

# 霍耳效应

## 【实验目的】

1. 在恒定直流磁场中测量砷化镓霍耳元件霍耳电压与霍耳电流的关系；
2. 霍耳电流恒定时测量砷化镓霍耳元件在直流磁场下的灵敏度并判断其类型。

## 【实验原理】

### 1. 霍耳效应

霍耳电势差是这样产生的：当电流  $I_H$  通过霍耳元件（假设为 P 型）时，空穴有一定的漂移速度  $v$ ，垂直磁场对运动电荷产生一个洛伦兹力。

$$\vec{F}_B = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

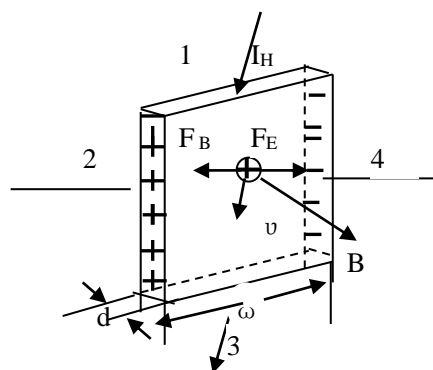


图 1 霍耳效应简图

式中  $q$  为电子电荷，洛伦兹力使电荷产生横向的偏转，由于样品有边界，所以有些偏转的载流子将在边界积累起来，产生一个横向电场  $E$ ，直到电场对载流子的作用力  $F_E = qE$  磁场作用的洛伦兹力相抵消为止，即

$$q (\vec{v} \times \vec{B}) = q \vec{E} \quad (2)$$

这时电荷在样品中流动时将不再偏转，霍耳电势差就是由这个电场建立起来的。

如果是  $N$  型样品，则横向电场与前者相反，所以  $N$  型样品和  $P$  型样品的霍耳电势差有不同的符号，据此可以判断霍耳元件的导电类型。

设  $P$  型样品的载流子浓度为  $p$ ，宽度为  $\omega$ ，厚度为  $d$ ，通过样品电流  $I_H = pqv\omega d$ ，则空穴的速度

$$v = \frac{I_H}{pq\omega d} \text{ 代入 (2) 式有}$$

$$E = |\vec{v} \times \vec{B}| = I_H B / pq\omega d \quad (3)$$

上式两边各乘以  $\omega$ ，便得到

$$U_H = E\omega = \frac{I_H B}{pqd} = R_H \times I_H \cdot \frac{B}{d} \quad (4)$$

$R_H = \frac{1}{pq}$  称为霍耳系数，在应用中一般写成

$$U_H = I_H K_H B \quad (5)$$

比例系数  $K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{pqd}$  称为霍耳元件灵敏度，单位为  $mV/(mA \cdot T)$ ，一般要求  $K_H$  愈大愈好。 $K_H$  与载流子浓度  $p$  成反比，半导体内载流子浓度远比金属载流子浓度小，所以都用半导体材料作为霍耳元件。 $K_H$  与厚度  $d$  成反比，所以霍耳元件都做得很薄，一般只有  $0.2mm$  厚。

由公式 (5) 可以看出，知道了霍耳片的灵敏度  $K_H$ ，只要分别测出霍耳电流  $I_H$  及霍耳电势差  $U_H$  就可算出磁场  $B$  的大小，这就是霍耳效应测磁场的原理。

## 2. 用霍耳元件测磁场

磁感应强度的计量方法很多，如磁通法、核磁共振法及霍耳效应法等。其中霍耳效应法具有能测交直流磁场，简便、直观、快速等优点，应用最广。

如图 2 所示。直流可调电源  $E_1$  为电磁铁提供励磁电流  $I_M$ 。电源  $E_2$  通过为霍耳元件提供霍耳电流  $I_H$ ，当  $E_2$  电源为直流时，可用一已知阻值的电阻取样其电压来测量霍耳电流，用数字电压表测量霍耳电压。

