

6.1 霍尔效应

刘梓航^{*}, 徐锡斌[†]

南京大学 物理系, 南京 210093

【摘要】 本实验旨在通过测量不同温度下半导体样品的霍尔电压, 研究霍尔效应和电导率的温度依赖性。实验开始时, 将样品固定在机座上, 采用稳态测量方式, 分别测量了正向和反向磁场及电流下的霍尔电压。然后将样品降温至室温, 改为动态测量方式, 记录了温度从 320K 升至 420K 过程中霍尔电压的变化曲线和电导率的变化曲线。实验结果显示, 霍尔系数和电导率均随温度变化呈现明显的依赖关系。最后, 通过数据处理, 绘制了霍尔系数和电导率随温度变化的曲线图, 揭示了材料在不同温度下的电学特性。实验表明, 温度对半导体材料的载流子浓度和迁移率具有显著影响, 为深入理解半导体材料的电学行为提供了实验依据。

【关键词】 霍尔效应, 霍尔系数, 电导率, 温度依赖性, 半导体

Experiments of Modern Physics in Nanjing University

Liu Zihang, Prof. Xu

Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: This experiment aims to study the temperature dependence of the Hall effect and electrical conductivity of a semiconductor sample by measuring the Hall voltage at different temperatures. Initially, the sample was fixed in the holder and measured in a steady-state mode, recording the Hall voltage under both positive and negative magnetic fields and current directions. The sample was then cooled to 77K, and the dynamic measurement mode was used to record the changes in Hall voltage and conductivity as the temperature increased from 77K to 420K. The results demonstrated a clear dependence of the Hall coefficient and conductivity on temperature. Data processing allowed the plotting of curves showing the variation of the Hall coefficient and conductivity with temperature, revealing the electrical properties of the material at different temperatures. The experiment indicates that temperature significantly affects the carrier concentration and mobility in semiconductor materials, providing an experimental basis for understanding the electrical behavior of semiconductors.

Key Words: Hall effect, Hall coefficient, electrical conductivity, temperature dependence, semiconductor

1 实验目的

1、了解霍尔效应产生的原理, 霍尔系数表达式的推导以及消除负效应的方法

2、掌握霍尔系数和电导率的测量方法，通过测量数据绘制材料特性曲线，计算材料载流子浓度和霍尔迁移率。

2 实验原理

2.1 霍尔效应和霍尔系数

霍尔效应是一种电磁现象，由美国物理学家埃德温·赫伯特·霍尔于 1879 年发现。当电流通过一个置于磁场中的导体或半导体时，电荷载流子会受到洛伦兹力的作用而偏移，导致垂直于电流和磁场方向上产生电势差，这就是霍尔电压。

对于 p 型半导体，霍尔系数 R_H 表达式为：

$$R_H = A \frac{1}{q \cdot p} \quad (1)$$

对于 n 型半导体，霍尔系数 R_H 表达式为：

$$R_H = A \frac{1}{q \cdot n} \quad (2)$$

其中， A 与散射机理及能带结构有关。由理论算得，在弱磁场条件下，对球形等能面的非简并半导体，在较高温度（此时，晶格散射起主要作用）情况下，

$$A = \frac{3\pi}{8} \approx 1.18 \quad (3)$$

一般地，Si, Ge 等常用半导体在室温下属于此种情况， A 取为 1.18。在较低温度（此时，电离杂质散射起主要作用）情况下，

$$A = \frac{315\pi}{512} \approx 1.93 \quad (4)$$

对于高载流子浓度的简并半导体以及强磁场条件， $A = 1$ ；对于晶格和电离杂质混合散射情况，一般取文献报道的实验值。

由 R_H 的符号可以判断载流子的类型，正为 p 型，负为 n 型； R_H 的大小可确定载流子的浓度；还可以结合测得的电导率 σ 算出“霍尔迁移率”

$$\mu_H = |R_H| \cdot \sigma \quad (5)$$

μ_H 的量纲与载流子的迁移率相同，它的大小与载流子的“漂移（或电导）迁移率”有密切的关系。霍尔系数 R_H 可以在实验中测量出来，表达式为

$$R_H = \frac{U_H \cdot b}{I \cdot B} \quad (m^3/C) \quad (6)$$

2.2 霍尔效应中的副效应及其消除

在霍尔系数的测量中，会伴随一些热磁副效应、电极不对称等因素引起的附加电压叠加在霍尔电压 U_H 上：

(1) 爱廷豪森效应。由于不同区域的载流子速度不同，在洛伦兹力作用下沿相反方向偏转，其动能将转化为热能，使两侧产生温差。由于电极和样品不是同一种材料，电极和样品形成热电偶，这一温差将产生温差电动势 U_e ，且有

