} 是载流子在电流方向上的平均漂移速度。

设试样的宽为 b ，厚度为 d ，载流子浓度为 n ，则：

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

由 (1)、(2) 两式可得：

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

即霍尔电压 V_H (A、A' 电极之间的电压) 与 $I_s B$ 乘积成正比与试样厚度 d 成反比。

比例系数 $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数，它是反映材料霍尔效应强弱的重要参数。只要测出 V_H (V)

以及知道 I_s (A)、 B (特斯拉 T) 和 d (cm) 可按下式计算 R_H (cm³/c)：

$$R_H = \frac{V_H d}{I_s B} \times 10^4 \quad (4)$$

上式中的 10^4 是由于磁感应强度 B 用电磁单位 (T)。

2. 霍尔系数 R_H 与其它参数间的关系

根据 R_H 可进一步确定以下参数：

(1) 由 R_H 的符号 (或霍尔电压的正负) 判断样品的导电类型。判别的方法是按图 1 所示的 I_s 和 B 的方向, 若测得的 $V_H = V_{AA'} < 0$, 即点 A 点电位高于点 A' 的电位, 则 R_H 为负, 样品属 N 型; 反之则为 P 型。

(2) 由 R_H 求载流子浓度 n 。即 $n = \frac{1}{|R_H|e}$ 。应该指出, 这个关系式是假定所有载流子都具有相同的漂移速度得到的, 严格一点, 如果考虑载流子的速度统计分布, 需引入 $\frac{3\pi}{8}$ 的修正因子 (可参阅黄昆、谢希德著《半导体物理学》)。

(3) 结合电导率的测量, 求载流子的迁移率 μ 。电导率 σ 与载流子浓度 n 以及迁移率 μ 之间有如下关系:

$$\sigma = ne\mu \quad (5)$$

即 $\mu = |R_H| \sigma$, 测出 σ 值即可求 μ 。

3. 霍尔效应与材料性能的关系

根据上述可知, 要得到大的霍尔电压, 关键是要选择霍尔系数大 (即迁移率高、电阻率 ρ 亦较高) 的材料。因 $|R_H| = \mu\rho$, 就金属导体而言, μ 和 ρ 均很低, 而不良导体 ρ 虽高, 但 μ 极小, 因而上述两种材料的霍尔系数都很小, 不能用来制造霍尔器件。半导体 μ 高, ρ 适中, 是制造霍尔元件较理想的材料, 由于电子的迁移率比空穴迁移率大, 所以霍尔元件多采用 N 型材料, 其次霍尔电压的大小与材料的厚度成反比, 因此薄膜型的霍尔元件的输出电压较片状要高得多。就霍尔器件而言, 其厚度是一定的, 所以实用上采用 $K_H = \frac{1}{ned}$ 来表示器件的灵敏度, K_H 称为霍尔灵敏度, 单位为 $\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ 或 $(\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{kGs}))$ 。

2. 伴随霍尔效应出现的几个副效应及其消除方法, 在研究固体导电过程中, 继霍尔效应之后又相继发现了爱廷好森 (Etinghausen) 效应、能期脱 (Nernst) 效应 VN、里纪-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应 VRL, 这些都属于热磁效应。现分别介绍如下:

(1) 爱廷好森效应电压

1887 年爱廷好森发现, 由于载流子速度不同, 在磁场的作用下所受洛仑兹力不相等, 快速载流子受力大而能量高, 慢速载流子受力小而能量低, 因此导致霍尔元件的一端较为另一端温度高而形成温度梯度场, 从而出现一个温差电压。爱廷好森效应产生的电压的大小与电流 I 、磁感应强度 B 的大小成正比, 方向与 V_H 一致。因此它在实验中无法消去, 但的值致般较小, 由它带来的误差约为 5% 左右。

(2) 能斯脱效应电压

由于电流输入输出两引线端焊点处的电阻不可能完全相等,因此,通电后会产生不同的势效应,使 x 方向产生温度梯度。电子将从热端扩散到冷端,扩散电子在磁场的作用下在横向形成电场,从而产生电压。的正负与磁场 B 有关,与电流 I 无关。

