

预习    操作记录		实验报告    总评成绩	

《大学物理实验》课程实验报告

专业：实验人姓名：学号：

参加人姓名：

日期：        年    月    日        室温：相对湿度：

实验 5    霍尔效应测量磁场

[ 实验前思考题 ]

1. 如何计算载流子的浓度、迁移率？为什么常利用半导体而非金属导体材料的霍尔效应？
2. 为什么对称测量法可以提高测定霍尔电压的准确性？试举出该测量思路在其他场景中的应用实例

3. 写出螺线管轴线上任意点磁感应强度的计算公式。

[ 实验目的 ]

1. 了解霍尔效应的实验原理，掌握用“对称法”测样品的霍尔系数；
2. 测量样品的霍尔电压和工作电流关系曲线，并确定样品的导电类型、载流子浓度以及迁移率；
3. 了解用霍尔效应测量磁场的原理和方法，并用霍尔器件测亥姆霍兹线圈和长直螺线管的磁场分布。

[ 仪器用具 ]

编号	仪器名称	数量	主要参数（型号，测量范围，精度）
1	霍尔效应测试仪		
2	霍尔效应实验仪		
3	螺线管磁场实验仪		
4	导线		

[ 原理概述 ]

1. 霍尔效应

置于磁场中的半导体，如果电流方向与磁场垂直，则在垂直于电流和磁场的方向上会产生一个附加的横向电场，这个现象称为霍尔效应。

如图 1(a)所示的 N 型（电子导电， $-e$ ）半导体，若在 X 方向通电流  $I_s$ ，在 Z 方向加磁感应强度为  $B$  的磁场，则样品中平均漂移速度为  $\bar{v}$  的载流子将受到洛伦兹力

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

的作用向  $(-Y)$  方向偏转，在 A 面不断积累并在 A、A' 面之间产生附加的横向电场  $E_H$ （或横向电压  $V_H$ ），即霍尔电场（或霍尔电压）。对于 N 型半导体， $E_H$  沿  $(-Y)$  方向；对于 P 型半导体， $E_H$  沿  $Y$  方向。 $E_H$  将阻止载流子继续向侧面偏移，当载流子所受的横向电场力  $F_E (= eE_H)$  与洛伦兹力  $F_B$  相等时，A、A' 面电荷的积累就达到平衡，有

$$eE_H = e\bar{v}B \quad (2)$$

设样品的宽度为  $b$ ，厚度为  $d$ ，载流子的浓度为  $n$ ，则

$$I_s = ne\bar{v}bd \quad (3)$$

由式 (2) 和 (3) 可得 A、A' 面之间的霍尔电压  $V_H$  为

$$V_H = E_H b = \frac{1}{ne} \cdot \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (4)$$

可见，霍尔电压  $V_H$  与  $I_s B$  的乘积成正比，与样品的厚度  $d$  成反比。比例系数

$$R_H = 1/(ne) = V_H d / (I_s B) \quad (5)$$

称为霍尔系数，它是反映样品霍尔效应强弱的重要参数。只要测出  $V_H$ 、 $I_s$ 、 $d$  和  $B$  等宏观量，就可算出样品的霍尔系数  $R_H$ ，以及载流子浓度  $n$ 、平均漂移速度  $\bar{v}$  等微观量。

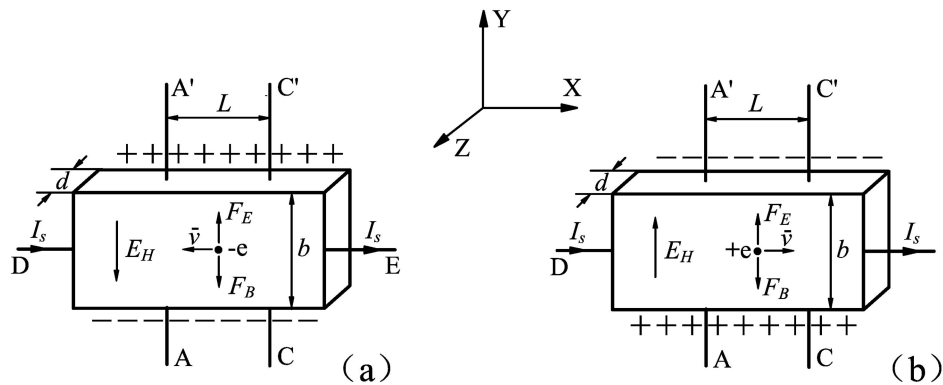


图 1 霍尔效应原理图

若以图 1 所示的  $I_s$  和  $B$  的方向为正向，则由式 (4) 求得的  $R_H$  为负值时 ( $V_H = V_{AA'} < 0$ )，样品是 N 型导电，反之则为 P 型。