$$U_e \propto I \cdot B \quad (7)$$

U_e 方向与电流 I 及磁场 B 的方向有关。

(2) 能斯脱效应。如果在 x 方向存在热流 Q ，沿温度梯度方向扩散的载流子将受到磁场 B 作用而偏转，在 y 方向上建立电势差 U_n ，有

$$U_n \propto Q \cdot B \quad (8)$$

U_n 方向只与 B 方向有关。

(3) 里纪-勒杜克效应。当有热流 Q 沿 x 方向流过样品，载流子将倾向于由热端扩散到冷端，与爱廷豪森效应相仿，在 y 方向产生温差，这温差将产生温差电势 U_{rl}

$$U_{rl} \propto Q \cdot B \quad (9)$$

U_{rl} 的方向只与 B 的方向有关。

(4) 电极位置不对称产生的电压降 U_0 。在制备霍尔样品时， y 方向的测量电极很难做到处于理想的等位面上，即使在未加磁场时，在 A, B 两电极间也存在一个由于不等位电势引起的欧姆压降

$$U_0 = I \cdot R_0 \quad (10)$$

其中 R_0 为 A, B 两电极所在的两等位面之间的电阻， U_0 方向只与 I 的方向有关。

(5) 样品所在空间如果沿 y 方向有温度梯度，则在此方向上产生的温差电势 U_T 也将叠加在 U_H 中， U_T 与 I, B 方向无关。

要消除上述诸效应带来的误差，应改变 I 和 B 的方向，使 U_n, U_{rl}, U_0 和 U_T 从计算结果中消除，而 U_e 因为与 I, B 方向同步变化而无法消除，但 U_e 引起的误差很小，可以忽略。实验时在样品

上加磁场 B 和通电流 I , 则 y 方向两电极间产生电位差 U , 自行定义磁场和电流的正方向, 改变磁场 B 和电流 I 的方向, 测出四组数据, 由四式可得

$$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4} \quad (11)$$

将实验时测得的 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 代入上式, 就可消除附加电压引入的误差, 得到霍尔电压 U_H 。

3 实验仪器

实验仪器包括磁场、测量线路、变温设备、数字电压表等几个主要部分。

磁场采用电磁铁。为避免磁阻效应对霍尔测量的影响, 选用弱磁场, 弱磁场条件为 $\mu \cdot B < 10^4$, 迁移率 μ 的单位为 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, B 的单位为 T。实验中磁场选用 200mT。磁场强度的大小用高斯计测量。

测量线路包括提供给样品的恒流源、换向开关和测量电压的精密数字电压表等。流过样品的电流由恒流源提供, 它的大小可以调节。实验中选择 1.00mA, 电流过大会使样品发热, 产生热磁效应, 电流过小则检测信号太弱。K 是控制样品电流的换向开关。样品的霍尔压降 U_{13} 和电导率压降 U_{24} 用高精度数字电压表来测量。测量线路如图所示。

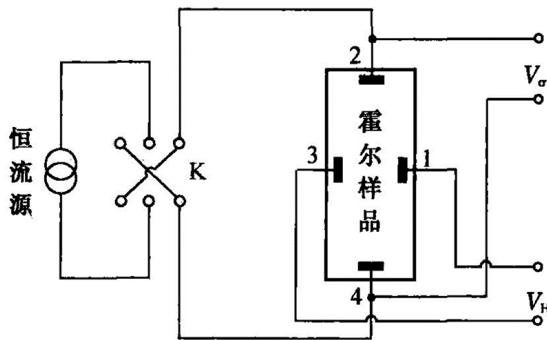


图 1 测量线路

实验用 HVM-02 型霍尔效应综合测量仪测量室温下的霍尔效应。恒流源提供的电流为 $0.1\text{nA} \sim 99.99\mu\text{A}$ 范围, 分为 6 挡。可以用来测量标准样品和范德堡样品。电流以及磁场的换向为自动完成。数据的采集、处理、显示均由计算机完成。在电脑屏幕上可以实时显示 $U_H - T$ 曲线。

