

课程编号 1800450001

得分	教师签名	批改日期

# 深 圳 大 学 实 验 报 告

课程名称: 大学物理实验（二）

实验名称: 霍尔效应及其应用

学 院: 计算机与软件学院

指导教师: 高阳

报告人: 吴艇 组号: 19

学号 2020281061 实验地点 214

实验时间: 2021 年 11 月 3 日

提交时间: \_\_\_\_\_

## 一、实验目的

霍尔效应是美国物理学家霍尔(Hall Edwin Herbert,1855-1938)于 1879 年在实验中发现的,霍尔效应在生产技术中有十分重要的意义。根据霍尔效应做成的霍尔器件,不仅可以用来测量磁场、电流等物理量,还可以磁场为工作媒体,将物体的运动参量转变为数字电压的形式输出,使之具备传感和开关的功能,广泛应用于现代汽车上就有广泛应用。

霍尔效应也是一个新的研究领域,德国物理家克利青(Klaus von Klitzing)等在研究极低温度和强磁场中的半导体时发现了量子霍尔效应,这是当代凝聚态物理学令人惊异的进展之一,克利青为此获得 1985 年的诺贝尔物理学奖。之后,美籍华裔物理学家崔琦(Daniel Chee Tsui)和美国物理学家劳克林(Robert B. Laughlin)、施特默(Horst L. Strmer)在更强磁场下研究量子霍尔效应时发现了分数量子霍尔效应,这个发现使人们对量子现象的认识更进了一步,他们为此获得了 1998 年的诺贝尔物理学奖。

本实验安排了两个必做内容

- (1)验证霍尔电压与工作电流、磁感应强度之间的关系,并确定样品的霍尔系数;
- (2)应用霍尔效应测长直螺线管的磁场分布。

本实验的目的:

- (1)掌握霍尔效应的原理,了解霍尔器件的相关知识如导电类型、载流子浓度、迁移率等,了解霍尔器件的工作特性。
- (2)学习使用霍尔器件测磁场的方法,并进一步了解霍尔器件的特性及工作条件。
- (3)学习一种实验方法,即用“对称测量法”消除副效应的影响。

## 二、实验原理

### (一)霍尔效应

#### 1.霍尔效应原理

如图 3-1-1 所示,一块长为 $l$ 、宽为 $b$ 、厚度为 $d$ 的半导体薄片置于磁场中,磁感应强度 $B$ 垂直于半导体薄片,在半导体薄片的横向上加载工作电流 $I_S$ ,在薄片的纵向两侧会出现一个电压 $U_H$ ,这种现象叫霍尔效应, $U_H$ 称为霍尔电压。实验表明:在磁场不太强时, $U_H$ 与 $I_S$ 、 $B$ 成正比,与薄片厚度 $d$ 成反比,即

$$U_H = R_H \frac{I_S B}{d} \quad (3-1-1)$$

式中 $R_H$ 叫霍尔系数。

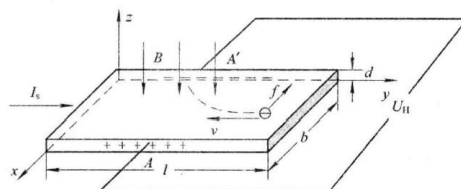


图 3-1-1 霍尔效应原理图

霍尔效应可用洛伦兹力来解释。

设半导体薄片内载流子的定向漂移速率为 $v$ ,那么载流子所受洛伦兹力为

$$f = qv \times B \quad (3-1-2)$$

在洛仑兹力的作用下，电子向A'一侧漂移，结果在A、A'两侧分别聚集了正负电荷，在A、A'之间建立了静电场，形成电势差。静电场会阻碍电子的继续漂移，当静电场力和洛仑兹力达到平衡时，电子不再侧向漂移，电势差达到恒定状态，此时