要注意的是，式 (4 和 5) 中令  $R_H = 1/(ne)$ ，是假定所有的载流子都具有相同的漂移速度，严格来说，考虑到载流子的速度统计分布，需引入  $(3\pi/8)$  的修正因子，则

$$n = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{|R_H|e} \quad (6)$$

进一步还可计算样品的电导率  $\sigma$  与载流子的迁移率  $\mu$ ,

$$\sigma = \frac{I_s L}{V_\sigma S} = ne\mu, \quad \mu = \sigma / ne = |R_H| \sigma \quad (7)$$

其中  $\sigma$  可通过图 1 所示的 A、C (或 A'、C') 电极进行测量。设 A、C 间距离为  $L$ , 样品的横截面积为  $S = bd$ , 流经样品的电流为  $I_s$ , 在零磁场情况下 ( $B = 0$ ), 若测得 A、C 间的电位差为  $V_\sigma$ , 则

$$\sigma = I_s L / (V_\sigma S) \quad (8)$$

式 (8) 等号右边的量均为易测的宏观量。

## 2. “对称法”测霍尔电压 $V_H$

由于霍尔电压  $V_H$  的数值较小, mV 量级, 故伴随霍尔效应而出现的多种副效应, 包括温差电效应  $V_E$ 、不等势电压  $V_\sigma$ 、热磁效应  $V_N$ 、热磁效应产生的温差效应  $V_{RL}$  等, 都会对  $V_H$  的测量造成影响。后三种可采用“对称测量法”加以消除, 第一种虽不能消除, 但由于数值较小, 可忽略不计。测量时保持  $I_s$  和  $B$  的大小不变, 设定  $I_s$  和  $B$  的正、反方向后, 依次测量下列四组不同方向的  $I_s$ 、 $B$  组合对应的 AA' 电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ , 即

$+I_s$	$+B$	$V_1$
$+I_s$	$-B$	$V_2$
$-I_s$	$-B$	$V_3$
$-I_s$	$+B$	$V_4$

然后求上述四组数据  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$  的代数平均值, 就可得到霍尔电压

$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 + V_3 - V_4) \quad (9)$$

## 3. 用霍尔器件测量通电长直螺线管轴向上的磁感应强度

霍尔器件是利用霍尔效应制成的电磁转换元件, 对于成品霍尔器件, 其霍尔系数  $R_H$  和霍尔片的厚度  $d$  是已知的, 故式 (4) 可写成

$$V_H = K_H I_s B \quad (10)$$

其中  $K_H = R_H / d$  为霍尔器件的灵敏度 (其值由厂家给出), 它表示该器件在单位工作电流和单位磁感应强度下产生的霍尔电压。可见, 只要测出  $V_H$ , 就可求得磁感应强度

$$B = V_H / (K_H I_s) \quad (11)$$

长直螺线管是由绕在圆柱面上的导线构成的，如图 2，对于一个有限长度的密绕螺线管，在轴线上的中心点处磁感应强度最大，

$$B_0 = \mu_0 N I_M \quad (12)$$

其中 $\mu_0$ 为真空磁导率， $N$ 为螺线管单位长度的线圈匝数， $I_M$ 为线圈中的励磁电流。端点处的磁感应强度为中点处的 1/2，且端点附近的磁场不均匀。

