

## 实验 14 半导体变温霍尔效应

### 引言

1879 年美国物理学家霍尔 (E. H. Hall) 在研究通有电流的导体在磁场中受力的情况时, 发现在垂直于磁场和电流的方向上产生了电动势, 这个电磁效应称为“霍尔效应”。后来曾有人利用霍尔效应制成测量磁场的磁传感器, 但因金属的霍尔效应太弱而未能得到实际应用。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, 由于它的霍尔效应显著而得到实用和发展, 现在广泛用于非电量的测量、电动控制、电磁测量和计算装置方面。在电流体中的霍尔效应也是目前在研究中的“磁流体发电”的理论基础。近年来, 霍尔效应实验不断有新发现。1980 年原西德物理学家冯·克利青研究二维电子气系统的输运特性, 在低温和强磁场下发现了量子霍尔效应, 这是凝聚态物理领域最重要的发现之一。目前对量子霍尔效应正在进行深入研究, 并取得了重要应用, 例如用于确定电阻的自然基准, 可以极为精确地测量光谱精细结构常数等。在磁场、磁路等磁现象的研究和应用中, 霍尔效应及其元件是不可缺少的, 利用它观测磁场直观、干扰小、灵敏度高、效果明显。

### 实验目的

- 1 了解半导体中霍尔效应的产生机制
- 2 掌握霍尔系数和电导率的测量方法
- 3 掌握动态法测量霍尔系数及电导率随温度变化的实验方法

### 实验原理

#### 1 半导体的电导率

一般电场情况下, 半导体的导电服从欧姆定律:  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$  ——  $\sigma$  为电导率

半导体中可以同时有两种载流子 —— 电子和空穴载流子

电流密度:  $\vec{j} = nq\vec{v}_- + pq\vec{v}_+$  ——  $\vec{v}_+$ ,  $\vec{v}_-$  分别为空穴和电子在外场下获得的平均漂移速度

平均漂移速度和外场的关系:  $\vec{v}_+ = \mu_+ \vec{E}$   
 $\vec{v}_- = \mu_- \vec{E}$  ——  $\mu_+$ ,  $\mu_-$  是空穴和电子的迁移率

$\mu_+$ ,  $\mu_-$  —— 单位电下载流子的平均漂移速度

电流密度:  $\vec{j} = nq\mu_- \vec{E} + pq\mu_+ \vec{E}$

电导率:  $\sigma = nq\mu_- + pq\mu_+$

载流子的漂移运动是电场加速和半导体中散射的结果 —— 散射来自于晶格振动和杂质

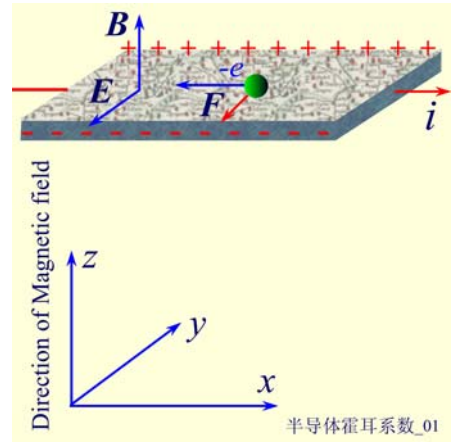
温度较高时 —— 晶格振动对载流子的散射是主要的

温度较低时 —— 杂质的散射是主要的

迁移率一方面决定于有效质量（加速作用），另一方面决定于散射几率。

## 2 半导体霍尔效应和霍尔系数

如右图所示，将半导体片置于  $XY$  平面，电流沿  $X$  方向，磁场垂直于半导体片沿  $Z$  方向。空穴导电的  $N$  型半导体，载流子受到的洛伦兹力：



