

## 实验 3-16:霍尔效应

德国物理学家霍尔 1879 年发现霍尔效应之后，由于这种效应对一般材料来讲很不明显，因而长期未得到实际应用。20 世纪 60 年代以来，人们先后发现或制成了 N 型锗、锑化铟、磷砷化铟等霍尔系数很高的半导体材料，以此制成了灵敏度很高的霍尔元件。用霍尔元件制成的特斯拉计测量范围可从 10T 的强磁场到  $10^{-7}$ T 的弱磁场；既可以测量大范围的均匀磁场，也可测不均匀场或某点的磁场；既可以测稳定磁场，也可以测脉冲磁场或交变磁场。此外霍尔元件还广泛应用于非电量测量、自动控制和信息处理等方面。霍尔元件的主要用途有以下几方面：

- (1) 测量磁场；
- (2) 测量直流或交流电路中的电流强度和功率；
- (3) 转换信号，如把直流电流转换成交流电流并对它进行调制，放大直流或交流信号等；
- (4) 对各种物理量(应先设法转换成电流信号)进行四则或乘方、开方运算。霍尔元件具有结构简单而牢靠、使用方便、成本低廉等优点，所以它在实际中将得到越来越普遍的应用。用霍尔元件测磁场的方法非常简便，缺点是半导体霍尔元件的温度系数一般都较大，不经温度校准误差较大。

### 实验目的:

1. 理解霍尔效应的物理意义及有关霍尔器件对材料的要求。
2. 学习用“对称测量法”消除负效应的影响,测量试样的  $V_H-I_S$  和

$V_H-I_M$  的关系.

3. 确定试样的导电类型,载流子浓度以及迁移率
4. 学会测室温下的霍尔系数和磁感应强度

### 实验仪器

霍尔效应实验仪、霍尔效应测试仪、导线等



### 实验原理

#### 1. 霍尔效应的原理

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的方向产生正负电荷的聚积，从而形成附加的横向电场。

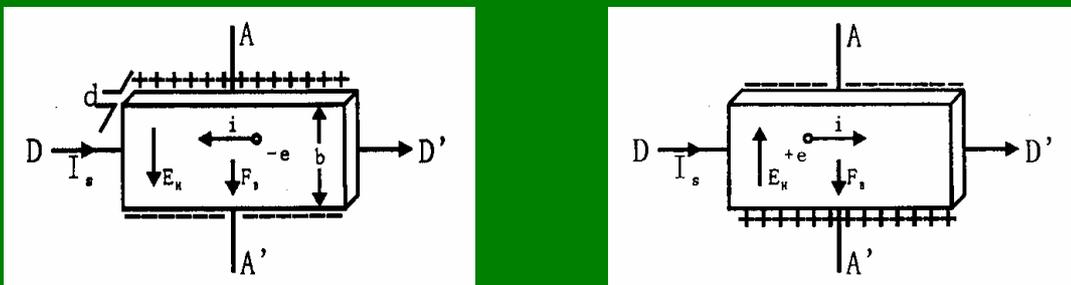


图 1

对于图 1 所示的半导体试样，若在 X 方向通以电流  $I_s$ ，在 Z 方向（垂直于纸面）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  $eE_H$  与洛伦兹力  $e\bar{v}B$  相等时，样品两侧电荷的积累就达到平衡，此时有：

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

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  $n$ ，电流可表示为：

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

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) 与乘积  $I_S B$  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，它是反映材料的霍尔效应强弱的重要参数。

霍尔器件就是利用上述霍尔效应制成的电磁转换元件，对于成品的霍尔器件，其  $R_H$  和  $d$  已知，因此在实用上就将 (3) 式写成

$$V_H = K_H I_S B \quad (4)$$

其中  $K_H = \frac{R_H}{d}$ ，称为霍尔器件的灵敏度（其值由制造厂家给出），它表示该器件在单位工作电流和单位磁感应强度输出的霍尔电压。(4) 式中的单位取  $I_S$  为 mA、 $B$  为 KGS， $V_H$  为 mV，则  $K_H$  的单位为 mV(mA·KGS)。根据 (4) 式，因  $K_H$  已知，而  $I_S$  由实验给出，所以只要测出  $V_H$  就可以求得未知磁感应强度  $B$