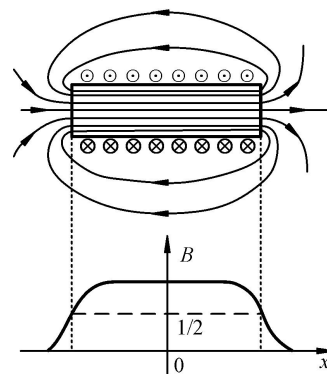


图 2 螺线管磁场分布图

#### 4. 实验仪器面板图

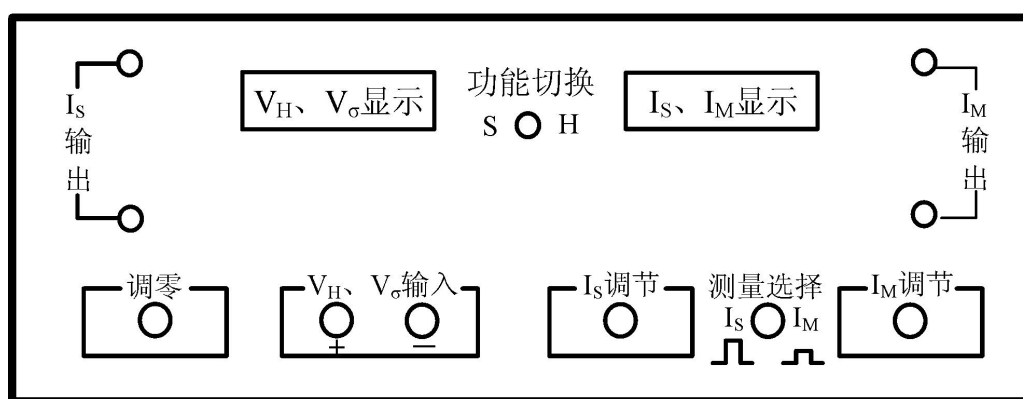


图 3 霍尔效应测试仪面板图

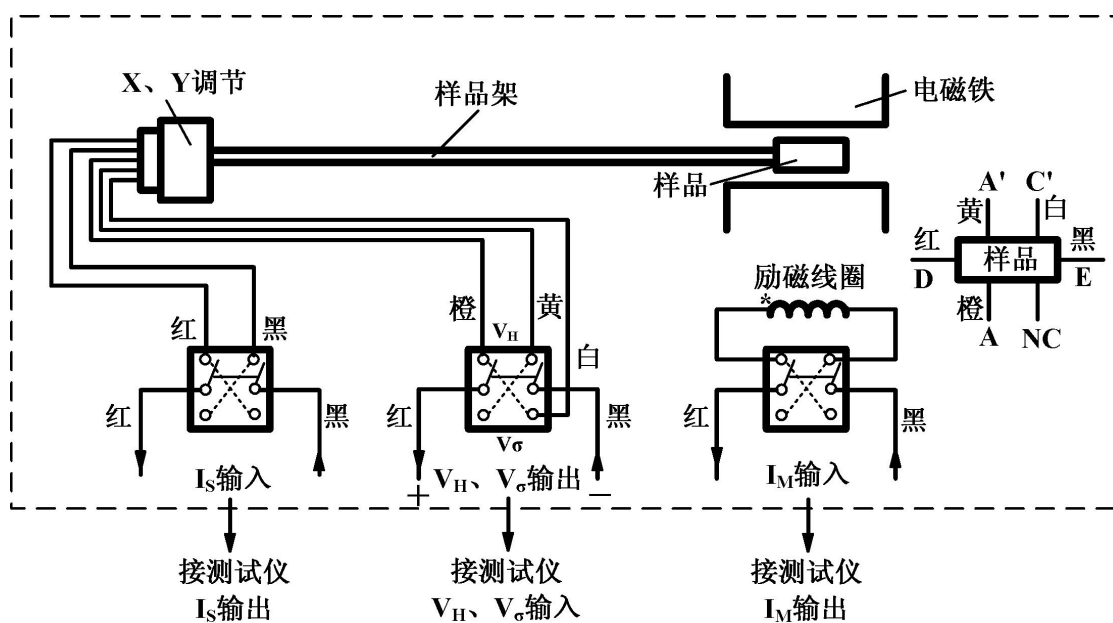


图 4 霍尔效应实验仪面板图

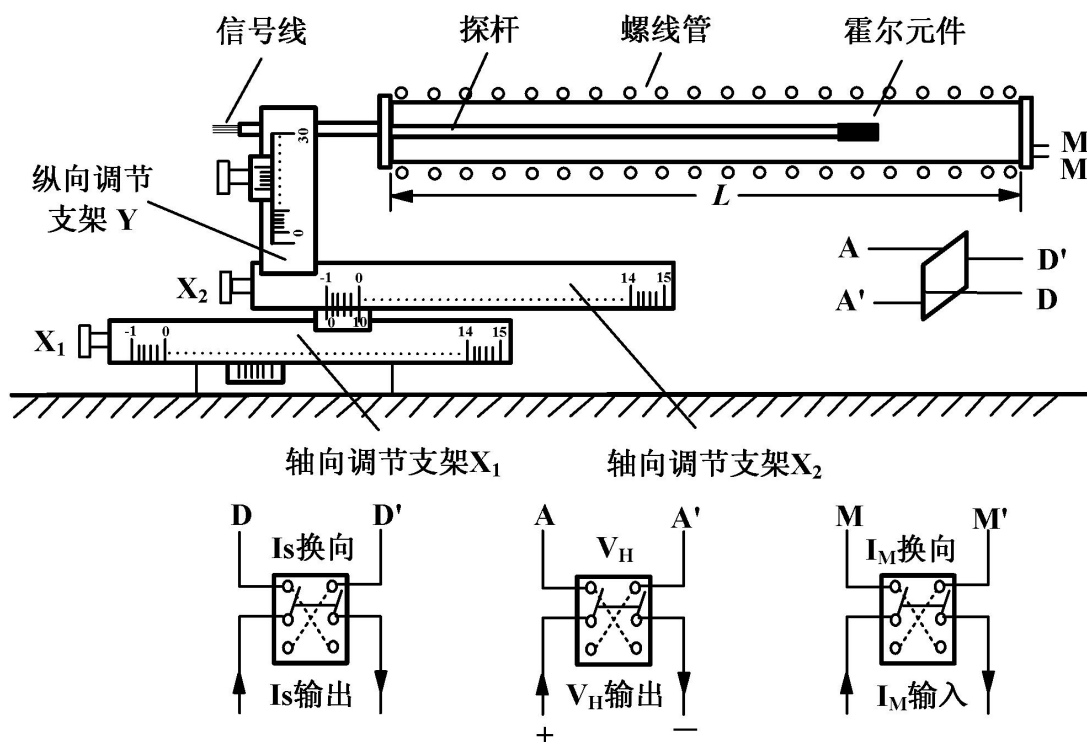


图 5 螺线管磁场实验仪面板图

### [ 安全注意事项 ]

1. **关机连线。**为了防止接错线烧坏霍尔元件，接线前，要关掉“测试仪”的电源；接好线后要反复检查接线是否正确，经教师检查允许，方可接通电源开始实验。

**警告：**严禁将测试仪的励磁电流“ $I_M$  输出”误接到实验仪的“ $I_S$  输入”或“ $V_H$  输出”端口，否则一旦通电，就算测试仪  $I_M$  显示为 0，霍尔元件也可能损坏！

2. **零电流开机。**通电前必须保证测试仪的“ $I_S$  调节”和“ $I_M$  调节”旋钮均置零位（即逆时针旋到底），**严禁**霍尔元件工作电流  $I_S$  未调到零就开机，冲击电流极易损坏霍尔元件。

**注意：**线路未连接好， $I_S$  和  $I_M$  未形成通路时，不论“ $I_S$  调节”和“ $I_M$  调节”旋钮旋到什么位置， $I_S$  和  $I_M$  均显示为“0.00”、 $V_H$  显示“1.”（超量程）。

3. **测量前调零：**测量前需将测试仪的“ $I_S$  调节”和“ $I_M$  调节”旋钮按逆时针方向旋到底，开机预热 15 分钟以上，调节面板上的“调零”电位器使  $V_H$  显示为“0.00”。更换测量仪器后需要重新调零。

