

霍尔效应实验及磁阻测量

院 系: 自动化系

班 级: 自 02 班

学生姓名: 彭程

学 号: 2020011075

组 号: 双四下 L

座 位 号: # 5

目录

1 实验名称	2
2 实验目的	2
3 实验原理	2
3.1 霍尔效应	2
3.2 霍尔效应的副效应	3
3.3 磁电阻效应原理	3
4 实验仪器	3
5 实验步骤	4
6 数据处理	4
6.1 测量霍尔片输出电压 U_H 与输入电流 I 的关系曲线	4
6.2 判断霍尔片的载流子类型	6
6.3 标定激励电流 I_M 与磁极间磁场 B 的关系	7
6.4 测定磁极间隙水平方向磁场的分布曲线 $B \sim x$	8
6.5 测量霍尔片中的载流子迁移率 μ	9
6.6 研究锑化铟磁阻器件的磁电阻效应	10
7 实验小结	12
8 实验原始数据	14

1 实验名称

霍尔效应实验及磁阻测量

2 实验目的

1. 了解霍尔效应的产生原理以及副效应的产生原理；
2. 掌握霍尔系数的测量方法，学习消除霍尔副效应的实验方法；
3. 研究半导体材料的电阻值随磁场的变化规律。

3 实验原理

3.1 霍尔效应

如下图所示为霍尔效应产生的模型简化与简要分析：

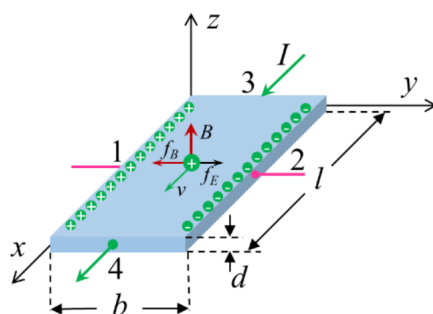


图 1: 霍尔效应模型

在如图所示的位置加上磁场后，在载流子收到的洛伦兹力和电场力达到平衡时，1、2 点间产生电位差。这个电位差与电流强度 I 及磁感应强度 B 均成正比，与板的厚度 d 成反比，即

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$$

其中 U_H 为霍尔电压， R_H 为霍尔系数， $K_H = R_H/d$ 为霍尔片的灵敏度。而洛伦兹力和电场力达到平衡状态时有 $f_B = f_E$ ，即 $evB = eE = eU_H/b$ 。于是 1、2 两点间的电位差为：

$$U_H = vbB$$

而电流为：

$$I = nevbd$$

所以有：

$$U_H = \frac{IB}{ned}$$

可以得到霍尔系数及霍尔片的灵敏度为：

$$R_H = \frac{1}{ne}$$
$$K_H = \frac{R_H}{d}$$

3.2 霍尔效应的副效应

除霍尔效应外，还有一些副效应与霍尔效应一同发生，会导致霍尔电压的测量产生误差，因此应当在实验过程中尽量消除这些效应的影响。

1. 厄廷好森 (Etinghausen) 效应引起的电位差 U_E
2. 能斯特 (Nernst) 效应引起的电位差 U_N
3. 里纪-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应引起的电位差 U_R
4. 不等位效应引起的电位差 U_0
5. 附加电压 U_S

当 I 、 B 确定后，霍尔片的输出电压为上述几项的代数和：

$$U = f(U_H, U_E, U_N, U_R, U_0, U_S)$$

通过改变工作电流 I 的方向和外加磁场 B 的方向的不同组合测量可以消除或减少 U_N 、 U_R 和 U_0 的影响。重点是消除不等位效应 U_0 。

3.3 磁电阻效应原理

设磁阻器件在零磁场时电阻及电阻率分别为 $R(0)$ 、 $\rho(0)$ ，磁场为 B 时电阻及电阻率分别为 $R(B)$ 、 $\rho(B)$ 。一般正常磁阻器件的 $\Delta R/R(0)$ 在弱磁场条件下正比于 B^2 ，而强磁场条件下 $\Delta R/R(0)$ 则正比于 B 。对于实验所用器件， $B \leq 0.06T$ 可看作弱磁场条件， $B \geq 0.12T$ 可看作强磁场条件。