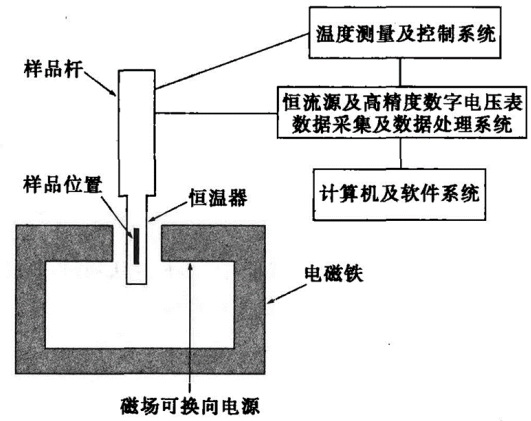


图 2 测量线路

4 实验内容

1. 测量室温下样品 1 的霍尔电压:

用 HVM-02 型霍尔效应综合测量仪进行测量。把样品置于电磁铁两磁极间的中心, 样品与磁场方向垂直, 改变电磁铁电源设的电流大小, 用高斯计测量磁场中心位置的磁场强度, 使之成为 200mT。通过样品的电流定 1.00mA(2,4 两电极间)。测 1,3 两电极间的电压 U_{13} , 改变磁场和电场方向, 共测四次, 得 U_1, U_2, U_3, U_4 , 消除副效应后得出值 U_H 。

电导电压的测量: 不加磁场测 U_{24} , 电流换向后再测一次, 取两次的平均值值得 U_σ 。

2. 变温霍尔系数及电导率的测量

改变电磁铁电源设备中的电流大小, 使磁场中心位置磁场强度达到 200mT, 把样品 1 放入磁场中心位置并开启加热, 选择自动测量挡, 测量温度从 320K 到 420K 的 $U_H - T$ 变化曲线。随后关断磁铁电流, 使磁场强度为零, 向关断样品加热开关, 使样品冷却至接近室温, 自动测量 420K 到 320K 的 $U_\sigma - T$ 变化曲线。

