

实验 34 霍尔效应及其应用

霍尔效应是一种磁电效应。在匀强磁场中放一金属薄板，使板面与磁场方向垂直，当沿垂直磁场方向给金属板通以电流时，在垂直电流和磁场方向的金属板两侧会产生一附加横向电场。这一现象是霍尔(Hall,A.H.1855-1938)于 1879 年发现的，因此被称为霍尔效应。后来发现半导体、导电流体等也有这种现象。而半导体的霍尔效应比金属强得多。霍尔效应不仅是测定半导体材料电学参数的主要手段，而且利用霍尔效应原理将半导体制成磁敏器件被广泛应用于非电量测量、自动控制和信息处理等方面。流体中的霍尔效应已成为研究“磁流发电”的理论基础。

【预习重点】

- (1) 霍尔效应及其测磁场的原理。
- (2) 确定霍尔系数及样品导电类型的方法。
- (3) “对称测量法”消除副效应的方法。
- (4) 霍尔效应实验仪、特斯拉计的使用方法。

【实验目的】

- (1) 了解霍尔效应原理
- (2) 学习用霍尔效应测磁场的方法

【实验仪器】

霍尔效应实验仪、特斯拉计、霍尔磁场测试仪、亥姆霍兹线圈。

【实验原理】

1) 霍尔效应

霍尔效应从本质上来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的方向上产生正负电荷的聚积，从而形成附加的横向电场。对于图 34-1 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' 电极两侧就开始聚积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。显然，该电场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 与洛伦兹力相等时，样品两侧电荷的积累就达到平衡，故有

$$eE_H = e\bar{v}B \quad (34-1)$$

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。设试样的宽度为 b ，厚度为 d ，载流子浓度为 n ，则

$$I_s = ne\bar{v}bd \quad (34-2)$$

由式 (34-1) 和式 (34-2) 可得：

$$U_H = E_H b = \frac{1}{ne} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (34-3)$$

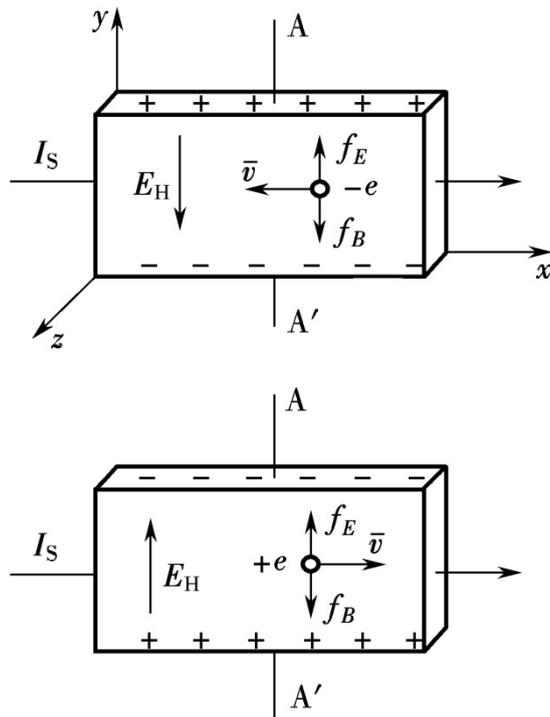


图 34-1 霍尔效应

U_H (A、A' 电极之间的电压) 即霍尔电压, $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数, 是反映材料霍尔效应强弱的重要参数。只要测出 $U_H(V)$ 、 $B(T)$ 以及知道 $I_S(A)$ 和 $d(cm)$, 可按下式计算 $R_H(m^3/C)$:

$$R_H = \frac{U_H d}{I_S B} \quad (34-4)$$

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 34-1 所示的 I_S 和 B 的方向 (即测量中的 $+I_S$, $+B$), 若测得的 $U_H < 0$ (即 A' 的电位低于 A 的电位), 则 R_H 为负, 样品属 N 型, 反之为 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。
- (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:

$$\sigma = ne\mu \quad (34-5)$$

即 $\mu = |R_H|\sigma$, 测出 σ 值即可求 μ 。

2) 霍尔效应中的副效应及其消除方法

上述推导是从理想情况出发的, 实际情况要复杂得多。产生上述霍尔效应的同时还伴随产生 4 种副效应, 使 U_H 的测量产生系统误差, 为便于说明, 画一简图如图 34-2 所示。

- (1) 厄廷好森 (Etinghausen) 效应引起的电势差 U_E 。由于电子实际上并非以同一速度 v 沿 y 轴负向运动，速度大的电子回转半径大，能较快地到达接点 3 的侧面，从而导致 3 侧面

