

霍尔效应

唐延宇 PB22030853

2023 年 12 月 13 日

摘要

霍尔效应,即处在磁场中的半导体中通入与磁场方向垂直的电流时,可在与磁场方向、电流方向均垂直的方向上检测到电势差的现象. 本实验分别在励磁电流不变和样品电流不变的情形下测定了霍尔系数,同时测定并计算了样品的电导率、载流子浓度及迁移率,并绘制了锑化铟片样品的霍尔特性曲线,并对消除实验中的副效应进行了一些分析.

关键词: 霍尔效应 副效应 半导体

1 引言

1.1 实验背景

霍尔效应,是霍尔于 1879 年在他设计的一个通过运动载流子在外界磁场中的偏转状态来确定导体或半导体中载流子的类型的实验中发现的. 到了今天,霍尔系数与电导率已成为表征半导体材料性质的重要参量,利用它们便可以得到载流子浓度、载流子迁移率等重要参数. 利用霍尔效应制备的各种传感器件,也已广泛应用于工业自动化技术、检测技术、信息处理技术等各个领域. 由此可见,在今天,测定霍尔元件的霍尔系数,了解霍尔效应测试中的各类副效应及其消除方法有其价值和意义. [2]

1.2 实验原理

1.2.1 通过霍尔效应测量磁场

霍尔效应装置如图1所示. 将一个半导体薄片置于一个方向与之垂直的磁场中,且沿与之一条边平行的方向通入电流时,半导体中的载流子将受到洛伦兹力作用,其大小可写为:

$$F_B = quB \quad (1)$$

其中, q 为载流子所带电荷量, u 为载流子的迁移速率, B 为所加磁场的磁感应强度. 由图可知,不论载流子带典型如何,它均会沿 x 轴方向偏转,这将在 BB' 端形成电势差,进而产生电场,假设该电

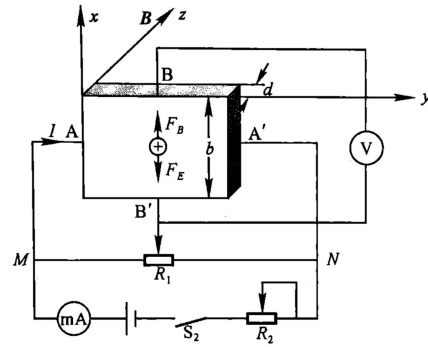


图 1: 霍尔效应实验原理图

场均匀,则载流子所受电场力可写为:

$$F_E = qE = -q \frac{\partial U}{\partial r} = q \cdot \frac{V_{BB'}}{b} \quad (2)$$

其中, b 为霍尔片沿 x 轴方向的线度, $V_{BB'}$ 为 BB' 两端的电势差. 随着 $V_{BB'}$ 不断增大,当电场力与磁场力大小相等、方向相反时,体系达到稳定平衡状态,此时有:

$$\begin{aligned} q \cdot \frac{V_{BB'}}{b} &= quB \\ \Rightarrow V_H = V_{BB'} &= buB \end{aligned} \quad (3)$$

V_H 即为霍尔电压,此时的电场称为霍尔电场,又根据电流强度的定义,有:

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = nqu \cdot bd \quad (4)$$

代入 (3) 式可得:

$$V_H = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} = R_H \cdot \frac{IB}{d} \quad (5)$$

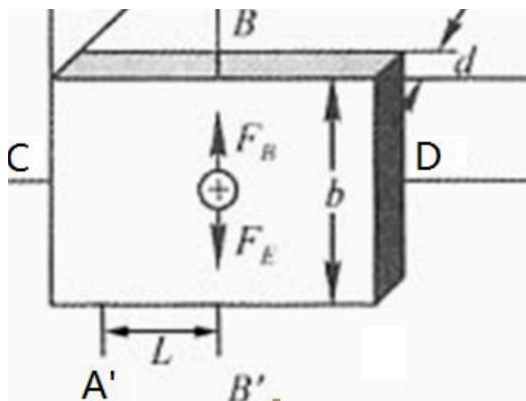


图 2: 电导率测量原理图

其中 $R_H = \frac{1}{nq}$ 即为霍尔系数。

载流子浓度及电导率测量原理如图2所示，零磁场下，测得 B'A' 电势差为 $V_{B'A'}$ ，则由欧姆定律，有：

$$V_{B'A'} = I \cdot \frac{1}{\sigma S} = \frac{IL}{\sigma bd} \quad (6)$$

其中 L 为 A'B' 间线度， $S = bd$ 为电流的横截面积，则有：

$$\sigma = \frac{LI_S}{bdV_{B'A'}} \quad (7)$$

$$n = \frac{1}{qR_H} \quad (8)$$

又由电导率定义：

$$\sigma = nq\mu \quad (9)$$

则载流子迁移率 μ 可如下测量：

$$\mu = \frac{\sigma}{nq} \quad (10)$$

1.2.2 霍尔效应中的副效应

查阅资料可知，霍尔效应中的副效应主要包括：

1. Ettingshausen 效应：实际载流子速率服从统计分布，从而在薄板两侧形成横向温差，导致温差电动势 V_E ，这一效应可通过使用交流电代替直流电测量来消除。
2. 其他副效应：如 Nernst 效应，Righi-Leduc 效应等。
3. 不等位电势：霍尔电极在霍尔片两侧的位置不可能绝对对称，可以采用电位器加以平衡。