$$qvB = q \frac{U_H}{b} \quad (3-1-3)$$

设载流子浓度为n，则电流 $I_S$ 和载流子定向漂移速率v的关系为

$$I_S = qvbdn \quad \text{或} \quad v = \frac{I_S}{qbdn} \quad (3-1-4)$$

将式(3-1-4)代入式(3-1-3)得

$$U_H = \frac{1}{nq} \frac{I_S B}{d} \quad (3-1-5)$$

对比式(3-1-1)和式(3-1-5)，可知霍尔系数为

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (3-1-6)$$

式(3-1-6)表明.霍尔系数和载流子浓度有关。半导体的载流子浓度比金属导体的载流子浓度小得多。因而半导体的霍尔系数比导体大得多，半导体的霍尔效应较为显著，而导体几乎观察不到该效应。通过测量材料的霍尔系数可以确定材料的载流子浓度，因此霍尔效应是研究载流子浓度的一个重要方法。

由式(3-1-5)还可看出，半导体薄片的厚度d越小，霍尔效应越显著，所以霍尔器件通常做得很薄。

式(3-1-5)中 $\frac{1}{nqd}$ 一叫霍尔器件的灵敏度，用 $K_H$ 表示：

$$K_H = \frac{1}{nqd} \quad (3-1-7)$$

则式(3-1-5)可写成

$$U_H = K_H I_S B \quad (3-1-8)$$

若已知 $K_H$  (一般由仪器生产厂家给出)，通过测量霍尔电压 $U_H$ 和工作电流 $I_S$ 可以求出磁感应强度的大小，这就是霍尔片测磁场的原理。

半导体的载流子有正有负，A、A'之间的电势差(即霍尔电压) $U_H$ 与载流子的正负有关。与载流子是正(空穴导电--P型半导体)时，载流子定向漂移的速度方向与电流方向相同，洛仑兹力使它向上偏转，结果是A'端电势高于A端，如3-1-2(a)所示；当载流子是负(电子导电--N型半导体)时，载流子定向漂移的速度方向与电流方向相反，洛仑兹力使电子向上偏转，结果是A端电势高于A'端，如图3-1-2(b)所示。所以根据霍尔系数的正负可以判断半导体的导电类型<sup>①</sup>。

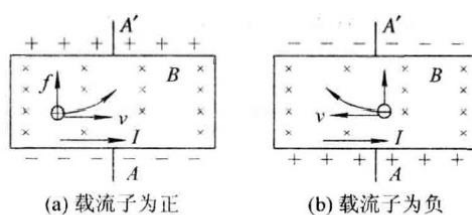


图 3-1-2 霍尔电压与载流子正负之间的关系

## 2. 霍尔器件的重要参数

霍尔器件的重要参数包括：

(1) 霍尔系数：

$$R_H = \frac{1}{nq}$$

(2) 霍尔器件的灵敏度：

$$K_H = \frac{1}{nqd}$$

(3) 迁移率、电导率：

在低电下载流子平均漂移速度  $\bar{v}$  和场强  $E$  成正比，即  $\bar{v} = \mu E$ ，比例系数  $\mu$  称为迁移率。

场强  $E$  与电流密度  $J$  成正比，即  $E = \rho J$ ，比例系数  $\rho$  称为电阻率，电阻率的倒数称为电导率，即  $\sigma = 1/\rho$ 。又因为电流密度的大小  $j = ne\bar{v}$ ，可得电导率和迁移率之间的关系为  $\sigma = ne\mu$ ，进而可得

$$\mu = K_H \sigma d$$

(3-1-9)

测出电导率，即可求出迁移率。

### (二) 长直螺线管的磁场分布

如图 3-1-3 所示，一密绕螺线管，管内是真空，管长  $l$ ，半径为  $R$ ，单位长度匝数为  $n$ ，当通以电流  $I$  时，则在管内外产生磁场。根据毕奥-萨伐尔定律  $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \times r}{r^3}$ ，可求得密绕螺线管内部轴线上磁感应强度为