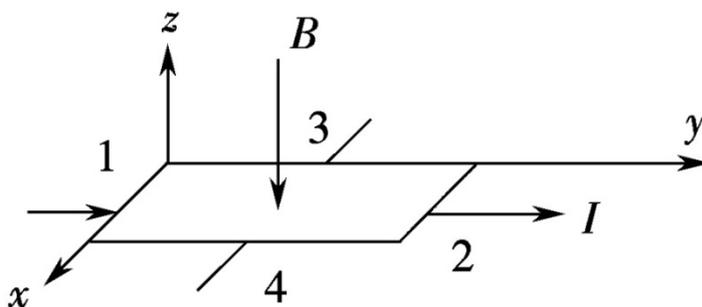


图 34-2 在磁场中的霍尔元件

较 4 侧面集中较多能量高的电子，结果 3、4 侧面出现温差，产生温差电动势 U_E 。可以证明 $U_E \propto I$, $U_E \propto B$ ，容易理解 U_E 的正负与 I 和 B 的方向有关。

- (2) 能斯特 (Nernst) 效应引起的电势差 U_N 。焊点 1、2 间接触电阻可能不同，通电发热程度不同，故 1、2 两点间温度可能不同，于是引起热扩散电流。与霍尔效应类似，该热扩散电流也会在 3、4 点间形成电势差 U_N 。若只考虑接触电阻的差异，则 U_N 的方向仅与 B 的方向有关。
- (3) 里纪-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应产生的电势差 U_R 。上述热扩散电流的载流子由于速度不同，根据厄廷好森效应同样的理由，又会在 3、4 点间形成温差电动势 U_R 。 U_R 的正负仅与 B 的方向有关，而与 I 的方向无关。
- (4) 不等电势效应引起的电势差 U_0 。由于制造上的困难及材料的不均匀性，3、4 两点实际上不可能在同一条等势线上。因而只要有电流，即使没有磁场 B ，3、4 两点间也会出现电势差 U_0 。 U_0 的正负只与电流 I 的方向有关，而与 B 的方向无关。

综上所述，在确定的磁场 B 和电流 I_s 下，实际测出的电压是霍尔效应电压与副效应产生的附加电压的代数和。人们可以通过对称测量方法，即改变 I_s 和磁场 B 的方向加以消除和减小副效应的影响。在规定了电流 I_s 和磁场 B 正、反方向后，可以测量出由下列四组不同方向的 I_s 和 B 组合的电压。即：

$$\begin{aligned} +B, +I_s: U_1 &= U_H + U_E + U_N + U_R + U_0 \\ +B, -I_s: U_2 &= -U_H - U_E + U_N - U_R - U_0 \\ -B, -I_s: U_3 &= U_H + U_E - U_N - U_R - U_0 \\ +B, +I_s: U_4 &= -U_H - U_E - U_N + U_R + U_0 \end{aligned}$$

然后求 U_1, U_2, U_3, U_4 的代数平均值得：

$$U_H = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 + U_3 - U_4) - U_E$$

通过上述测量方法，虽然不能消除所有的副效应，但考虑到 U_E 较小，引入的误差不大，可以忽略不计，因此霍尔效应电压 U_H 可近似为

$$U_H = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 + U_3 - U_4) \quad (34-6)$$

3) 载流圆线圈的磁场

一半径为 R 通过电流 I 的圆线圈，轴线上磁场分布公式为：

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (34-7)$$

式中 N_0 为圆线圈的匝数， x 为轴上某一点到圆心 O' 的距离。 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。它的分布如图 34-3 所示

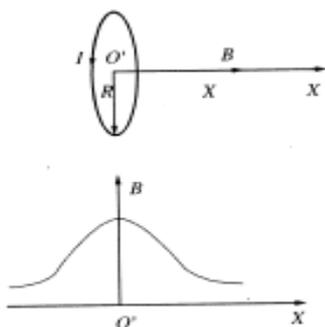


图 34-3 载流圆线圈磁场分布

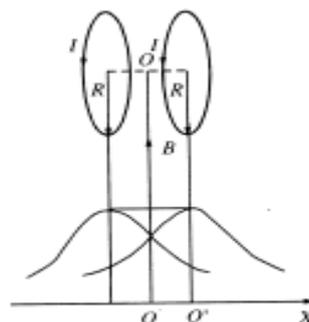


图 34-4 亥姆霍兹线圈的磁场分布

4) 亥姆霍兹线圈轴线上的磁场

两个相同圆线圈彼此平行且共轴，通以同方向电流 I ，理论计算证明：线圈间距 a 等于线圈半径 R 时，两线圈合磁场在轴上（两线圈圆心连线）附近较大范围内是均匀的，这样的一对线圈称为亥姆霍兹线圈。如图 34-4 所示。在中心位置 O 点，磁场强度为

$$B = \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{\mu_0 N I}{R} \quad (34-8)$$