4 实验仪器

1. 万用表
2. 霍尔元件磁阻元件及电磁铁 (仪器编号：110832)
3. 电流源

相关参数：

励磁电流： $I_M = 0 \sim 1000\text{mA}$

工作电流： $I_S = 1.5 \sim 10\text{mA}$

霍尔片尺寸： $300 \times 100 \times 3\mu\text{m}$

当 $I_M = 500\text{mA}$ 时，磁极中心磁感应强度 $B = 131.4\text{mT}$

5 实验步骤

1. 设计电路，画出完整电路图；
2. 测量霍尔片输出电压 U_H 与输入电流 I 的关系曲线，计算有关的霍尔片参数；
3. 判断霍尔片的载流子类型；
4. 标定激励电流 $I_M(0 \sim 800mA)$ 与磁极间磁场 B 的关系；
5. 测定磁极间隙水平方向磁场的分布曲线 $B \sim x$ ；
6. 测量霍尔片中载流子的迁移率 μ ；
7. 研究铽化钢磁阻器件的磁电阻效应

6 数据处理

霍尔效应实验电路设计如下：

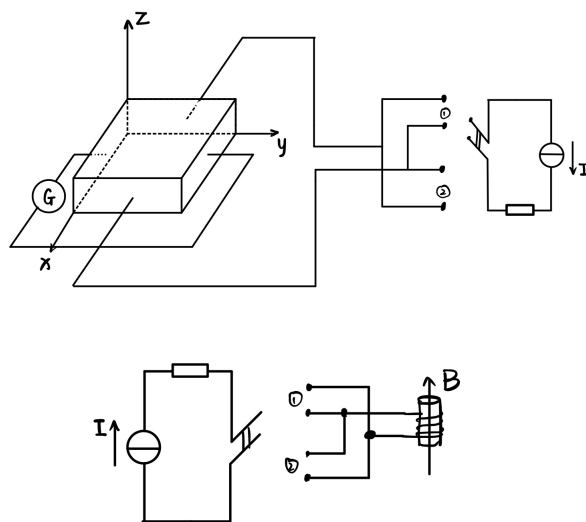


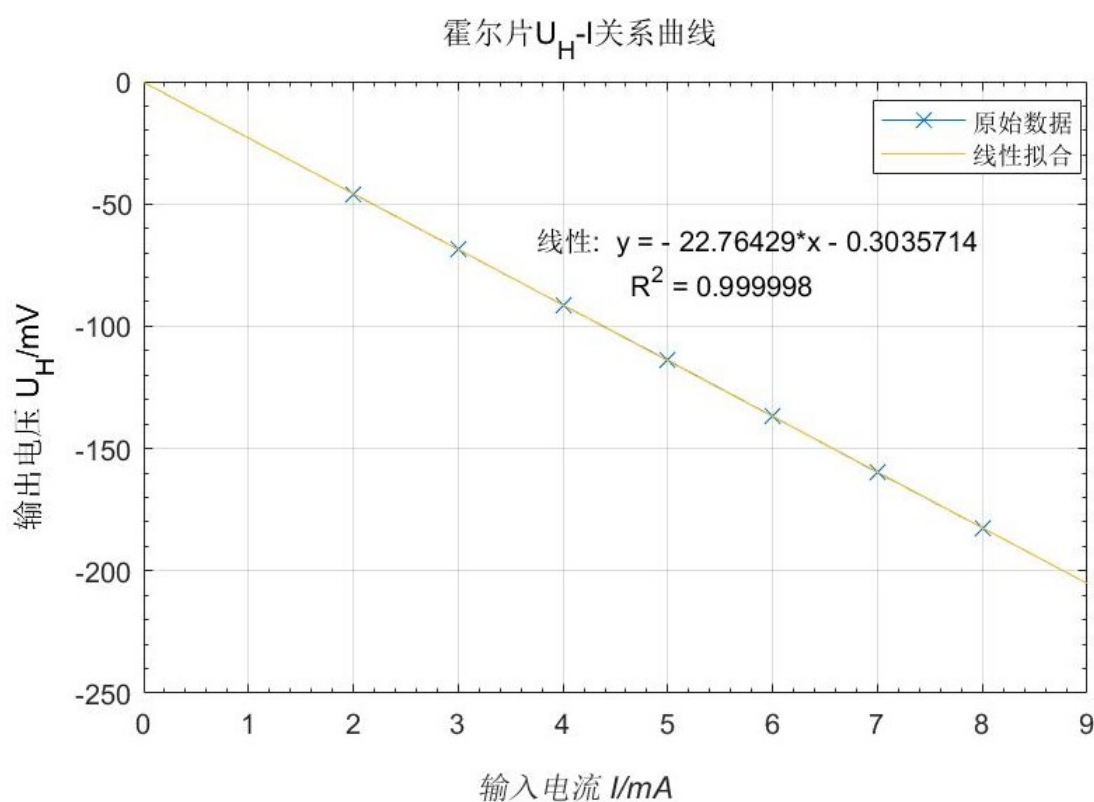
图 2: 霍尔效应实验电路图

6.1 测量霍尔片输出电压 U_H 与输入电流 I 的关系曲线

实验中测量数据整理如下表所示：

I(mA)	$U_1(mV)$	$U_2(mV)$	$U_3(mV)$	$U_4(mV)$	$U_H(mV)$
2.00	-46.1	46.0	-45.7	45.7	-45.88
3.00	-68.9	68.8	-68.4	68.4	-68.63
4.00	-91.7	91.6	-91.1	91.0	-91.35
5.00	-114.5	114.2	-113.7	113.6	-114.00
6.00	-137.5	137.1	-136.5	136.3	-136.85
7.00	-160.6	160.0	-159.4	159.0	-159.75
7.30	-183.5	182.5	-182.1	181.6	-182.43

对上述数据进行线性拟合，得到关系曲线及拟合关系如下所示：



根据线性拟合关系，相关系数 $R^2 = 0.999998$ ，表明线性相关系数强，拟合直线斜率 $k \approx -22.76(V/A)$ 。

由此计算霍尔片灵敏度：

$$K_H = \frac{U_H}{IB} = \frac{k}{B} = \frac{-22.76}{131.4 \times 10^{-3}} = -173.21 \Omega/T$$

霍尔系数为：

$$R_H = K_H \cdot d = 173.21 \times 3 \times 10^{-6} = -5.1963 \times 10^{-4} \Omega \cdot m/T$$

载流子浓度为：

$$n = \frac{1}{R_H e} = \frac{1}{5.1963 \times 10^{-4} \times 1.602 \times 10^{-19}} = 1.2013 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$$