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$

(3-1-10)

其中  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$  是真空磁导率。

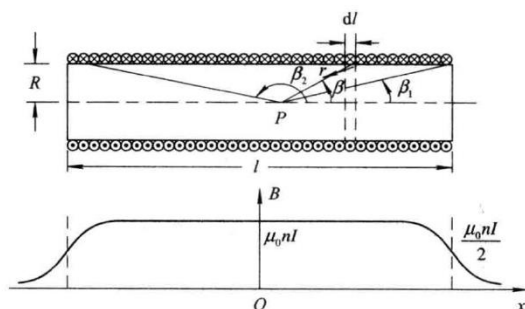


图 3-1-3 长直螺线管的磁场分布

当  $l \gg R$  时，螺线管称为长直螺线管。在远离端点的螺线管内部，近似地认为式(3-1-10)中  $\beta_1 = 0$ ， $\beta_2 = \pi$ ，则  $B = \mu_0 n I$ ，即在远离端点的螺线管内部的轴线上可视为均匀磁场，而在长直螺线管的端点处  $B = \frac{1}{2} \mu_0 n I$ 。

### (三) 对称测量法与附加电动势

#### 1. 附加电动势

将载流半导体薄片置于磁场中，除了会产生霍尔效应外，还会有其他的副效应产生。实际测量霍尔片两侧的电压时，得到的不只是  $U_H$ ，还包括副效应产生的附加电动势(如图 3-1-4 所示)。副效应主要有以下 4 种：

(1) 厄廷豪森(Ettinghausen)效应引起的电势差  $U_E$ 。由于电子实际上并非以同一速度  $v$  沿轴  $y$  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 侧面较 4 侧面集中了较多能量

高的电子，结果 3、4 侧面出现温差，产生温差电动势  $E_E$ 。可以证明  $E_E \propto I \cdot B$ ，容易理解  $E_E$  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 间的接触电阻可能不同，通电发热程度不同，故 1、2 两点间的温度可能不同，于是引起热扩散电流。与霍耳效应类似，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  $U_{RL}$ 。上述热扩散电流的载流子由于速度不同，根据厄廷豪森效应同样的理由，又会在 3、4 点间形成温差电动势  $E_{RL}$ 。 $E_{RL}$  的正负仅与  $B$  的方向有关，而与  $I$  的方向无关。

(4) 不等电位效应引起的电势差  $U_0$ 。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。

## 2. 对称测量法消除附加电动势

上述副效应产生的附加电动势叠加在霍尔电压上，在测量中形成系统误差。由于副效应与磁感应强度  $B$  和电流  $I$  的方向有关，测量时可采用“对称测量法”，即通过改变电流  $I$  和磁感应强度  $B$  的方向基本可以消除附加电动势。具体操作如下(测 4 组数据)：

$$\begin{aligned} +B, +I_S: U_1 &= U_H + E_E + U_N + E_{RL} + U_0 \\ +B, -I_S: U_2 &= -U_H - E_E + U_N + E_{RL} - U_0 \\ -B, -I_S: U_3 &= U_H + E_E - U_N - E_{RL} - U_0 \\ -B, +I_S: U_4 &= -U_H - E_E - U_N - E_{RL} + U_0 \end{aligned}$$