$$B = \frac{V_H}{K_H I_S} \quad (5)$$

应该说明，在产生霍尔效应的同时，因伴随着多种副效应，以致实验测得的  $A$ 、 $A'$  两电极之间的电压并不等于真实的  $V_H$  值，而是包含着各种副效应引起的附加电压，因此必须设法清除。根据副效应的产生机理可知，采用电流和磁场换向的对称测量法，基本上能够把副效应的影响从测量的结果中消除，具体做法是保持  $I_S$  和  $B$ （即  $I_M$ ）的大小不变，并在设定电流和磁场的正、反方向后，依次测量由下列四组不同方向的  $I_S$  和  $B$  组合的  $A$ 、 $A'$  两点之间的电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$  即：

$+I_S$	$+B$	$V_1$
$+I_S$	$-B$	$V_2$

$-I_s$	$+B$	$V_3$
$-I_s$	$-B$	$V_4$

然后求出这四组数据  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$  的代数平均值，即：

$$V_H = \frac{1}{4}(V_1 - V_2 + V_3 - V_4) \quad (6)$$

通过对称测量法求得  $V_H$ ，虽然还存在个别无法消除的副效应，但其引入的误差甚小，可略去不计。(5) (6) 两式就是本实验用来测量磁感应强度的依据。

## 2. 载流长直螺线管内的磁感应强度

螺线管是由绕在圆柱面上的导线构成的，对于密绕的螺线管，可以看成是一列有共同轴线的圆形的并排组合，因此一个截流长直螺线管轴线上某点的磁感应强度，可以从对各圆形电流在轴线上该点所产生的磁感应强度进行积分得到，对于一有限长的螺线管，在距离两端等远的中心点，磁感应强度为最大，且等于

$$B_0 = \mu_0 NI_M \quad (7)$$

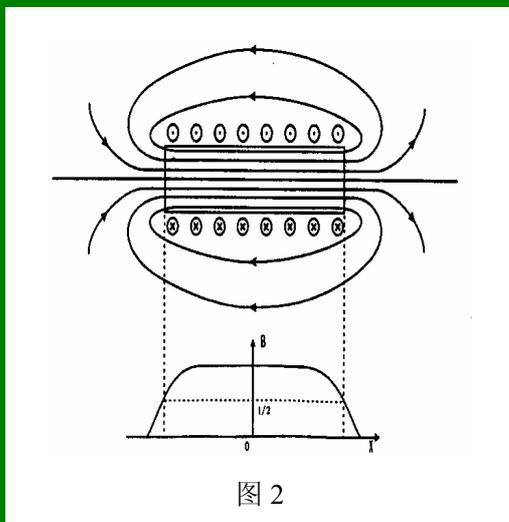


图 2

其中  $\mu_0$  为真空的磁导率， $N$  为螺线管单位长度的线圈匝数， $I_M$  为线圈的励磁电流。

由图 2 所示的长直螺线管的磁力线分布可知，其内腔中部磁力线是平行于轴线的直线系，渐近两端口时，这些直线变为从两端口离散的曲线，说明内部的磁场是均匀的，仅在靠近两端口时，才呈现明显的不均匀性，根据理论计算，长直螺线管一端的磁感应强度为内腔中部磁感应强度的  $1/2$ 。