计算拟合斜率不确定度:

$$s_k = t_p(n-2)|k| \sqrt{\frac{r^{-2}-1}{n-2}} = 2.57 \times 22.76 \times \sqrt{\frac{0.999998^{-2}-1}{7-2}} = 0.052 \text{ V/A}$$

计算 K_H 不确定度:

$$\Delta K_H = \frac{1}{B_0} s_k = \frac{0.052}{131.4 \times 10^{-3}} = 0.40 \text{ V/(A} \cdot \text{T)}$$

计算 R_H 不确定度:

$$\Delta R_H = \Delta K_H d = 0.395 \times 3 \times 10^{-6} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{C}$$

计算载流子浓度 n 不确定度:

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial R_H}\right)^2 (\Delta R_H)^2} = n \frac{\Delta R_H}{R_H} = 1.2013 \times 10^{22} \times \frac{1.18 \times 10^{-6}}{5.1936 \times 10^{-4}} = 2.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

由计算结果可得各物理量的最终结果为:

$$\text{霍尔片灵敏度 } K_H = (-173.21 \pm 0.40) \text{ V/(A} \cdot \text{T)}$$

$$\text{霍尔系数 } R_H = (-5.196 \pm 0.012) \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{C}$$

$$\text{载流子浓度 } n = (1.2013 \pm 0.0027) \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$$

该实验部分的思考题：如何测量不等位电压？

解答：

由于制作工艺限制, 1、2 两点不处于同一等位线上, 因此在磁场 B 不存在时, 1、2 两点间也存在电位差 U_0 , 此即不等位效应。若需观测不等位效应, 可设置励磁电流 $I_M = 0$, 记录该工作条件下的霍尔电压 U_H , 即为该工作电流下对应的不等位电压。

6.2 判断霍尔片的载流子类型

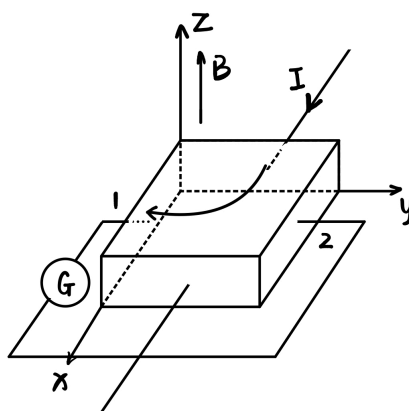


图 3: 载流子类型示意图

霍尔片载流子应为电子，霍尔片材质为 N 型半导体。

如上图所示，当测量值为 U_1 时，即 $+B+I$ 时，测得 $U_H < 0$ 。根据左手定则判断此时载流子应当在 1 处聚集，而这样导致 1 处电位低于 2 处，说明载流子为电子，即霍尔片材质为 N 型半导体。