$$\vec{F} = (-q)\vec{v} \times \vec{B} \quad \text{---} \quad F_y = -qv_x B_z$$

在半导体片的两端形成正负电荷的积累，产生静电场  $E_y$

当达到稳恒后，满足关系： $qE_y = qv_x B_z$

电流密度： $j_x = nqv_x$

电场强度： $E_y = \frac{1}{nq} j_x B_z$ ， $\frac{1}{nq}$  —— 霍尔系数

当半导体样品通以电流  $I_S$ ，并加一垂直于电流的磁场  $\vec{B}$ ，则在样品两侧产生一横向电势差  $U_H$ ， $U_H$  称为霍尔电压，大小为：

$$U_H = E_y a = \frac{1}{nq} j_x B a = R_H a B \frac{I_S}{ab}, \quad U_H = R_H B \frac{I_S}{b}, \quad b \text{ 为样品厚度}$$

$$\text{霍尔系数: } R_H = \frac{U_H b}{I_S B}$$

对于 P 型半导体样品： $R_H = \frac{1}{qp}$ ，式中  $q$  为电子电量， $p$  为半导体载流子空穴浓度。

对于 n 型半导体样品： $R_H = -\frac{1}{qn}$ ，式中  $n$  为半导体电子载流子浓度。

对于电子、空穴混合导电的情况，在计算  $R_H$  时应同时考虑两种载流子在磁场偏转下偏转的效果。由霍尔系数的表达式可以看出：根据  $R_H$  的符号可以判断载流子的型，正为 P 型，负为 N 型。由  $R_H$  的大小可确定载流子浓度，还可以结合测得的电导率算出如下的霍尔迁移率  $u_H$

$$u_H = |R_H| \sigma$$

对于 P 型半导体  $u_H = u_p$ ，对于 N 型半导体  $u_H = u_n$

霍尔系数  $R_H$  可以在实验中测量出来，表达式为： $R_H = \frac{U_H b}{I_S B}$

式中  $U_H$ 、 $I_S$ 、 $b$ 、 $B$  分别为霍尔电压、样品电流、样品厚度和磁感应强度。单位分别为伏特 (V)、安培 (A)，米 (m) 和特斯拉 (T)。

通过测量样品的霍尔电压、样品中的电流和磁感应强度,计算样品的霍尔系数和电导率。但实际测量时,往往伴随着各种热磁等附加效应,通过改变电流及磁场方向予以消除。

霍尔效应的测量是研究半导体性质的重要实验方法。利用霍尔系数和电导率的联合测量,可以用来确定半导体的导电类型和载流子浓度。通过测量霍尔系数与电导率随温度的变化,可以确定半导体的禁带宽度、杂质电离能及迁移率的温度系数等基本参数。本仪器采用现代电子技术和计算机数据采集系统,对霍尔样品在弱场条件下进行变温霍尔系数和电导率的测量,来确定半导体材料的各种性质。

## 测量原理和方法

### 1 霍尔系数与温度的关系

$R_H$  与载流子浓度之间有反比关系,当温度不变时,载流子浓度不变,  $R_H$  不变,而当温度改变时,载流子浓度发生,  $R_H$  也随之变化。实验可得  $R_H = \frac{U_H b}{I_S B}$  随温度  $T$  变化的曲线。

### 2 半导体电导率

在半导体中若有两种载流子同时存在,其电导率  $\sigma = nq\mu_- + pq\mu_+$

实验中电导率  $\sigma$  可由下式计算出:  $\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \rho = \frac{R(ab)}{l} = \frac{U_c ab}{I_S l}$

$$\sigma = \frac{I_S l}{U_c ab}$$

式中为  $\rho$  电阻率,  $I_S$  为流过样品的电流,  $U_c$  和  $l$  分别为两测量点间的电压降和长度,  $a$  为样品宽度,  $b$  为样品厚度。