3. 判断样品 1 的导电类型并计算样品 1 的霍尔系数。

5 实验数据处理

5.1 $U_H - T$ 曲线

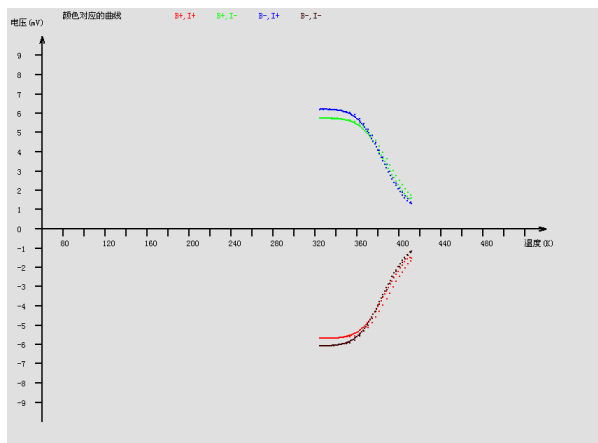


图 3 $U_H - T$ 曲线

5.2 $U_\delta - T$ 曲线

测量选择拨至“ δ ”，单击“数据采集”和“电压曲线”，随着样品由室温升温到 420K，可测得如图二条曲线

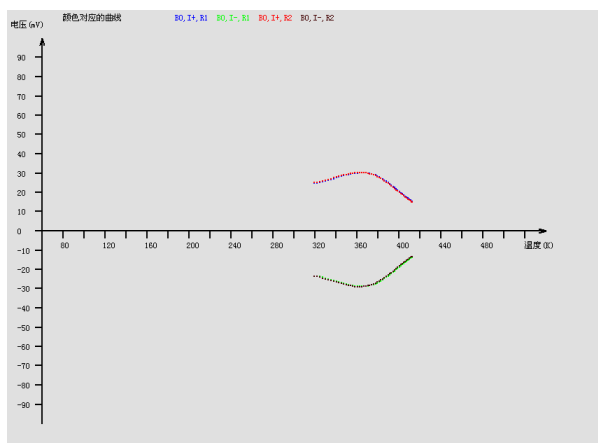


图 4 $U_H - T$ 曲线

5.3 霍尔系数随温度变化的曲线

由 $U_H - T$ 曲线的导数，可得霍尔系数随温度变化的曲线

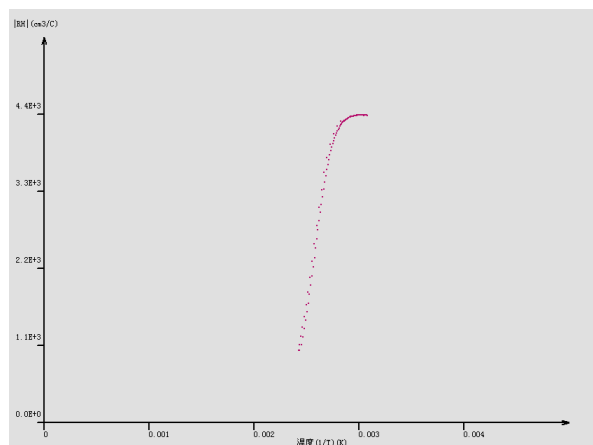


图 5 霍尔系数随温度变化曲线

5.4 电导率随温度变化的曲线

由 $U_\delta - T$ 曲线的导数，可得电导率随温度变化的曲线

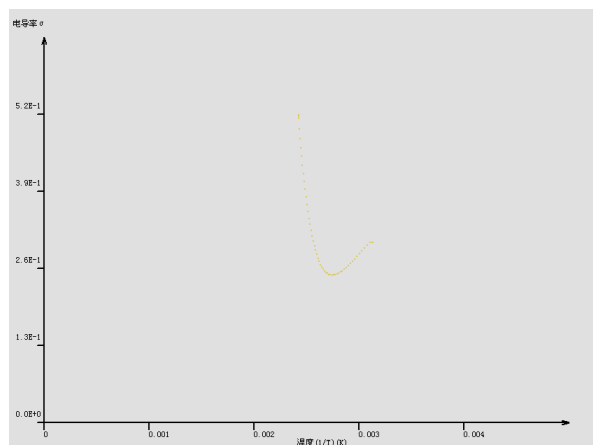


图 6 霍尔系数随温度变化曲线

6 思考题

6.1 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。

n 型半导体：电流是由电子携带的负电荷所贡献的。在霍尔电场中，正电荷偏向霍尔电流方向，负电荷则偏向相反方向。

对于 **p 型半导体：**电流方向，霍尔电场方向，和磁场方向成右手螺旋定则，而 n 型则存在一个反向。

6.2 霍尔系数的定义及其数学表达式是什么？从霍尔系数中可以求出哪些重要参数？

霍尔系数 (Hall coefficient) 是描述霍尔效应的重要参数，用于表征载流子在材料中的行为。霍尔

效应是在电流通过导体或半导体并垂直于电流方向施加磁场时, 垂直于电流和磁场方向上产生电势差 (霍尔电压) 的一种现象。

霍尔系数的定义

霍尔系数定义为单位磁场强度和单位电流密度下产生的霍尔电场强度。其数学表达式为:

$$R_H = \frac{E_H}{JB}$$

其中:

R_H 是霍尔系数, E_H 是霍尔电场强度, J 是电流密度, B 是磁场强度。

在实际测量中, 霍尔系数也可以通过测量霍尔电压 (V_H) 来计算, 其表达式为:

$$R_H = \frac{V_H t}{IB}$$

其中:

V_H 是霍尔电压, t 是样品的厚度 (对于薄膜材料), I 是电流, B 是磁场强度。

从霍尔系数中可以求出的重要参数通过霍尔系数, 可以求出以下重要参数:

1. 载流子浓度 (n): $n = \frac{1}{eR_H}$;
2. 载流子类型: 如果 R_H 为正, 载流子为空穴 (p 型); 如果 R_H 为负, 载流子为电子 (n 型)。
3. 霍尔迁移率 (μ_H): 霍尔迁移率是描述载流子在电场作用下运动中度的参数, $\mu_H = \frac{R_H \sigma}{q}$

6.3 霍尔系数测量中有哪些副效应, 通过什么方式消除它们? 你能想出消除爱廷豪效应的方法吗?

1. 塞贝克效应: 由于温差导致热电势产生, 影响霍尔电压测量。可以保持样品两端温度一致, 避免温度梯度; 使用交替电流而不是直流电流, 以消除由于温度变化引起的热电势。
2. 爱廷豪森效应: 在磁场中电流通过导体时产生的热流导致温差, 进而引起热电势。可以使用交替电流 (AC) 而不是直流电流 (DC) 来驱动电流, 交替电流可以消除由热效应引起; 也可以进行反向磁场测量, 即先在一个方向上测量霍尔电压, 然后将磁场方向反转再测量, 最后取两个测量值的平均值。

3. 楞次效应: 由于磁场变化导致的电磁感应产生感应电势。需要避免磁场的快速变化, 使磁场稳定; 进行反向磁场测量, 减小感应电势的影响。