6.3 标定激励电流 I_M 与磁极间磁场 B 的关系

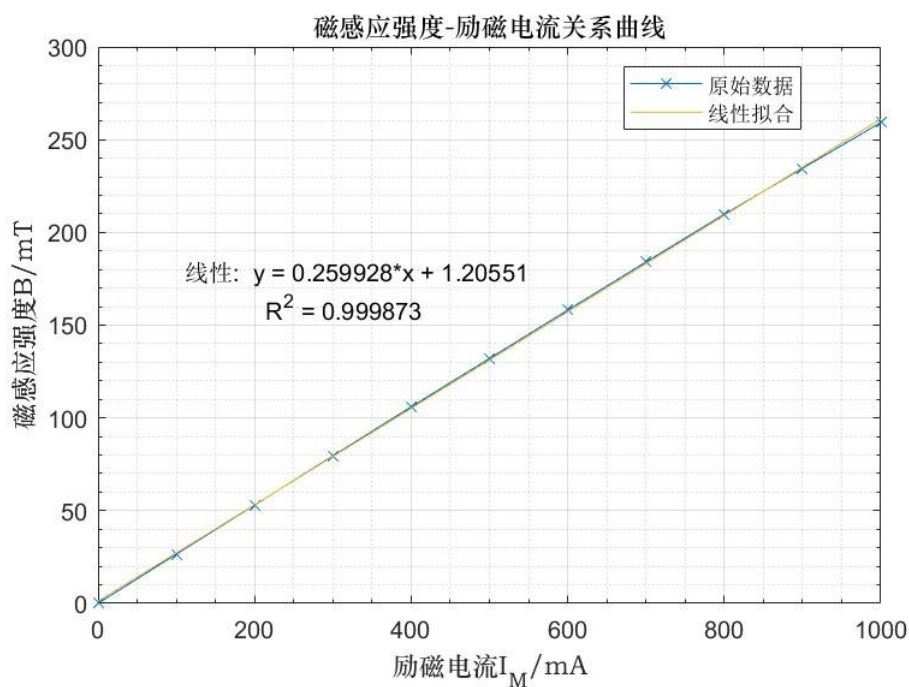
I_M/mA	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	$U_H(mV)$	$B(mT)$
100	-18.9	18.6	-18.1	18.0	-18.4	26.6
200	-37.1	37.0	-36.5	36.4	-36.8	53.0
300	-55.6	55.3	-54.8	54.7	-55.1	79.5
400	-74.0	73.6	-73.1	73.0	-73.4	106.0
500	-91.8	91.7	-91.2	91.2	-91.5	132.0
600	-109.9	109.8	-109.2	109.3	-109.6	158.1
700	-127.9	127.8	-127.2	127.2	-127.5	184.1
800	-145.6	145.6	-145.0	145.1	-145.3	209.8
900	-162.8	162.8	-162.1	162.3	-162.5	234.5
1000	-179.9	179.9	-179.2	179.4	-179.6	259.2

其中, U_H 、 B 的计算公式分别为:

