

霍尔效应实验报告

姓名：熊逸飞

学号：PB24000048

学院：少年班学院

2025 年 11 月 14 日

摘要

本实验通过测量霍尔电压与样品电流和磁场强度的关系，验证了霍尔效应的基本原理，并利用最小二乘法对实验数据进行了线性拟合，得到了霍尔系数 $R_H = 1.06 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}$ 。此外，通过变温实验观察了霍尔电压随温度变化的规律。

关键词：霍尔效应；对称测量法；最小二乘法；变温实验

1 实验目的

- 了解霍尔效应原理以及有关霍尔器件对材料要求的知识；
- 学习用“对称测量法”消除副效应影响；
- 根据霍尔电压判断霍尔元件载流子类型；
- 计算载流子的浓度和迁移率。

2 实验原理

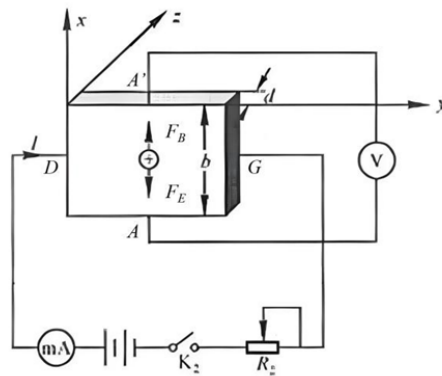


图 1 霍尔元件结构示意图

在如图所示的装置图中，将一个半导体薄片放在垂直于它的磁场 B 中，当沿 y 方向的电极 D 、 G 上施加电流 I 时，薄片内以平均速率 u 定向移动的载流子受到洛伦兹力 F_B 的作用

$$F_B = quB \quad (2.1)$$

无论载流子是负电荷还是正电荷, F_B 的方向均沿着 x 方向, 在磁力的作用下, 载流子发生偏移, 产生电荷积累, 从而在薄片 A 、 A' 两侧产生一个电位差 $V_{AA'}$, 形成一个电场 E 。电场使载流子又受到一个与 F_B 方向相反的电场力 F_E

$$F_E = qE = q \cdot \frac{V_{AA'}}{b} \quad (2.2)$$

其中 b 为薄片宽度, F_E 随着电荷累积而增大, 当达到稳定状态时 $F_E = F_B$, 即

$$quB = q \cdot \frac{V_{AA'}}{b} \quad (2.3)$$

这时在 A 、 A' 两侧建立的电场称为霍尔电场, 相应的电压称为霍尔电压, 电极 A 、 A' 称为霍尔电极。

另一方面, 设载流子浓度为 n , 薄片厚度为 d , 则电流强度 I 与 u 的关系为

$$I = bdnqu \quad (2.4)$$

由式 (2.3) 和式 (2.4) 可得到

$$V_{AA'} = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} \quad (2.5)$$

令 $R = \frac{1}{nq}$, 则

$$V_{AA'} = R \frac{IB}{d} \quad (2.6)$$

R 称为霍尔系数, 它体现了材料的霍尔效应大小。根据霍尔效应制作的元件称为霍尔元件。在应用中, 式 (2.6) 常以如下形式出现

$$V_{AA'} = K_H IB \quad (2.7)$$

式中 $K_H = \frac{R}{d} = \frac{1}{nqd}$ 称为霍尔元件灵敏度, I 称为控制电流。

由式 (2.7) 可见, 若 I 、 K_H 已知, 只要测出霍尔电压 $V_{AA'}$, 即可算出磁场 B 的大小; 并且若知载流子类型 (n 型半导体多数载流子为电子, p 型半导体多数载流子为空穴), 则由 $V_{AA'}$ 的正负可测出磁场方向, 反之, 若已知磁场方向, 则可判断载流子类型。

由于霍尔效应建立所需时间很短 ($10^{-12} \sim 10^{-14} \text{ s}$), 因此霍尔元件使用交流电或者直流电都可。指示交流电时, 得到的霍尔电压也是交变的, 式 (2.7) 中的 I 和 $V_{AA'}$ 应理解为有效值。