由四组数据可得

$$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4} - E_E$$

$E_E$  比  $U_H$  小得多，可略去不计，于是霍尔电压为

$$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4}$$

## 三、实验仪器：

### (一) TH-H 型霍尔效应实验仪

TH-H 型霍尔效应实验仪示意图如图 3-1-5(a)、(b)所示，实验仪的介绍如下。

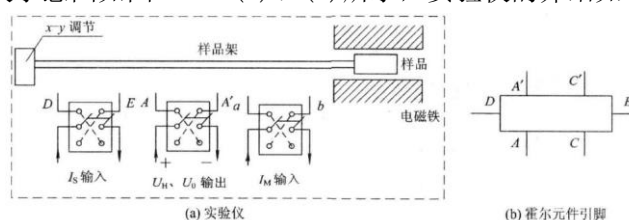


图 3-1-5 霍尔效应实验仪示意图

### (1) 电磁铁。

电磁铁产生的磁感应强度大小可由  $B = KI_M$  计算，其中： $I_M$  为励磁电流； $K$  为线圈励磁参数，单位为千高斯每安培 ( $KGS \cdot A^{-1}$ ,  $1KGS \cdot A^{-1} = 10^{-4}T$ ),  $K > 3.00KGS \cdot A^{-1}$  ( $K$  的具体数值标定在线包上)。磁铁线包引线有星标者为头，绕线方向为顺时针（操作者面对实验仪）。根据励磁电流  $I_M$  流向可确定磁场的方向。

### (2) 样品、样品架。

样品材料为 N 型半导体硅单晶片。根据空脚的位置不同，样品分两种形式，分别如图 3-1-6 中 (a) 和 (b) 所示。样品的几何尺寸为：厚度  $d = 0.5 mm$ ，宽度  $b = 4.0 mm$ ，A、C 电极间距  $l = 3.0 mm$ 。样品有三对电极，其中 A、A' 或 C、C' 用于测量霍尔电压  $U_H$ ，A、C 或 A'、C' 用于测量电导，D、E 为样品工作电流电极。

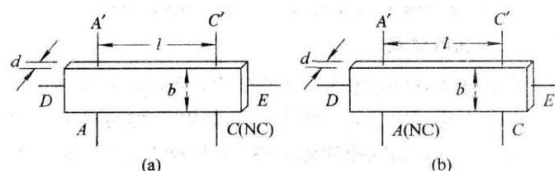


图 3-1-6 样品示意图

样品架具有  $x-y$  调节功能及读数装置，可调节样品位置。

(3) 电流和电压。

“ $I_S$  输入”：实验时与测试仪的 “ $I_S$  输出” 相连， $I_S$  是霍尔片的工作电流；

“ $I_M$  输入”：实验时与测试仪的 “ $I_M$  输出” 相连， $I_M$  是电磁铁的励磁电流；

“ $U_H$ 、 $U_\sigma$  输出”：实验时与测试仪的 “ $U_H$ 、 $U_\sigma$  输出” 相连， $U_H$  是霍尔片霍尔电压， $U_\sigma$  是零磁场的情况下，加载工作电流后霍尔片引脚 A、C 或 A'、C' 之间的电压。

(4)  $I_S$  和  $I_M$  换向开关及  $U_H$  和  $U_\sigma$  测量选择开关。

$I_S$  和  $I_M$  换向开关投向上方，视  $I_S$  及  $I_M$  均为正值，反之为负值； $U_H$  和  $U_\sigma$  测量选择开关投向上方测  $U_H$ ，投向下测  $U_\sigma$ 。

注：电导  $\sigma$  的测量方法：在零磁场的情况下，加载工作电流  $I_S$ （可取  $I_S = 2\text{mA}$ ，不宜太大，以免毫伏表超量程），通过测量 A、C 或 A'、C' 的电压可由下式求得电导率

$$\sigma = \frac{I_S l}{U_\sigma b d}$$

(二) TH-H 型霍尔效应测试仪

TH-H 型霍尔效应测试仪如图 3-1-7 所示。

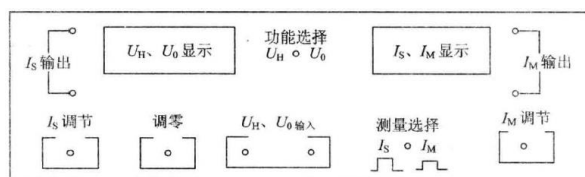


图 3-1-7 霍尔效应测试仪示意图

1. 主要技术指标

(1) “ $I_S$  输出”：提供样品工作电流源。输出电流为  $0 \sim 10\text{mA}$ ，连续可调。调节精度可达  $10\%$ ，最大输出负载电压  $12\text{V}$ 。实验时与实验仪的 “ $I_S$  输入” 相连。