(3) 黑纪-勒杜克效应电压

由能斯脱效应引起的扩散电流中的载流子速度不一样,类似于爱廷好森效应,也将在 y 方向产生温度梯度场,导致产生一附加电压,的正负与磁感应强度 B 有关,与电流 I 无关。

(4) 不等势电位差

不等势电位差是由于霍尔元件的材料无身不均匀,以及电压输出端引线 P、S 在制作时不可能绝对对称焊接在霍尔片的两侧所引起的。见图 14-2。这时即使不加磁场(只通电流),也不存在。若元件制作不好,有可能与有着相同的数量级,因此不等势电位差是影响霍尔电压的一种最大的副效应。的正负只与电流有关,与磁感应强度 B 无关。

值得注意的是,在产生霍耳效应的同时,因伴随着各种副效应,以致实验测得的 A、

A' 两极间的电压并不等于真实的霍耳电压 V_H 值,而是包含着各种副效应所引起的附加电压,因此必须设法消除。根据副效应产生的机理可知,采用电流和磁场换向的对称测量法,基本上能把副效应的影响从测量结果中消除。即在规定了电流和磁场正、反方向后,分别测量由下列四组不同方向的 I_S 和 B 组合的 $V_{A'A}$ (A'、A 两点的电位差)即:

$$+B, +I_S \quad V_{A'A} = V_1$$

$$-B, +I_S \quad V_{A'A} = V_2$$

$$-B, -I_S \quad V_{A'A} = V_3$$

$$+B, -I_S \quad V_{A'A} = V_4$$

然后求 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 的代数平均值。

$$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (6)$$

通过上述的测量方法,虽然还不能消除所有的副效应,但其引入的误差不大,可以略而不计。

【实验内容】

1. 掌握仪器性能,连接测试仪与实验仪之间的各组连线

(1) 开、关机前,测试仪的“ I_S 调节”和“ I_M 调节”旋钮均置零位(即逆时针旋转到底)。

(2) 按照要求连接测试仪与实验仪之间各组连线。

2. 测绘 VH-IS 曲线

将测试仪的“功能切换”置 V_H ，IS 及 I_M 换向开关掷向上方，表明 IS 及 I_M 均为正值（即 IS 沿 x 方向， I_M 沿 y 方向）。反之，则为负。保持 I_M 值不变（取 $I_M = 0.600\text{ A}$ ），改变 I_S 的值，IS 取值范围为 $1.00 \sim 4.00\text{ mA}$ 。

3. 测绘 VH-IM 曲线

保持 IS 值不变（取 $I_S = 3.00\text{ mA}$ ），改变 I_M 的值， I_M 取值范围为 $0.300 \sim 0.800\text{ A}$ 。

4. 测量 V_σ 值

“ $V_H V_\sigma$ 输出”拨向 V_σ 侧，“功能切换”置 V_σ 。在零磁场下（ $I_M = 0$ ），取 $I_S = 2.00\text{ mA}$ ，测量 VAC（即 V_σ ）。注意： I_S 取值不要大于 2 mA ，以免 V_σ 过大使毫伏表超量程（此时首位数码显示为 1，后三位数码熄灭）。 V_H 和 V_σ 通过功能切换开关由同一只数字电压表进行测量。电压表零位可通过调零电位器进行调整。当显示器的数字前出现“—”时，被测电压极性为负值。

5. 确定样品导电类型

将实验仪三组双刀开关均掷向上方，即 I_S 沿 x 向， B 沿 z 方向，毫伏表测量电压为 V_{AA} 。取 $I_S = 2.00\text{ mA}$ ， $I_M = 0.600\text{ A}$ ，测量 V_{AA} 大小及极性，由此判断样品导电类型。

6. 求样品的 R_H 、 n 、 σ 和 μ 值

7. (选做) 测单边水平方向磁场分布（ $I_S = 2.00\text{ mA}$ ， $I_M = 0.600\text{ A}$ ）

【思考题】

- 1、什么叫做霍尔效应？为什么霍尔效应在半导体中特别显著？
- 2、如何测定霍尔灵敏度？
- 3、如已知存在一个干扰磁场，如何采用合理的测试方法，尽量减小干扰磁场对测量结果的影响。
- 4、怎样确定载流子电荷的正负？
- 5、如何判断磁场 B 的方向与霍尔片的法线是否一致？它对实验有何影响？