3 实验设计

在实际应用中, 伴随霍尔效应经常存在其他效应。例如实际中载流子迁移速率 u 服从统计分布规律, 速度小的载流子受到的洛伦兹力小于霍尔电场作用力, 向霍尔电场作用力方向偏转, 速度大的载流子受到磁场作用力大于霍尔电场作用力, 向洛伦兹力方向偏转。这样使得一侧高速载流子较多, 相当于温度较高, 而另一侧低速载流子较多, 相当于温度较低。这种横向温差就是温差电动势 V_E , 这种现象称为爱廷豪森效应。这种效应建立需要一定时间, 如果采用直流电测量时会因此而给霍尔电压测量带来误差, 如果采用交流电, 则由于交流变化快使得爱廷豪森效应来不及建立, 可以减小测量误差。

此外, 在使用霍尔元件时还存在不等位电动势引起的误差, 这是因为霍尔电极 A 、 A' 不可能绝对对称焊在霍尔片两侧产生的。由于目前生产工艺水平较高, 不等位电动势很小, 故一般可以忽略, 也可以用一个电位器加以平衡。

在实验中, 我们可以通过改变 I 和磁场 B 的方向消除大多数副效应。具体说在规定的电流和磁场正反方向后, 分别测量下列四组不同方向的 I 和 B 组合的 $V_{AA'}$, 即

$$\begin{aligned} +B +I & \quad V_{AA'} = V_1 \\ -B +I & \quad V_{AA'} = V_2 \\ -B -I & \quad V_{AA'} = V_3 \\ +B -I & \quad V_{AA'} = V_4 \end{aligned}$$

然后得到霍尔电压平均值

$$\bar{V} = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4} \quad (3.8)$$

实验所使用的六脚霍尔片参数如下

表 1 六脚霍尔片参数

宽度 b/mm	厚度 d/mm	电极间距离 l/mm
4.00	0.30	2.00

4 实验装置

恒流源, 电磁铁, 霍尔样品和样品架, 换向开关和接线柱, 数字万用表。

5 实验步骤

5.1 六脚霍尔片测量

1. 正确连接电路, 将六脚霍尔片接入电路中;
2. 保持励磁电流 $I_M = 0.45 \text{ A}$ 不变, 样品电流 I_S 分别取 $1.00, 1.50, \dots, 4.50 \text{ mA}$, 测绘 $V_H - I_S$ 曲线, 计算出 R_H ;
3. 保持样品电流 $I_S = 4.5 \text{ mA}$ 不变, 励磁电流 I_M 分别取 $0.100, 0.150, \dots, 0.450 \text{ A}$, 测绘 $V_H - I_M$ 曲线, 计算出 R_H ;
4. 在零磁场下, 取 $I_S = 1.00 \text{ mA}$, 测量沿电流方向电势差 V_{XX} ;
5. 确定样品导电类型 (判断 p/n 型), 求 R_H, n, σ, μ 。

5.2 变温霍尔效应测量

1. 连接电路, 将霍尔样品放入恒温箱中;
2. 保持励磁电流 $I_M = 0.80 \text{ A}$ 和样品电流 $I_S = 2.00 \text{ mA}$ 不变, 控制环境温度取 $-10 \sim 100^\circ\text{C}$, 测量霍尔电压随温度变化的数据;
3. 通过曲线拟合分析霍尔电压随温度变化的规律。

6 数据处理

6.1 六脚霍尔片参数

6.1.1 变化样品电流

保持励磁电流 $I_M = 0.45 \text{ A}$ 不变, 样品电流 I_S 分别取 1.00, 1.50, ..., 4.50 mA

表 2 霍尔电压与样品电流关系表

I_S/mA	V_{+B+I}/mV	V_{+B-I}/mV	V_{-B+I}/mV	V_{-B-I}/mV	\bar{V}/mV
4.46	2.82	-2.89	-4.64	4.56	3.73
3.97	2.51	-2.58	-4.11	4.06	3.32
3.51	2.23	-2.28	-3.64	3.59	2.94
2.99	1.90	-1.95	-3.11	3.06	2.51
2.50	1.59	-1.64	-2.61	2.57	2.10
2.04	1.30	-1.34	-2.14	2.09	1.72
1.54	0.98	-1.02	-1.62	1.59	1.30
1.05	0.67	-0.72	-1.13	1.09	0.90