$$U_H = \frac{1}{4} \times (U_1 - U_2 + U_3 - U_4)$$

$$B = \frac{U_H}{K_H I} = \frac{U_H}{-173.21 \times 4 \times 10^{-3}}$$

对上述数据进行线性拟合，得到关系曲线及拟合关系如下所示：



线性拟合所得直线为 $B = 0.2599I_M + 1.2055$ ，相关系数 $R^2 = 0.9999987$ ，表明线性相关系数强，与理论分析相符。

6.4 测定磁极间隙水平方向磁场的分布曲线 $B \sim x$

实验测量结果如下表所示 ($I_S = 4.00mA$, $I_M = 500mA$)。

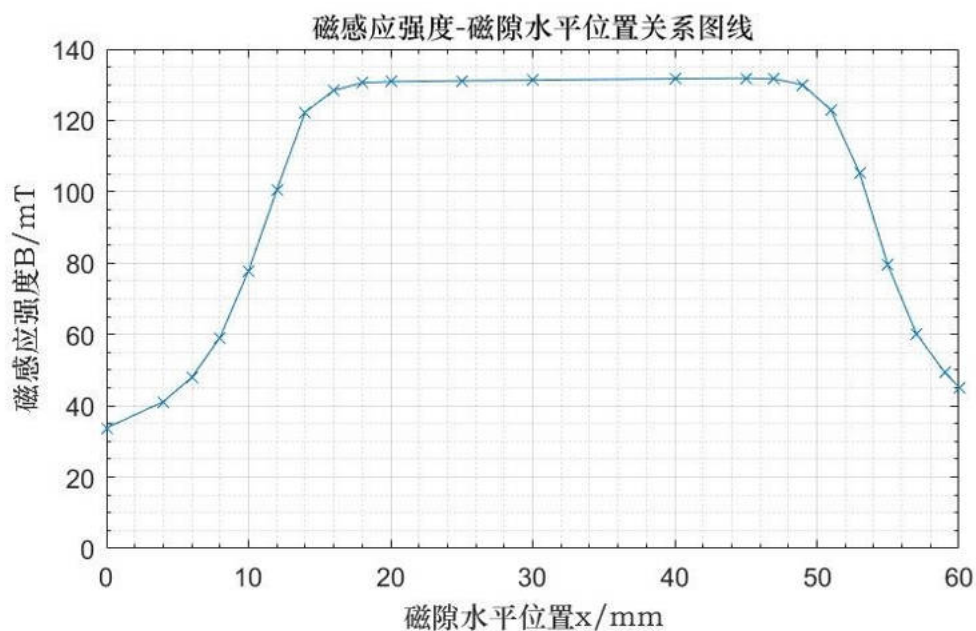
x/mm	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	$U_H(mV)$	$B(mT)$
0.0	-23.8	23.6	-23.2	23.0	-23.4	33.8
4.0	-28.9	28.7	-28.3	28.1	-28.5	41.1
6.0	-33.6	33.4	-33.0	32.8	-33.2	47.9
8.0	-41.4	41.2	-40.7	40.6	-41.0	59.1
10.0	-54.3	54.2	-53.7	53.6	-54.0	77.9
12.0	-69.9	69.9	-69.4	69.4	-69.7	100.5
14.0	-85.1	85.0	-84.5	84.5	-84.8	122.4
16.0	-89.3	89.2	-88.7	88.7	-89.0	128.4
18.0	-90.8	90.7	-90.2	90.1	-90.5	130.5
20.0	-91.0	90.9	-90.4	90.4	-90.7	130.9
25.0	-91.2	91.1	-90.6	90.5	-90.9	131.1
30.0	-91.3	91.2	-90.7	90.7	-91.0	131.3
40.0	-91.6	91.5	-91.0	90.9	-91.3	131.7
45.0	-91.7	91.6	-91.1	91.0	-91.4	131.8
47.0	-91.6	91.4	-90.9	90.9	-91.2	131.6
49.0	-90.4	90.3	-89.8	89.8	-90.1	130.0
51.0	-85.5	85.4	-84.9	84.8	-85.2	122.9
53.0	-73.3	73.3	-72.8	72.6	-73.0	105.4
55.0	-55.5	55.3	-54.8	54.6	-55.1	79.5
57.0	-42.1	42.0	-41.5	41.4	-41.8	60.3
59.0	-34.6	34.4	-34.0	33.8	-34.2	49.4
60.0	-31.7	31.5	-31.1	30.9	-31.3	45.2

其中, U_H 、 B 的计算公式分别为:

$$U_H = \frac{1}{4} \times (U_1 - U_2 + U_3 - U_4)$$

$$B = \frac{U_H}{K_{HI}} = \frac{U_H}{-173.21 \times 4 \times 10^{-3}}$$

根据上表，作出磁感应强度与水平磁隙 $B \sim x$ 关系图线如下图所示：



根据图线可得出，在 $18.0\text{mm} \leq x \leq 49.0\text{mm}$ 范围内，磁感应强度稳定。计算得均匀磁场区间长度为 31.0mm 。