值得注意的是，上述副效应中的 2, 3 均可通过对称测量法进行消除，即：在规定电流与磁场的正向后，测量如下四种组合的数据：

1. $+B, +I, V_H = V_1$
2. $-B, +I, V_H = V_2$
3. $+B, -I, V_H = V_3$
4. $-B, -I, V_H = V_4$

然后，取霍尔电压平均值

$$V_H = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |V_i| \quad (11)$$

即可。[1]

2 实验仪器与内容

2.1 实验仪器

本实验使用的仪器如下：恒流源；电磁铁（4100 Gs/A）；霍尔样品（参数： $d = 0.5 \text{ mm}$, $b = 4.0 \text{ mm}$, $L = 3.0 \text{ mm}$ ）和样品架；双刀双掷换向开关和接线柱；数字万用表；小磁针。

2.2 实验步骤

1. 用六脚霍尔片接好线路，确认两电流源均处于恒流模式；
2. 保持 I_M 不变，取 $I_M = \pm 0.45 \text{ A}$, $I_S = \pm 1.00 - 4.50 \text{ mA}$ (步长 0.50 mA)，测绘 $V_H - I_S$ 曲线，计算 R_H ；
3. 保持 I_S 不变，取 $I_S = \pm 4.50 \text{ mA}$, $I_M = \pm 0.10 - 0.45 \text{ A}$ (步长 0.05 A)，测绘 $V_H - I_M$ 曲线，计算 R_H ；
4. 在零磁场下，取 $I_S = 1.00 \text{ mA}$ ，测沿电流方向的电势差 $V_{B'A'}$ ；
5. 确定样品导电类型（判断 p/n 型），并求 n, σ, μ ；
6. 用四脚锑化铋片接好线路，取 $I_S = 1.00 \text{ mA}$, I_M 在 $0 - 0.800 \text{ A}$ 之间，测绘锑化铋片的 $V_H - I_M$ 曲线。

3 实验结果与讨论

由于数据较多，为免冗赘，原始数据在此不另表出，请参见报告后附的原始数据表格。

3.1 数据处理

3.1.1 励磁电流不变时, 测定霍尔系数

根据式 (11) 计算得到如表1数据:

表 1: $V_H - I_S$ 数据表

I_S (mA)	V_H (mV)
1	2.17
1.5	3.19
2	4.21
2.5	5.18
3	6.2
3.5	7.22
4	8.19
4.5	9.21

利用 Origin 拟合得到的 $V_H - I_S$ 曲线如图3所示.

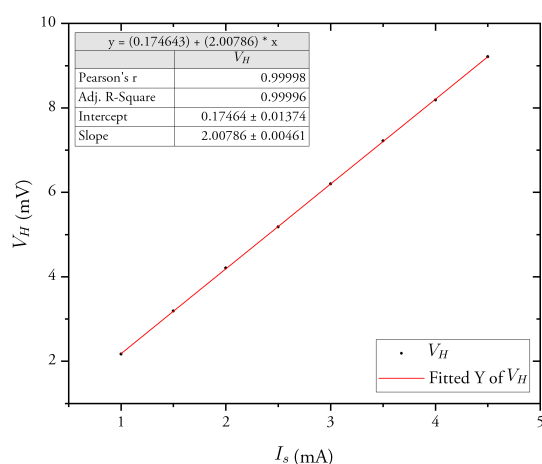


图 3: $V_H - I_S$ 拟合曲线图

由式 (5) 可知, 图线斜率即为 $R_H \frac{B}{d}$. 从图中可以看出, 拟合斜率为 2.00786 V/A, 皮尔逊相关系数 $r = 0.99998$, 拟合效果较优, 霍尔系数可计算如下:

$$\begin{aligned}
 R_H &= \frac{kd}{B} \\
 &= \frac{2.00786 \times 5 \times 10^{-4}}{4100 \times 0.45 \times 1 \times 10^{-4}} \\
 &= 5.44 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}
 \end{aligned} \quad (12)$$

3.1.2 样品电流不变时, 测定霍尔系数

根据式 (11) 计算得到如表2数据:

表 2: $V_H - I_M$ 数据表

I_M (A)	V_H (mV)
0.1	1.73
0.15	2.55
0.2	3.41
0.25	4.34
0.3	5.39
0.35	6.57
0.4	7.88
0.45	9.17

利用 Origin 拟合得到的 $V_H - I_M$ 曲线如图4所示.