使用最小二乘法对数据进行线性拟合

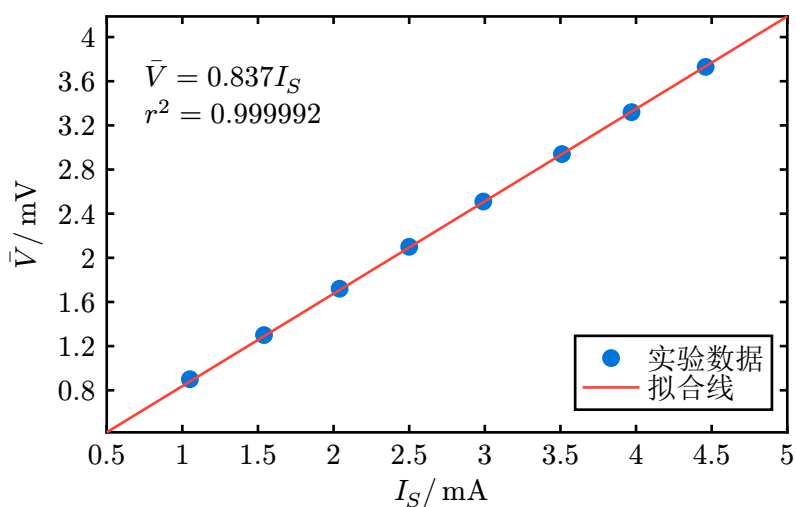


图 2 霍尔电压与样品电流关系图

得到霍尔电压与样品电流之间的线性关系为

$$\bar{V} = 0.837 I_S \quad (6.9)$$

且 $r^2 = 0.999992$, 说明最小二乘拟合线性关系可靠性很高。

实验所使用的电磁铁参数为 $k = 0.523 \text{ T/A}$, 本实验控制励磁电流 $I_M = 0.45 \text{ A}$ 不变, 即

$$B = k \cdot I_M = 0.235 \text{ T} \quad (6.10)$$

由式 (2.6) 得

$$\begin{cases} R_H = \frac{\bar{V}}{I_S} \cdot \frac{d}{B} = 1.07 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C} \\ n = \frac{1}{R_H e} = 5.85 \times 10^{21} / \text{m}^3 \end{cases} \quad (6.11)$$

6.1.2 变化励磁电流

保持样品电流 $I_S = 4.5 \text{ mA}$ 不变，励磁电流 I_M 分别取 0.100, 0.150, ..., 0.450 A,

表 3 霍尔电压与励磁电流关系表

I_M / A	V_{+B+I} / mV	V_{+B-I} / mV	V_{-B+I} / mV	V_{-B-I} / mV	\bar{V} / mV
0.449	2.83	-2.89	-4.60	4.55	3.72
0.400	2.42	-2.47	-4.20	4.15	3.31
0.350	2.03	-2.08	-3.75	3.69	2.89
0.300	1.58	-1.64	-3.35	3.30	2.47
0.250	1.19	-1.24	-2.90	2.85	2.05
0.200	0.75	-0.80	-2.52	2.46	1.63
0.150	0.36	-0.41	-2.07	2.02	1.22
0.100	-0.07	0.02	-1.68	1.63	0.85