## [ 实验内容及步骤 ]

### 1. 测绘 $|V_H|—I_s$ 曲线

- (1) 采用霍尔效应测试仪和霍尔效应实验仪，连线后将测试仪“功能切换”开关置“H”，实验仪的“ $V_H$ 、 $V_\sigma$ ”切换开关置  $V_H$ ，调“ $I_M$  调节”使  $I_M = 0.50A$ 。
- (2) 调“ $I_s$  调节”旋钮，改变  $I_s$ ，在 0—5.00mA 范围内每隔 1mA 用“对称测量法”测出相应的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ ，并计算  $V_H$ 。
- (3) 作  $|V_H|—I_s$  关系曲线，用最小二乘法拟合，说明两者关系。

### 2. 测绘 $|V_H|—I_M$ 曲线

- (1) 调  $I_s = 3.00mA$  并保持不变，调“ $I_M$  调节”旋钮改变  $I_M$ ，在 0—0.50A 范围内每隔 0.1A 用“对称测量法”测出相应的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ ，计算  $V_H$ 。
- (2) 作  $|V_H|—I_M$  关系曲线，用最小二乘法拟合，说明两者关系。
- (3) 选  $I_M = 0.30 A$  的数据，计算样品的霍尔系数  $R_H$ ，载流子浓度  $n$ ，并判断样品的导电类型。