## 实验内容

- 1 测量常温下半导体锗的霍尔系数和电导率,并计算载流子浓度和霍尔迁移率
- 2 测量霍尔系数与温度的关系
- 3 半导体电导率与温度的关系

## 仪器简介

测量仪器电磁铁、可自动换向稳流源、恒温器、测温控温系统、数据采集及数据处理系统等构成。

电磁铁 —— 0—400 mT 可调

励磁电源 0—5 A 可调 —— 可自动换向

数字特斯拉计 0—2000 mT —— 三位半数字显示

恒流源输出 1 mA

数据采集系统霍尔电压测量最小分辨率 1 $\mu$ V

温度变化测量范围 80—380 K, 电源 220 V 50 HzAC 200 W

## 仪器使用方法

### 1 常温下测量霍尔系数 $R_H$ 和电导率 $\sigma$

- 1) 打开电脑、霍尔效应实验仪 (I) 及磁场测量和控制系统 (II) 电源开关。

以下简称《I》和《II》。如《II》电流有输出, 则按一下《I》复位开关, 电流输出为零

- 2) 将《I》的<样品电流方式>拨至“自动”, <测量方式>拨至“动态”。

将 II (换向转换开关) 拨至“自动”。

按下《I》复位开关, 电流有输出, 调节《II》电位器, 至电流为一定电流值同时测量磁场强度

- 3) 将测量样品杆放入电磁铁磁场中 (对好位置)
- 4) 进入数据采集状态, 如没有进入数据采集状态, 则按一下《I》复位开关后进入数据采集状态。记录磁场电流正反向的霍尔电压  $V_3, V_4, V_5, V_6$
- 5) 将《I》<测量选择>拨至  $\sigma$ , 记录电流正反向的电压  $V_1, V_2$

- 6) 根据  $R_H = \frac{U_H b}{I_S B}$  和  $\sigma = \frac{I_S l}{U_c ab}$  计算霍尔系数和电导率

### 2 变温测量霍尔系数 $R_H$ 和电导率 $\sigma$

- 1) 将《I》<测量选择>拨至“ $R_H$ ”, 将<温度设定>调至最小 (往左旋到底, 加热指示灯不亮)
- 2) 将测量样品杆放入杜瓦杯中冷却至液氮温度(77K)
- 3) 重新进入数据采集状态
- 4) 将测量样品杆放入电磁铁磁场中 (对好位置)
- 5) 系统自动记录随温度变化的霍尔电压, 到了接近室温时调节<温度设定>至最大 (往右调至风鸣器不叫)
- 6) 当温度基本不变, 退出数据采集状态。保存霍尔系数  $R_H$  文件 (XXX.txt)  
(XXX 表示任意字符, txt 为文本文件不能省略)
- 7) 将《I》<测量选择>拨至“ $\sigma$ ”

- 8) 将测量样品杆放入杜瓦杯中冷却至液氮温度(77K)
- 9) 重新进入数据采集状态
- 10) 将测量样品杆拿出杜瓦杯
- 11) 系统自动记录随温度变化的电压，到了接近室温时调节〈温度设定〉至最大（往右调至风鸣器不叫）
- 12) 当温度基本不变，退出数据采集状态。保存电导率 $\sigma$ 文件为（XXX.txt）
- 13) 双击电脑桌面霍尔数据处理图标，根据界面进行数据处理

本实验中的样品为 N 型锗：长  $l = 6 \text{ mm}$ ，宽  $a = 4 \text{ mm}$ ，厚  $b = 0.2 \text{ mm}$

### 思考题

- 1 霍尔电压是怎样形成的？分别以 p 型、n 型半导体样品为例，说明如何确定霍尔电场的方向。
- 2 霍尔系数是如何定义的？在什么物质中（导体还是半导体）—霍尔系数强烈地依赖于温度？
- 3 霍尔系数测量过程中哪些量要保持不变？为什么？
- 4 霍尔系数的测量结果是否与样品的几何形状有关？是否与样品性质的均匀有关？
- 5 磁阻效应对霍尔系数测量结果有什么影响？如何减小该影响？
- 6 试估计霍尔系数测量的精度。

### 注意事项

- 1 经常检查并保证仪器电接地正常。
- 2 湿手不能触及过冷表面、液氮漏斗，防止皮肤冻粘在深冷表面上，造成严重冻伤！灌液氮时应带厚棉手套。如果发生冻伤，请立即用大量自来水冲洗，并按烫伤处理伤口。
- 3 实验完毕，一定要拧松、提起中心杆，防止热膨胀胀坏恒温器。