(2) “ $I_M$  输出”：励磁电流源。输出电流为  $0 \sim 1\text{A}$ ，连续可调。调节精度可达  $1\text{mA}$ 。最大输出负载电压  $25\text{V}$ 。实验时与实验仪的 “ $I_M$  输入” 相连。

(3) “ $I_S$ 、 $I_M$  显示”：数字电流表。精度不低于  $5\%$ 。输出工作电流  $I_S$  和励磁电流  $I_M$  的两组电流源彼此独立，但由同一只数字电流表进行显示，通过 “测量选择” 按键控制显示  $I_S$  或  $I_M$ ：按钮按下去显示  $I_M$ ，旋动调节 “ $I_M$  调节” 旋钮可控制  $I_M$  输出的大小；再次按下按钮，按钮将弹起来，显示  $I_S$ ，旋动 “ $I_S$  调节” 旋钮，可控制  $I_S$  输出的大小。

(4) “ $U_H$ 、 $U_\sigma$  显示”：直流数字电压表，用于测量霍尔片输出电压和  $U_H$  和  $U_\sigma$ ， $U_H$  和  $U_\sigma$  通过 “功能选择” 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。电压表测量范围为  $\pm 20\text{mV}$  和  $\pm 200\text{mV}$ 。

2. 使用注意事项

(1) 仪器开机、关机前应将 “ $I_S$  输出”、“ $I_M$  输出” 旋钮逆时针调到最小；

(2) 霍尔片的工作电流只允许几个  $\text{mA}$ ，决不可以将 “ $I_M$  输出” 接到 “ $I_S$  输入” 上，否则将损坏霍尔片；

(3) 霍尔片性脆易碎，电极甚细易断，且不可修复，严防撞击或用手触摸，切勿随意改动  $y$  向高度，以免霍尔片与磁极摩擦而受损。

### （三）TH-S 型螺线管测定实验仪

TH-S 型螺线管测定实验仪如图 3-1-8 所示。

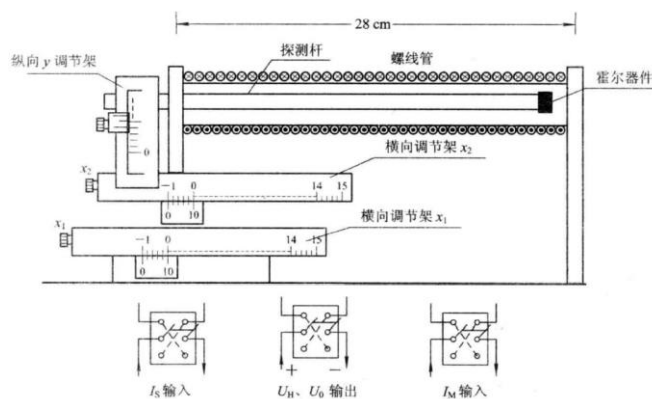


图 3-1-8 螺线管磁场分布实验仪示意图

主要技术指标如下。

（1）螺线管：长度  $L = 28\text{cm}$ ，线圈外径为  $2.7\text{cm}$ ，匝密度  $n$ （匝/米）标注在实验仪上；

（2）横向互补轴向调节架  $x_1$ 、 $x_2$ ：先调节  $x_1$  使测距尺读数从  $1.0\text{cm}$  到  $14.0\text{cm}$ ，再调节  $x_2$  使测距尺读数从  $1.0\text{cm}$  到  $14.0\text{cm}$ ，全程  $28\text{cm}$ 。霍尔片探头位置将从螺线管最右端移到最左端。若取螺线管中心为坐标原点，测距尺指示和探头位置的关系如表 3-1-1 所示。