使用最小二乘法对数据进行线性拟合

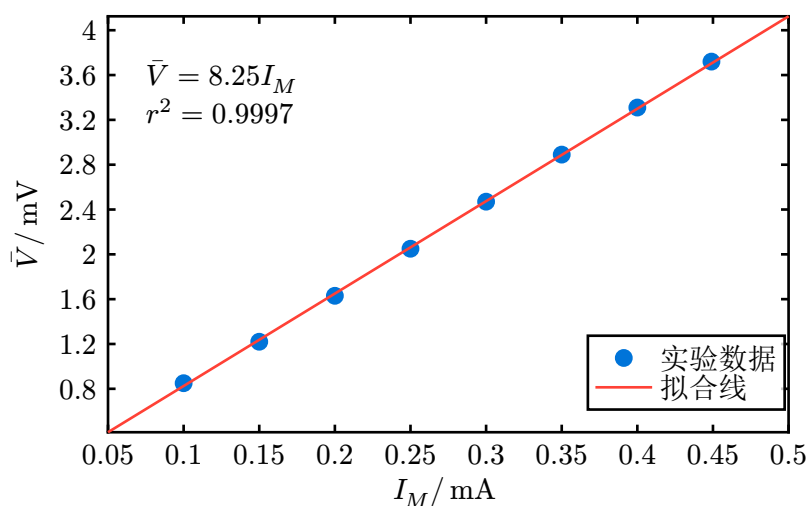


图 3 霍尔电压与励磁电流关系图

得到霍尔电压与励磁电流之间的线性关系为

$$\bar{V} = 8.25 I_M \quad (6.12)$$

且 $r^2 = 0.9997$ ，说明最小二乘拟合线性关系可靠性很高。

实验所使用的电磁铁参数为 $k = 0.523 \text{ T/A}$ ，本实验控制励磁电流 $I_S = 4.5 \text{ mA}$ 不变，由式 (2.6) 得

$$\begin{cases} R_H = \frac{\bar{V}}{I_M} \cdot \frac{d}{k I_S} = 1.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C} \\ n = \frac{1}{R_H e} = 5.94 \times 10^{21} / \text{m}^3 \end{cases} \quad (6.13)$$

由右手定则可知，载流子为正电荷，故该霍尔样品为 p 型半导体。

6.1.3 零磁场测量

断开电磁铁的电流，使霍尔样品处于零磁场下，取样品电流 $I_S = 1.05 \text{ mA}$ ，测量得到

$$V_{XX} = 74.9 \text{ mV} \quad (6.14)$$

由电导率定义，有

$$\sigma = \frac{1}{R_{XX}} \cdot \frac{l}{db} = \frac{I_S}{V_{XX}} \cdot \frac{l}{db} = 23.4 \text{ S/m} \quad (6.15)$$

又由 $\sigma = ne\mu$ ，有

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} = R_H \sigma = 2.48 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{V/s} \quad (6.16)$$

6.2 变温霍尔效应

保持励磁电流 $I_M = 0.80 \text{ A}$ 和样品电流 $I_S = 2.00 \text{ mA}$ 不变，控制环境温度取 $-10 \sim 100^\circ\text{C}$ ，测量霍尔电压随温度变化的数据

表 4 霍尔电压与温度关系表

$t/^\circ\text{C}$	-10	0	10	20	30	40
V/mV	0.273	0.235	0.200	0.170	0.145	0.123
$t/^\circ\text{C}$	50	60	70	80	90	100
V/mV	0.105	0.090	0.077	0.066	0.058	0.050