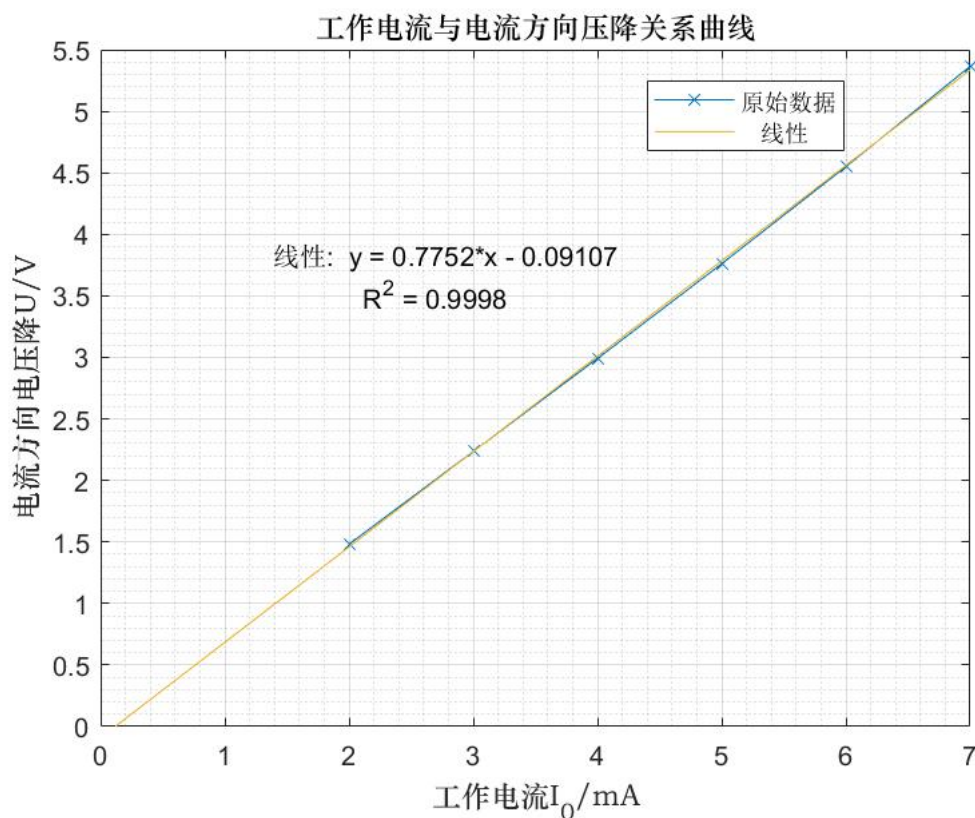
根据该区域内的磁感应强度取平均值，可得 $\bar{B} = 131.1\text{mT}$ 。

6.5 测量霍尔片中的载流子迁移率 μ

实验测量结果如下表所示 ($I_M = 0\text{mA}$)。

I_S/mA	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
U/V	1.481	2.236	2.991	3.761	4.550	5.365

将上表数据进行线性拟合结果如下：



将上述测量结果拟合成直线线性拟合所得直线为 $U = 0.7752I_s - 0.09107$ ，相关系数 $R^2 = 0.9998$ ，表明线性相关系数强。

根据上述拟合结果，可以得到：

$$\frac{U}{I} = k = 0.7752 \times 10^3 \Omega$$

而通入电流方向场强：

$$E = \frac{U}{l}$$

载流子平均运动速率：

$$v = \frac{I}{neS} = \frac{|K_H| I}{b}$$

所以霍尔元件载流子迁移率 μ 为：

$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{|K_H| Il}{bU} = \frac{|K_H| l}{bk} = \frac{173.21 \times 300 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-6} \times 0.775 \times 10^3} = 0.670 \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$$

6.6 研究锑化铟磁阻器件的磁电阻效应

实验测量结果如下表所示 ($I_S = 4.00 \text{ mA}$, $I_M = 500 \text{ mA}$)

$I_M(mA)$	$U_{CD}(V)$	$B(mT)$	$R(B)(\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$	$\Delta R/R(0)$
0	0.4176	1.206	278.4000	0.00	0.0000
50	0.4212	14.201	280.8000	2.40	0.0086
100	0.4303	27.196	286.8667	8.47	0.0304
150	0.4450	40.191	296.6667	18.27	0.0656
200	0.4641	53.186	309.4000	31.00	0.1114
250	0.4847	66.181	323.1333	44.73	0.1607
300	0.5083	79.176	338.8667	60.47	0.2172
350	0.5336	92.171	355.7333	77.33	0.2778
400	0.5582	105.166	372.1333	93.73	0.3367
500	0.6003	131.156	400.2000	121.80	0.4375
600	0.6310	157.146	420.6667	142.27	0.5110
700	0.6550	183.136	436.6667	158.27	0.5685
800	0.6757	209.126	450.4667	172.07	0.6181
900	0.6957	235.116	463.8000	185.40	0.6659
1000	0.7150	261.106	476.6667	198.27	0.7122