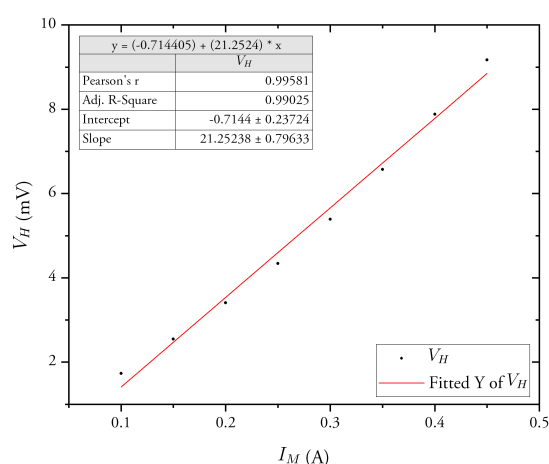


图 4: $V_H - I_M$ 拟合曲线图

从图中可以看出, 样品电流不变时, 拟合斜率为 21.25328 mV/A, 皮尔逊相关系数 $r = 0.99581$, 拟合效果良好, 由式 (5) 可知, 霍尔系数可计算如下:

$$\begin{aligned}
 R_H &= \frac{kd}{k_B I_S} \\
 &= \frac{21.25328 \times 5 \times 10^{-7}}{4100 \times 0.0045 \times 1 \times 10^{-4}} \\
 &= 5.76 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}
 \end{aligned} \quad (13)$$

3.1.3 样品电导率、载流子浓度及迁移率的计算

在零磁场、 $I_S = 1 \text{ mA}$ 下, 实验中测得 $V_{B'A'} = -62.65 \text{ mV}$, 则样品电导率为:

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{L I_S}{b d V_{B'A'}} \\
 &= \frac{3}{4 \times 0.5 \times 62.65 \times 1 \times 10^{-3}} \\
 &= 23.94 \text{ s/m}
 \end{aligned} \quad (14)$$

载流子浓度为:(判断可知载流子为电子,具体判断你过程请参见报告后附的原始数据记录表)

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{eR_H} \\ &= \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 5.44 \times 10^{-3}} \\ &= 1.15 \times 10^{21} \end{aligned} \quad (15)$$

载流子迁移率:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\sigma}{ne} \\ &= \frac{23.94}{1.15 \times 10^{21} \times 1.6 \times 10^{-19}} \\ &= 0.130 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s} \end{aligned} \quad (16)$$

3.1.4 铋化铜片 $V_H - I_M$ 曲线的绘制

实验所测数据如表3所示:

表 3: $V_H - I_M$ 数据记录表

$I_M(\text{A})$	$V_H(\text{V})$	$I_M(\text{A})$	$V_H(\text{V})$
0	0.00159	0.45	0.238
0.05	0.0402	0.5	0.252
0.1	0.0761	0.55	0.265
0.15	0.109	0.6	0.278
0.2	0.141	0.65	0.29
0.25	0.17	0.7	0.303
0.3	0.19	0.75	0.316
0.35	0.205	0.8	0.328
0.4	0.222		

利用光滑曲线连接散点得到的 $V_H - I_M$ 曲线如图5所示.

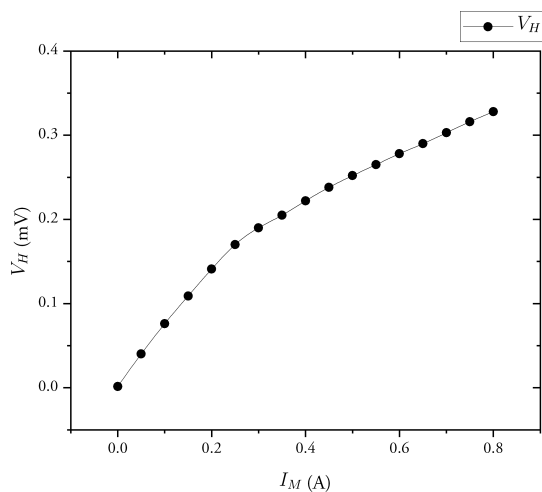


图 5: 铋化铜片 $V_H - I_M$ 图线

3.2 误差分析

由数据拟合结果可知,在本实验中,保持励磁电流不变时测得的数据线性程度相当高,且斜率拟合量的不确定度也较小,表明数据较为优良;但样品电流不变,而改变磁场时的结果却略微差些,经实验者分析,可能的误差来源有:

- 电流源的实际输出电流与调节的预计输出电路存在一定差异,而实验中直接将预计输出电流代入计算.由于样品电流较小,二者间的差异并不显著;而励磁电流数值较大,二者之间的差异可能给实验结果带来一定偏差;
- 调节励磁电流时,未待万用表示数稳定便记录数据.改变励磁电流时,由于磁场变化较大,给电路带来的变化较大,需要一段时间才能重新到达平衡.因此若开关甫一闭合便记录数据,便可能带来一定误差;
- 实验所用仪器存在一定程度的老化,接触点接触不良等仪器本身的误差.

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 霍尔效应 (实验讲义).
- [2] 谢行恕, 康士秀, 霍剑青主编. 大学物理实验第二册 (第 2 版). 北京: 高等教育出版社, 2005. pp.106-112.