## 实验内容

### 一、必做内容：

### 1. 霍尔器件输出特性测量

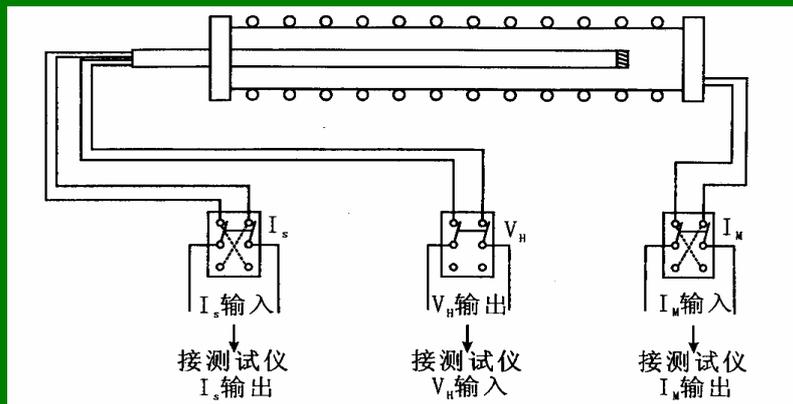


图 3

(1) 按图 3 连接测试仪和实验仪之间相对应的  $I_S$ 、 $V_H$  和  $I_M$  各组连线，并经教师检查后方可开启测试仪的电源。

(2) 将测试仪的“ $I_S$  调节”和“ $I_M$  调节”旋钮均置于零位（即逆时针旋到底）

(3) 开启测试仪电源，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）；电压表显示也应为“0.00”，若不为零，可调节“调零”电位器。

(4) 缓慢细心地转动霍尔器件探杆支架的旋钮  $X_1$ 、 $X_2$ ，将霍尔器件移到螺线管的中心位置，即让  $X_1=14.00\text{cm}$ ， $X_2=0.00\text{cm}$ 。

(5) 测绘  $V_H-I_S$  曲线

取  $I_M=0.45\text{A}$  ( $I_M$  可取范围 0—1A)，测试过程中保持不变。依次按表 1 所列数据调节  $I_S$ ，用对称测量法测出相应的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ ，记入表 1，绘制  $V_H-I_S$  曲线。

(6) 测绘  $V_H-I_M$  曲线

取  $I_S=5\text{mA}$  ( $I_S$  的可取范围为 0—10mA)，测试过程中保持不变。依次按表 2 所列数据调节  $I_M$ ，用对称测量法测出相应的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ ，记入表 2。

表 1  $I_M=0.450\text{A}$

$I_S$	$V_1(\text{mv})$	$V_2(\text{mv})$	$V_3(\text{mv})$	$V_4(\text{mv})$	$V_H = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4  V_i (\text{mv})$
(mA)	+ $I_S$ 、+B	+ $I_S$ 、-B	- $I_S$ 、-B	- $I_S$ 、+B	
1.00					
1.50					
2.00					

2.50					
3.50					
4.00					
4.50					

表 2  $I_S=6.00\text{mA}$

$I_M(\text{A})$	$V_1(\text{mA})$	$V_2(\text{mA})$	$V_3(\text{mA})$	$V_4(\text{mA})$	$V_H = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4  V_i (\text{mV})$
	+ $I_S$ 、+B	+ $I_S$ 、-B	- $I_S$ 、-B	- $I_S$ 、+B	
0.100					
0.150					
0.200					
0.2500					
0.300					
0.350					
0.400					
0.450					

(7) 在零磁场下(即  $I_M=0$ ),取  $I_S=0.1\text{mA}$ ,测量  $V_{AC}$ (即  $V_\sigma$ )。注意:  $I_S$  的取值不用大于  $0.1\text{mA}$ ,否则  $V_{AC}$  将超过毫伏表的量程。

(8) 确定样品的导电类型,并求霍尔系数  $R_H$ , 载流子浓度  $n$ , 电导率  $\sigma$ , 迁移率  $\mu$

## 二、选做内容

### 1. 测绘螺线管轴线上磁感应强度的分布

取  $I_S=6.00\text{mA}$ ,  $I_M=0.450\text{A}$  测试过程中保持不变, 调节旋钮  $X_1$ 、 $X_2$  使霍尔元件由螺线管的一端移到另一端, 取 17 个点, 用对称测量法测出相应的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$ , 求出它们的代数平均值  $V_H$ , 自拟表格记录数据, 利用式 (5) 求出磁感应强度  $B$ , 并填入表中。绘制螺线管内磁场分布曲线, 即  $B-X$  曲线。由式 (7) 计算螺线管中点

磁感应强度的理论值，与实验值进行比较，求出相对误差。

2.在理想情况下霍尔元件的灵敏度  $K_H$  是常数，实际上它随温度而改变。试设计一个实验，考察  $K_H$  随温度而变的关系。提示：利用式 (5)，磁感应强度  $B$  可以理论计算。