### 3. 测量 $V_\sigma$ 值 (选做,有部分设备无法做该内容)

将实验仪的“ $V_H$ 、 $V_\sigma$ ”切换开关置  $V_\sigma$ ，在零磁场 ( $I_M = 0$ ) 时，取  $I_s = 0.20 mA$ ，测对应的  $V_\sigma$ ，由  $V_\sigma$  和  $R_H$ ，计算样品的电导率  $\sigma$  和载流子的迁移率  $\mu$ 。

### 4. 测绘螺线管轴线上磁感应强度分布

- (1) 采用霍尔效应测试仪和螺线管磁场实验仪，连线后将测试仪“功能切换”开关置“S”，重新“调零”。取  $I_s = 3.00mA$ ， $I_M = 0.500A$ ，并保持不变。
- (2) 调测距尺读数旋钮  $x_1$  和  $x_2$ ，使  $x_1=x_2=0.0cm$ 。调  $x_1$  和  $x_2$  旋钮改变霍尔元件的位置，每隔 0.5cm，用“对称测量法”测出各位置对应的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ ，计算  $V_H$  和  $B$  值。

**注意：** $x=0$  时霍尔元件约在螺线管外 20mm 处， $x=110.0mm$  时元件约在管的中心处。每台设备都不一样，具体数值需学生根据实验设备自行确定。

- (3) 作  $|B|—x$  关系曲线，作图时需作坐标变换使中心点为原点。验证螺线管端口处的磁感应强度为中心处的 1/2。
- (4) 根据实验室提供的螺线管参数，计算螺线管中心处磁感应强度的理论值  $B_0$ ，并与实验值比较，计算相对误差。

## [ 实验数据记录 ]

### 1. 测绘 $|V_H| - I_s$ 曲线

$$I_M = \underline{\hspace{2cm}},$$

Is、B 方向	+Is、+B	+Is、-B	-Is、-B	-Is、+B	$V_H / \text{mV}$
$I_s / \text{mA}$	$V_1 / \text{mV}$	$V_2 / \text{mV}$	$V_3 / \text{mV}$	$V_4 / \text{mV}$	
0.00					
0.50					
1.00					
1.50					
2.00					
2.50					

$$\text{其中: } V_H = (V_1 - V_2 + V_3 - V_4) / 4$$

### 2. 测绘 $|V_H| - I_M$ 曲线

$$I_s = \underline{\hspace{2cm}},$$

Is、B 方向	+Is、+B	+Is、-B	-Is、-B	-Is、+B	$V_H / \text{mV}$
$I_M / \text{A}$	$V_1 / \text{mV}$	$V_2 / \text{mV}$	$V_3 / \text{mV}$	$V_4 / \text{mV}$	
0					
0.10					
0.20					
0.30					
0.40					
0.50					

$$\text{其中: } V_H = (V_1 - V_2 + V_3 - V_4) / 4$$

### 3. 测量 $V_\sigma$ 值

$$I_s = \underline{\hspace{2cm}}, \quad V_\sigma = \underline{\hspace{2cm}}.$$

### 4. 测绘螺线管轴线上磁感应强度分布

螺线管参数:



[illegible]

**[ 数据处理和讨论 ]**

1. 作  $|V_H| - I_s$  关系曲线，并用最小二乘法拟合求直线的截距和斜率，说明两者的关系。（注意：处理数据时  $I_s = 0$  的数据也是一个实验点，不能缺漏）。
2. 作  $|V_H| - I_M$  关系曲线，并用最小二乘法拟合求直线的截距和斜率，说明两者的关系。（**注意：**处理数据时  $I_M = 0$  的数据也是一个实验点，不能缺漏）。
3. 选  $I_M = 0.25A$  的数据，计算样品的霍尔系数  $R_H$  和载流子浓度  $n$ ，判断导电类型。
4. 根据  $V_\sigma$  值，计算样品的电导率  $\sigma$  和载流子迁移率  $\mu$ 。
5. 作  $|B| \sim x$  关系曲线，说明两者关系。验证测量的准确性（将端点与中点的数据比较，中点的实验值与理论值比较，计算相对误差）。

**数据作图与分析应清晰易读，格式工整，鼓励电脑作图**

**[ 实验后思考题 ]**

1. 若磁感应强度的方向与霍尔元件的平面不完全正交，计算出的  $B$  值比实际值大还是小？
2. 若沿被测磁场方向有一个恒定的附加外磁场，测量时如何消除该磁场的影响？
3. 如何利用霍尔效应测量交变磁场？试写出测试方法。