表 3-1-1 测距尺指示和探头位置的关系

探头位置		螺线管右端	螺线管中心	螺线管左端
测距尺 读数/cm	$x_1$	0	14	14
	$x_2$	0	0	14

（3）纵向  $y$  调节架：仪器出厂前探测杆中心轴线与螺线管内孔轴线已进行了调整，因此实验中无需调节  $y$  旋钮。

## 四、实验内容：

### （一）霍尔器件输出特性的测量

（1）保持励磁电流  $I_M$  不变（相当于保持磁场不变），研究霍尔片输出电压  $U_H$  和工作电流的关系。提示：为避免毫伏表超出量程， $I_M$  可取  $0.500\text{A}$  以下， $I_S$  取值范围可设在  $4\text{mA}$  以内。

（2）保持  $I$  作电流  $I_S$  不变，研究霍尔片输出  $U_H$  和磁感应强度的关系。提示： $I_M$  的取值范围可设在  $0.8\text{A}$  以内。

（3）由上述测量数据确定材料的霍尔系数  $R_H$  和霍尔器件的灵敏度  $K_H$

### （二）利用霍尔器件测量长直螺线管的磁场分布

由  $U_H = K_H I_S B$  可知，已知霍尔器件的灵敏度  $K_H$ （ $K_H$  的值由仪器生产厂家给出，在仪器上有标识），只要测出  $U_H$  就可以测出磁场  $B$ 。合理选取霍尔器件的工作电流和励磁电流，测绘出长直螺线管内部轴线上的磁场分布。

注意事项：（1） $I_S$  不可太大，以免损坏霍尔片，保持在  $6\text{mA}$  左右即可；（2） $I_M$  选取  $0.600\text{A}$  以下，太大会使螺线管过度发热或使电压表过载。

### （三）迁移率的测量（选做）

在零磁场的情况下，取  $I_S = 2\text{mA}$ ，将实验仪“ $U_H$ 、 $U_o$  输出”换向开关倒向“ $U_o$ ”，将测试仪的“功能选择”开关倒向  $U_o$ ，测  $A$ 、 $C$  或  $A'$ 、 $C'$  的电压  $U_o$ ，由式  $\sigma = \frac{I_S l}{U_o b d}$  求得电导率，再由  $\mu = K_H \sigma d$  求出迁移率。

## 五、数据记录:

组号: 19 ; 姓名 吴艇

### 1. 霍尔器件输出特性测量

①实验仪双刀开关倒向“ $U_H$ ”, 测试仪功能选择置于“ $U_H$ ”, 然后调节 $I_M = 0.5A$ , 测绘 $U_H-I_S$ 曲线。

$I_S/mA$	$U_1/mV$	$U_2/mV$	$U_3/mV$	$U_4/mV$	$U_H = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)/4/mV$
	+B,+ $I_S$	-B,+ $I_S$	-B,- $I_S$	+B,- $I_S$	
1.00					
1.50					
2.00					
2.50					
3.00					
3.50					
4.00					

②保持 $I_S$ 的值不变( $I_S = 3.00mA$ ), 测绘曲线 $U_H-I_M$

$I_M/mA$	$U_1/mV$	$U_2/mV$	$U_3/mV$	$U_4/mV$	$U_H = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)/4/mV$
	+B,+ $I_S$	-B,+ $I_S$	-B,- $I_S$	+B,- $I_S$	
0.300					
0.400					
0.500					
0.600					
0.700					
0.800					

### 2. 测量螺线管轴线上磁场分布( $I_M = 0.500A, I_S = 3.00mA$ )

$x/mm$	$U_1/mV$	$U_2/mV$	$U_3/mV$	$U_4/mV$	$U_H/mV$	B/T
	+B,+ $I_S$	-B,+ $I_S$	-B,- $I_S$	+B,- $I_S$		

注意纪录线圈的霍尔灵敏度 $K_H$ , 单位 $mV/(mA \cdot T)$