【实验内容及要求】

1) 实验准备

- (1) 接通测试仪电源，预热 10 分钟后，将此时电流表显示“0.000”。
- (2) 测试仪的“ I_S 输出”接实验仪的“ I_S 输入”；“ I_M 输出”接“ I_M 输入”，并将 I_S 及 I_M 换向开关掷向背离实验者的一侧。
- (3) 接通电源，预热数分钟后，电流表显示“0.000”（当按下测量选择键时）或“0.000”（当放开测量选择键时）。

2) 测量

- (1) 测绘 $U_H \sim I_S$ 曲线。顺时针转动“ I_M 调节”旋钮，取 $I_M = 0.900 \text{A}$ ，保持不变，依次 I_S 取值为 $0.300, 0.600, \dots, 1.800 \text{mA}$ ，采用对称测量法，即改变 I_S 和 B 的方向。记录相应的 U_H 值，填入数据表 1。描绘 $U_H \sim I_S$ 曲线验证 U_H 与 I_S 成正比。
- (2) 测绘 $U_H \sim I_M$ 曲线。取 $I_S = 1.800 \text{mA}$ ，保持不变， I_M 依次取值为 $0.300, 0.400, \dots, 0.800 \text{A}$ 。记录相应的 U_H 值，填入数据表 2。描绘 $U_H \sim I_M$ 曲线，验证 U_H 与 I_M 成正比。
- (3) 用特斯拉计测磁场。取 $I_S = 1.800 \text{mA}$ ， $I_M = 0.300 \text{A}, 0.400 \text{A}, 0.500 \text{A}, 0.600 \text{A}, 0.700 \text{A}, 0.800 \text{A}$ ，测量相应的 B 值，填入数据表 3。
- (4) 用式 (34-4) 计算霍尔系数 R_H ，并由 R_H 的正负判断样品的导电类型。
- (5) 用霍尔元件测量载流圆线圈轴线上各点磁感应强度。将线圈连接于磁场测试仪上，先按要求将导线连接好，电流 I 调节为 400mA ，利用霍尔元件开始测量线圈中心轴线上各点的磁感应强度 B ，将测量数据填入数据表 4 中。并描绘 $B \sim x$ 曲线。

(6) 亥姆霍兹线圈轴线上磁场分布测量: 将亥姆霍兹线圈接于磁场测试仪上, 参数与(5)相同。按表 5 指针读数要求改变霍尔元件测量位置, 将测量数据填于表 5 中, 描绘 $B \sim X$ 曲线并说明其特点。

数据表 1 $I_m = 0.900A$

I_S/mA	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4}/mV$
	$+B, +I_S$	$+B, -I_S$	$-B, -I_S$	$-B, +I_S$	
0.300					
0.600					
0.900					
1.200					
1.500					
1.800					

数据表 2 $I_S = 1.800mA$

I_M/A	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4}/mV$	$R_H = \frac{U_H d}{I_S B}$ m^{-2}/C^+
	$+B, +I_S$	$+B, -I_S$	$-B, -I_S$	$-B, +I_S$		
0.300						
0.400						
0.500						
0.600						
0.700						
0.800						

数据表 3 $I_S = 1.800mA$

I_M/A	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800
B/mT					

数据表 4 $N_0 = 400$ 匝, $I = 0.400\text{A}$, $R = 0.100\text{m}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

指针读数 (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
轴向距离 x (cm)	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
磁感应强度 B (μT)									
$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$ (T)									
相对误差									
指针读数 (cm)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
轴向距离 x (cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
磁感应强度 B (μT)									
$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$ (T)									
相对误差									

数据表 5 亥姆霍兹线圈轴线上磁场分布数据记录 (坐标原点: 5cm 处)

指针读数 (cm)	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
轴向距离 x (cm)	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2
磁感应强度 B (μT)									
指针读数 (cm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12
轴向距离 x (cm)	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
磁感应强度 B (μT)									
指针读数 (cm)	13	14	15						
轴向距离 x (cm)	8	9	10						
磁感应强度 B (μT)									

【拓展与设计】

用霍尔传感器测量硅钢片的磁化曲线和磁滞回线。