#### 思考题：

1. 用霍尔器件测量磁感应强度与用探测线圈相比有何优点？用霍尔器件能否测量交流磁场？
2. 在磁场测量过程中是否一定要保持电流  $I_S$  不变？为什么？
3. 根据霍尔系数与载流子浓度的关系，试回答，金属为何不宜制作霍尔元件？
4. 试判断，在其他条件一样时，温度提高， $V_H$  是变大还是变小？由你判断的结果，设想霍尔元件还可有什么用途？
5. 利用霍尔元件可以读取磁带或磁盘记录的信息，试说明其原理。
6. 利用霍尔元件可制成罗盘指示方向，试说明其原理。

#### 附录 1: 注意事项

1. 决不允许将测试仪的励磁电源“ $I_M$  输出”误接到实验仪的“ $I_S$  输入”或“ $V_H$  输出”处，否则一旦通电，霍尔器件即遭损坏！另外“ $V_H$  输出”开关应始终保持闭合状态。
2. 当  $X_1=0$ ,  $X_2=0$  时，霍尔探头在螺线管最右端，若想使之移住左端，为调节顺手，应先调节处于下端的  $X_1$  旋钮，使  $X_1$  从  $0.00 \rightarrow 14.00\text{cm}$ ，再调节  $X_2$  旋钮，使  $X_2$  从  $0.00 \rightarrow 14.00\text{cm}$ 。反之要使探头从螺线管左端移至右端，应先调节  $X_2$  旋钮，使  $X_2$  从  $14.00\text{cm} \rightarrow 0.00$ ，再调节  $X_1$ ，使  $X_1$  从  $14.00\text{cm} \rightarrow 0.00$
3. 霍尔灵敏度  $K_H$ ，以及螺线管单位长度线圈匝数  $N$  均标在实验仪上。
4. 由式 (7) 算出的理论值单位为特斯拉， $1\text{T}$  (特斯拉) =  $10\text{KGS}$  (千高斯)。
5. 由于在电磁铁边缘处磁场变化显著，因此，在霍尔元件进入和离开磁场的过程中，应该适当减小实验数据点的间隔，多测几组数据

以体现磁场的变化情况；当霍尔元件在矩形磁场内部时，由于处在匀强磁场中，因此，数据基本不发生变化。

6. 电流和磁场的正负：闸刀向上合时，电流和磁场的为正。
7. 测量  $A$ 、 $C$  间的电位差  $V_{\sigma}$  时，中间闸刀要向下合。
8. 注意纪录线圈的磁场系数。
9.  $I_s$  和  $I_M$  的读数时，要注意对应的按钮开关。
10. 为减少热磁流效应引起的误差，测  $V_H-I_M$  曲线时在测完  $I_M=1\text{mA}$  时断开仪器冷却几分钟，同时在实验过程尽可能减少长时间通电流。

## 附录 2: 实验线路接线动画演示

## 附录 3:: 实验中的各种负效应

在测量半导体材料样品的霍尔效应时，在测量霍尔电压  $V_H$  的同时，不可避免的会产生一些附加效应。这些附加效应与样品的制备工艺有关，在测量过程中产生一些热现象。