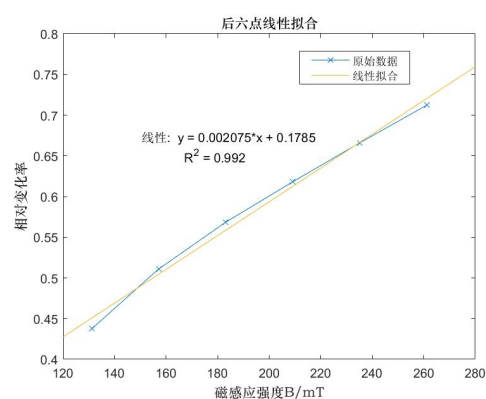
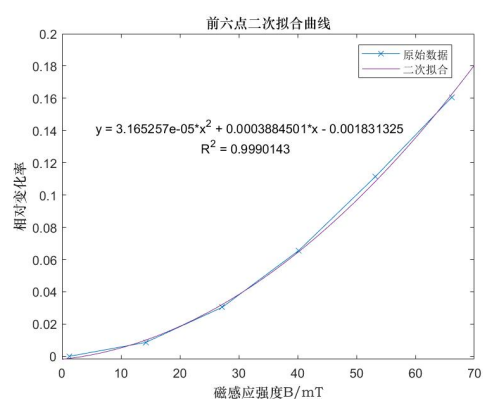
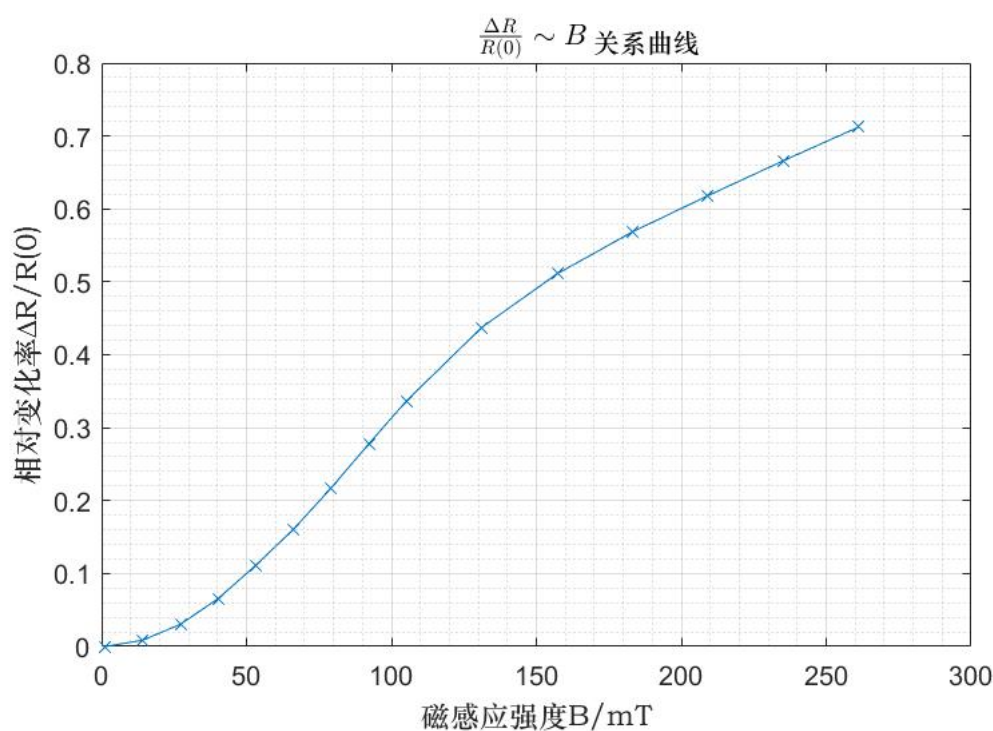
其中, U_{CD} 为利用万用表电压档直接测得, 其他数据的计算公式为: 磁感应强度为 B 时, 磁阻器件的等效电阻:

$$R(B) = \frac{U_{CD}}{I_{CD}} = \frac{U_{CD}}{1.5 \times 10^{-3} A}$$

ΔR 表示上述等效电阻与 $R(0)$ 之差 $\Delta R = R(B) - R(0)$, 比值表示为 $\Delta R/R(0)$ 。磁感应强度 B 根据 6.3 中拟合所得直线计算得出:

$$B = 0.2599I_M + 1.2055$$

作出磁感应强度与电阻比值 $\frac{\Delta R}{R(0)} \sim B$ 关系图线如下图所示:



根据实验讲义, 当 $0 \leq B \leq 60\text{mT}$ 时, $\Delta R/R(0) \propto B^2$, 大致对应上图中前 6 个数据点, 符合二次函数关系曲线; 当 $B \geq 120\text{mT}$ 时, $\Delta R/R(0) \propto B$, 大致对应上图中后 6 个数据点, 符合一次函数关系曲线。对上述数据进行拟合, 计算得前 6 个点的相关系数 $R_2 = 0.9990$, 二次函数关系理想; 后 6 个点的相关系数 $R_2 = 0.992$, 线性关系理想, 实验结果与理论分析相符。

7 实验小结

本次实验随测量数据较多, 但原理并不复杂, 且各组测量之间设计巧妙, 相互关联, 在认真预习的基础上, 实验过程较为顺利, 且有很多收获:

1. 对霍尔效应有了新的认知。高中阶段霍尔效应的内容, 是基于载流子按平均速度运动的模型导出的, 且不涉及各副效应影响。本次实验使我了解到载流子在霍尔元件中存在速度差异, 且由于