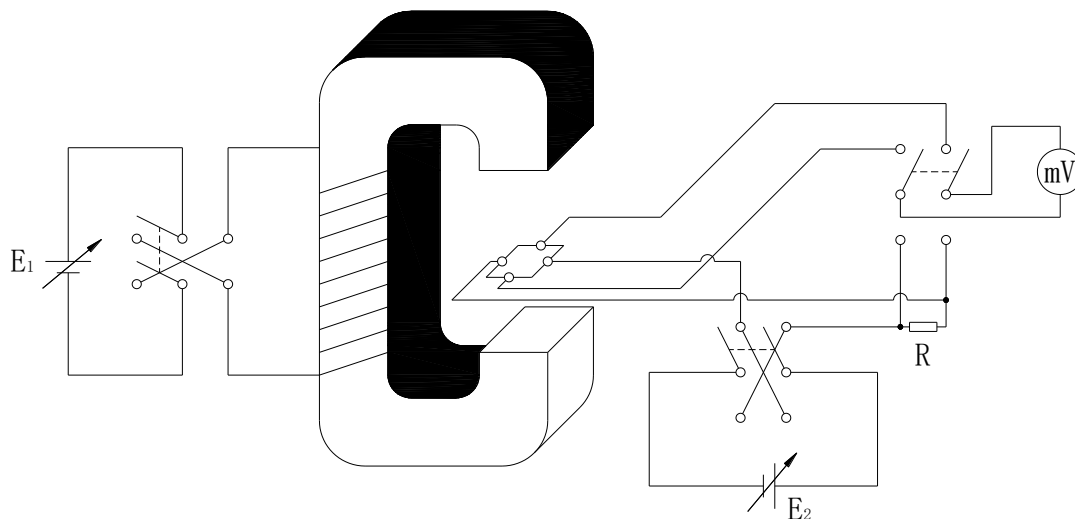


图 2 测量霍耳电势差电路

半导体材料有  $N$  型（电子型）和  $P$  型（空穴型）两种，前者载流子为电子，带负电；后者载流子为空穴，相当于带正电的粒子。由图 1 可以看出，若载流子为电子则 4 点电位高于 2 点电位， $U_{H2,4} < 0$ ；若载流子为空穴则 4 点电位低于 2 点电位，电位  $U_{H2,4} > 0$ ，如果知道载流子类型则可以根据  $U_H$  的正负定出待

测磁场的方向。

由于霍耳效应建立电场所需时间很短（经  $10^{-12} \sim 10^{-14} s$ ），因此通过霍耳元件的电流用直流或交流都可以。若霍耳电流  $I_H = I_0 \sin \omega t$ ，则

$$U_H = I_H K_H B = I_0 K_H B \sin \omega t \quad (6)$$

所得的霍耳电压也是交变的。在使用交流电情况下（5）式仍可使用，只是式中的  $I_H$  和  $U_H$  应理解为有效值。

### 3. 消除霍耳元件副效应的影响

在实际测量过程中，还会伴随一些热磁副效应，它使所测得的电压不只是  $U_H$ ，还会附加另外一些电压，给测量带来误差。

这些热磁效应有埃廷斯豪森效应，是由于在霍耳片两端有温度差，从而产生温差电动势  $U_E$ ，它与霍耳电流  $I_H$ 、磁场  $B$  方向有关；能斯特效应，是由于当热流通过霍耳片（如 1，3 端）在其两侧（2，4 端）会有电动势  $U_N$  产生，只与磁场  $B$  和热流有关；里吉-勒迪克效应，是当热流通过霍耳片时两侧会有温度产生，从而又产生温差电动势  $U_R$ ，它同样与磁场  $B$  热场有关。

除了这些热磁副效应外还有不等位电势差  $U_0$ 。它是由于两侧（2，4）的电极不在同一等势面上引起的。当霍耳电流通过 1，3 端时，即使不加磁场，2 和 4 端也会有电势差  $U_0$  产生，其方向随电流  $I_H$  方向而改变。

因此，为了消除副效应的影响，在操作时需要分别改变  $I_H$  的方向和  $B$  的方向，记下四组电势差数据（仪器面板上  $I_H$  与  $I_M$  换向开关均以朝上为正）：

$$\text{当 } I_H \text{ 正向, } B \text{ 为正向时, } U_1 = U_H + U_0 + U_E + U_N + U_R;$$

$$\text{当 } I_H \text{ 负向, } B \text{ 为正向时, } U_2 = -U_H - U_0 - U_E + U_N + U_R;$$

$$\text{当 } I_H \text{ 负向, } B \text{ 为负向时, } U_3 = U_H - U_0 + U_E - U_N - U_R;$$

$$\text{当 } I_H \text{ 正向, } B \text{ 为负向时, } U_4 = -U_H + U_0 - U_E - U_N - U_R。$$

作运算， $U_1 - U_2 + U_3 - U_4$  并取平均值，有

$$\frac{1}{4}(U_1 - U_2 + U_3 - U_4) = U_H + U_E \quad (7)$$

由于  $U_E$  方向始终与  $U_H$  相同，所以换向法不能消除它，但一般  $U_E \ll U_H$ ，故可以忽略不计，于是

$$U_H = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 + U_3 - U_4) \quad (8)$$