**热电现象：** 由于样品两端产生不等量焦耳热，这样有热量  $Q$  流过样品， $Q$  的流动方向与电流  $I$  的方向无关。

**温差电现象：** 若在样品两侧的温度不同，则在测量  $V_H$  的  $AB$ (或  $CD$ ) 之间将产生温差电动势，温差不大时，该温差电动势的大小和温度差成正比。

通过电流样品在磁场的作用下产生的负效应有：

1. 不等位面电势差效应：在制作样品电极时，很难做到电极 AB(或 CD)做到同一等位面上。这样样品通过电流时，即使不加磁场，在 AB 间也会产生电位差  $V_I$ 。它与电流 I 方向有关而与磁场方向无关。
2. 厄庭好森 (E t i n g h a u s e n) 效应：由于样品的载流子的速度的不均匀，在洛伦磁力和霍尔电场力的共同作用下，较快的和较慢的电阻将取不同的路径穿过样品，这意味着样品的一侧将比另一侧疏运来较多的能力，因而将建立起一个横向的温度差。这温度差产生沿 y 方向的附加温差电动势  $V_E$ 。其大小与 IB 成正比，而  $V_H$  的正负与 I 和 B 的方向有关。
3. 能斯特 (N e r n s t) 效应：由于样品两电极的接触电阻不可能做的完全相同，样品在 X 方向的热流 Q 和 Z 方向的磁场 B 的作用下，在 y 方向产生电位差  $V_N$ ， $V_N$  与 Q 和 B 成正比，符号与磁场 B 的方向有关，和电流 I 的方向无关。
4. 里纪-勒杜克 (R i g h i - L e d u c) 效应：样品在 x 方向的热流 Q 和 z 方向的磁场 B 的作用下，除在 y 方向产生电动势  $V_N$  外，在 y 方向还产生温度差，其温度差产生温差电动势  $V_R$ ， $V_R$  正比于 Q 和 B，其符号与 B 的方向有关，和 I 的方向无关。

以上 4 个负效应产生的附加电势差都沿  $y$  方向。所以都叠加到霍尔电势差  $V_H$ 。有时 4 个附加效应的代数和甚至大于霍尔电动势  $V_H$  的值。由于这些负效应都与  $B$  或  $I$  的方向有关，故通过改变  $B$  和  $I$  的方向可以消除 95% 的负效应。方法是：

$$\text{当 } +B+I \text{ 时: } V_1 = V_H + V_E + V_N + V_R + V_I \quad ;$$

$$\text{当 } +B-I \text{ 时: } V_2 = -V_H - V_E + V_N + V_R - V_I$$

$$\text{当 } -B-I \text{ 时: } V_3 = V_H + V_E - V_N - V_R - V_I$$

$$\text{当 } -B+I \text{ 时: } V_4 = -V_H - V_E - V_N - V_R + V_I$$

$$\text{则, } (V_1 - V_2 + V_3 - V_4) / 4 = V_H + V_E \approx V_H$$

#### 附录 4: 疑难解答

##### 1, 霍尔电压是怎样形成的?

答：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，正负电荷之间的电位差即为霍尔电压

##### 2...何观察不等位效应？如何消除它？

答：这是由于测量霍尔电压的电极  $A$  和  $A'$  位置难以做到在一个理想的等势面上，因此当有电流通过时，即使不加磁场，也会产生附加的电压  $V_0 = I_s r$ ，其中  $r$  为  $A$ 、 $A'$  所在的两个等势面之间的电阻。 $V_0$  的符号只与电流的方向有关，与磁场的方向无关，因

此，可以通过改变的方向予以消除。

### 3...测量过程中哪些量要保持不变？为什么？

答：实验中要求选定某些供电电流恒定外，还要保持霍尔片与供磁线圈的相对位置不变。位置与磁场强度有关。电流  $I_S$  和位置的变化都会使霍尔电压发生改变。

### 4...换向开关的作用原理是什么？测量霍尔电压时为什么要接换向开关？

答：改变磁场的方向或改变霍尔电流的方向，目的：消除不等势电压，消除热磁效应直接引起的附加电压，消除热磁效应产生的温差引起的附加电压

### 5...可否用交流电源给霍尔片供电？为什么？

答：霍尔电流的改变会引起霍尔电压方向的改变，如使用交流电源，测量到的霍尔电压也是交流电压，这样无法判断载流子的种类。

### 6...实验过程中导线均接好,开关合上,但 $V_H$ 无示数, $I_S$ 和 $I_M$ 示数正常,为什么？

答： $V_H$  组的导线可能接触不良或已断； $V_H$  的开关可能接触不良；可能仪器的显示问题

### 7. 利用对称法测量霍尔电压时，改变或方向，霍尔电压的符号不变的原因？

答：可能由于霍尔元件的四根连线连接错误而导致霍尔元件烧坏；也可能导线未接在中间的接线柱上，导致开关不能改变方

向。

8. 结果误差偏大的原因？

答：长时间通电流使得霍尔元件性能有影响； 刻度尺下的小游标的位置可能被移动等。

### 附录 5:实际应用示例

1.手持式高斯计

2. 502 型霍尔效应位移操纵杆



附录 6: 霍尔元器件对应的磁场范围