热流等因素会影响霍尔片输出电压，需要对理论模型和实验测量进行修正。认识到了实际物理体系的复杂性。

2. 学习消除副效应的方法。实验中，若待测量上叠加一系统误差，在改变实验条件时，误差与待测量大小不变而符号改变，且遵循不同的变化规律。可在改变实验条件时测量多组待测量，通过加减平均，保留待测量而抵消系统误差的影响；

3. 设计合理的实验过程。本实验需要改变 B 、 I 的方向。由于通过励磁电流 I_M 换向改变 B 的方向时，由于电流较大，加上线圈电感效应的影响，容易产生电火花，因此应先对工作电流 I 换向，再对 I_M 换向，最后再对 I 换向。

最后，感谢老师的悉心指导！

8 实验原始数据

班别 2020011075 双回下 L #5

仪器编号: 110832

霍尔效应实验数据记录表

1. 测量霍尔片有关参数 $I_M = 5.00 \text{ mA}$ 时中心磁场: $B = 131.4 \text{ mT}$.

I/mA	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	U_H/mV	$R_H(\text{m}^3/\text{C})$
2.00	-46.1	46.0	-45.7	45.7		
3.00	-68.9	68.8	-68.4	68.4		
4.00	-91.7	91.6	-91.1	91.0		
5.00	-114.5	114.2	-113.7	113.6		
6.00	-137.5	137.1	-136.5	136.3		
7.00	-160.6	160.0	-159.4	159.0		
8.00	-183.5	182.5	-182.1	181.6		

2. 判断霍尔片的载流子类型

在 $+B + I$ 时 U_H 为负, 故为电子.

3. 标定电磁铁磁隙间电场 $I_0 = 4.00 \text{ mA}$

I_M/mA	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	U_H/mV	B/mT
0	-0.6	0.5	0.5	-0.7		
100	-18.9	18.6	-18.1	18.0		
200	-37.1	37.0	-36.5	36.4		
300	-55.6	55.3	-54.8	54.7		
400	-74.0	73.6	-73.1	73.0		
500	-91.8	91.7	-91.2	91.2		
600	-109.9	109.8	-109.2	109.3		
700	-127.9	127.8	-127.2	127.2		
800	-145.6	145.6	-145.0	145.1		
900	-162.8	162.8	-162.1	162.3		
1000	-179.9	179.9	-179.2	179.4		

4. 测定磁极间隙磁场分布 $I_0 = 4.00 \text{ mA}$ $I_M = 500 \text{ mA}$.

x/mm	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	U_H/mV	B/mT
0.0	-23.8	23.6	-23.2	23.0		
4.0	-28.9	28.7	-28.3	28.1		
6.0	-33.6	33.4	-33.0	32.8		
8.0	-41.4	41.2	-40.7	40.6		
10.0	-54.3	54.2	-53.7	53.6		
12.0	-69.9	69.9	-69.4	69.4		
14.0	-85.1	85.0	-84.5	84.5		
16.0	-89.3	89.2	-88.7	88.7		
18.0	-90.8	90.7	-90.2	90.1		
20.0	-91.0	90.9	-90.4	90.4		

x/mm	U_1/mV	U_2/mV	U_3/mV	U_4/mV	U_H/mV	B/mT
25.0	-91.2	91.1	-90.6	90.5		
30.0	-91.3	91.2	-90.7	90.7		
40.0	-91.6	91.5	-91.0	90.9		
45.0	-91.7	91.6	-91.1	91.0		
47.0	-91.6	91.4	-90.9	90.9		
49.0	-90.4	90.3	-89.8	89.8		
51.0	-85.5	85.4	-84.9	84.8		
53.0	-73.3	73.3	-72.8	72.6		
55.0	-55.5	55.3	-54.8	54.6		
57.0	-42.1	42.0	-41.5	41.4		

59.0 -34.6 34.4 -34.0 33.8
60.0 -31.7 31.5 -31.1 30.9

5. 测量霍尔片载流子迁移率 $l = 300 \mu\text{m}$ $b = 100 \mu\text{m}$

I_0/mA	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
U/V	1.481	2.236	2.991	3.761	4.550	5.365

6. 磁电阻特性测量 $I_{CD} = 1.50 \text{ mA}$

I_M/mA	U_{CD}/V
0	0.4176
50	0.4212
100	0.4303
150	0.4450
200	0.4641
250	0.4847
300	0.5083
350	0.5336
400	0.5582
500	0.6003
600	0.6310
700	0.6550
800	0.6757
900	0.6957
1000	0.7150

董志浩 (5)
4028