在实际使用时，上式也可写成

$$U_H = \frac{1}{4}(|U_1| + |U_2| + |U_3| + |U_4|) \quad (9)$$

其中  $U_H$  符号由霍尔元件是  $P$  型，还是  $N$  型决定。

### 【实验过程】

#### 1. 测量霍尔电流 $I_H$ 与霍尔电压 $U_H$ 的关系。

将霍尔片置于电磁铁中心处，按图 2 接好电路图。霍尔元件的 1、3 脚接工作电压，2、4 脚测霍尔电压（面板上按照颜色连接）。调节磁感应强度至  $150mT$ 。调节霍尔元件的工作电流（根据  $100\Omega$  取样电阻两端的电压  $U_R$  来计算），在不同霍尔电流下测量相应的霍尔电压，每次消除副效应。作  $U_H - I_H$  图，验证  $U_H$  与  $I_H$  的线性关系。（注意特斯拉计的调零：由于电磁铁存在一定的剩磁，因此首先要对电磁铁进行退磁处理，随后再通过“毫特计调零”旋钮进行调零，才意味着调零成功。退磁处理的具体操作步骤详见附录。）

#### 2. 测量砷化镓霍尔元件的灵敏度 $K_H$ 。

霍尔片仍置于电磁铁中心处，霍尔电流  $I_H$  保持  $1.000mA$  不变（即  $100\Omega$  取样电阻上的电压为  $100.0mV$ ），由 1, 3 端输入。调节电磁铁电流，在不同的磁感应强度  $B$  下测量样品霍尔元件的霍尔电压  $U_H$ ，作  $U_H$  与  $B$  的关系图，用公式（5）计算该霍尔元件的灵敏度。

### 【实验数据】

#### 1. $U_H$ 与 $I_H$ 关系的测定

表 1 取样电阻电压、霍尔电压与霍尔电流关系测量数据表

$U_R / mV$	$I_H / mA$	$U_1 / mV$	$U_2 / mV$	$U_3 / mV$	$U_4 / mV$	$U_H / mV$
20.0						
40.0						
60.0						
80.0						
100.0						
120.0						
140.0						
160.0						
180.0						

数据处理：数据用最小二乘法对  $U_H - I_H$  进行线性拟合，得  $U_H$  的表达式。

#### 2. 砷化镓霍尔元件灵敏度 $K_H$ 的测定（取霍尔电流为 $1.000mA$ ）

表 2 磁感应强度与霍尔电压关系测量数据表

$B / mT$	$U_1 / mV$	$U_2 / mV$	$U_3 / mV$	$U_4 / mV$	$U_H / mV$
20.0					
40.0					
60.0					
80.0					
100.0					
120.0					
140.0					
160.0					
180.0					

数据处理：用最小二乘法对  $U_H - B$  进行线性拟合，根据公式（5）可得该砷化镓霍尔元件的灵敏度  $K_H$ ；根据实验电路的电源正负和数字电压表极性或者斜率的符号可判断出该霍尔元件的类型。

### 【注意事项】

1. 要注意接线时，防止恒流源或电磁铁电源短路或过载，以免损坏电源。
2. 实验时注意不等位效应的观察，设法消除其对测量结果的影响。

3. 判断霍尔元件的类型时，可根据实验电路的电源正负和数字电压表极性。已知加在 1、3 脚两电极间电压的正负符号，观测 2、4 脚实验结果电压正负。从正确判断中加深对霍尔效应的理解。

### 【附录】

#### 退磁处理

退磁方法：使励磁电流不断反向，且幅值由最大值逐渐减小至零，最终使电磁铁的剩磁为零。

操作步骤：励磁电流正向，电流值由 0 逐渐增至 300mA 再逐渐减小至 0；

然后切换励磁电流方向，反向电流值由 0 逐渐增至 250mA 再逐渐减小至 0；

重复像这样励磁电流不断反向，最大电流值每次减小 50mA 的操作；随着

最大电流值减小至 50 mA 即剩磁不断减小，每次最大电流减小量（50 mA）

也应随之减小一点（如 20 mA）以此类推；最终最大电流减小量减小至零

时，即剩磁消除。退磁过程原理图如图 5 所示。

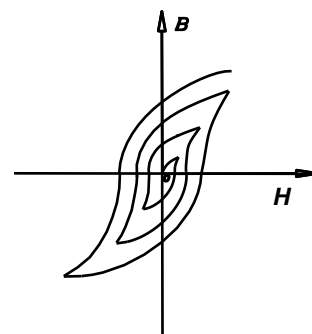


图 3 退磁过程原理图