使用 $V = Ce^{-kt}$ 对数据进行拟合，得到拟合曲线如下：

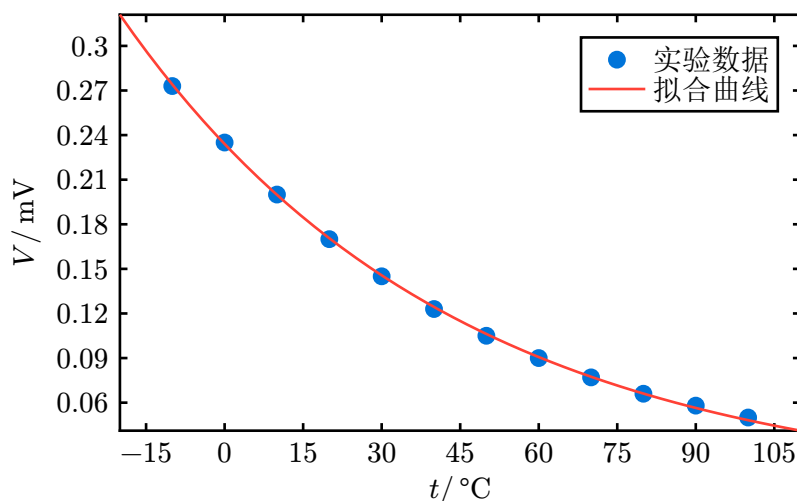


图 4 霍尔电压与温度关系图

得到拟合关系为

$$V = 0.234e^{-0.0158t} \quad (6.17)$$

可以看出，霍尔电压随温度升高呈指数下降趋势。

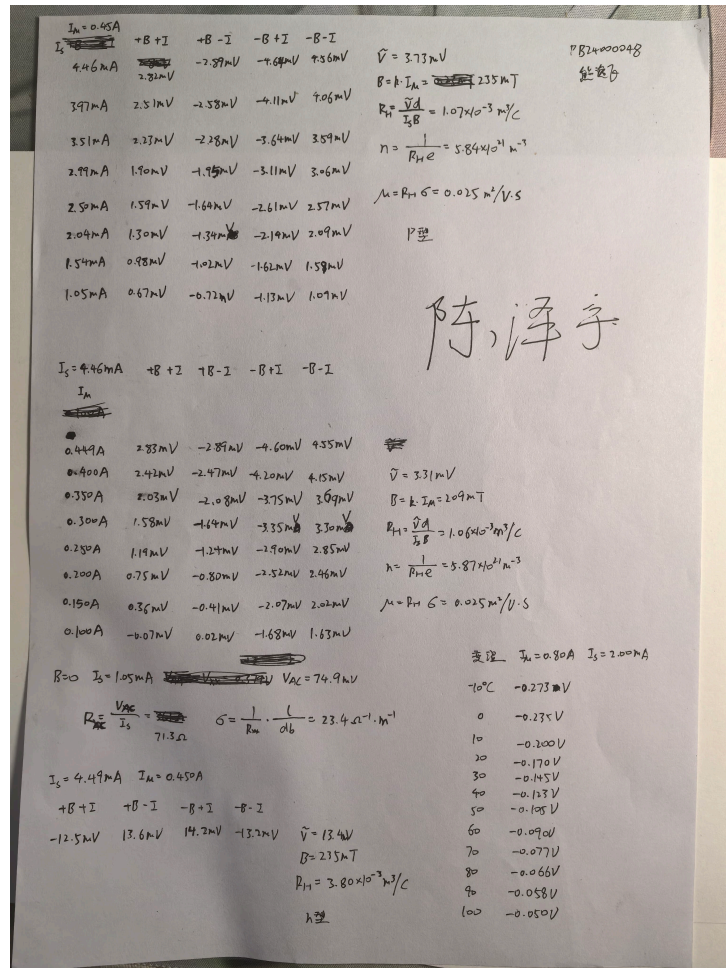
7 结论

本实验通过测量六脚霍尔片在不同样品电流和励磁电流下的霍尔电压，利用最小二乘法对数据进行线性拟合，计算出霍尔系数 $R_H = 1.06 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}$ ，载流子浓度 $n = 5.89 \times 10^{21} / \text{m}^3$ ，电导率 $\sigma = 23.4 \text{ S/m}$ ，迁移率 $\mu = 2.48 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{V/s}$ ，并判断出该霍尔样品为 p 型半导体。同时，测量了霍尔电压随温度变化的关系，发现霍尔电压随温度升高呈指数下降趋势。

参考文献

- [1] 张增明, 大学物理实验, 第1版. 北京: 高等教育出版社, 2024.
[2] 《霍尔效应(实验讲义)》. 2025 年.

附录



实验原始数据