

六脚霍尔片及锑化铟片的霍尔效应和相关特性测量实验

作者：刘昆承，学号：PB23020532

摘要：

本实验研究了霍尔效应，通过测量六脚霍尔片的霍尔系数、横向电导率、载流子类型、浓度和迁移率等电学特性，分析其在半导体材料中的应用。实验采用对称测量法，消除副效应的影响。结果显示，六脚霍尔片的霍尔电压与磁场强度之间呈现良好的线性关系，霍尔系数为 $R_H = 7.60 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{C}$ 。六脚霍尔片导电类型为 N 型。在零磁场下，测得电导率为 $\sigma = 21.914 \text{S}/\text{m}$ ，载流子浓度为 $n = 8.22 \times 10^{20}$ ，迁移率为 $\mu = 0.167 \text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。实验结果验证了霍尔效应在半导体材料分析中的有效性和可靠性。锑化铟片导电类型为 P 型，其霍尔电压在磁场强度较小时， $V_H - I_M$ 为二次曲线。在磁场强度较大时 $V_H - I_M$ 为线性关系。

关键词：

霍尔效应 爱廷豪森效应 锑化铟 横向电导率 载流子迁移率

1 引言

霍尔效应^[1]是指在磁场作用下，载流子在导体或半导体中产生横向电势差的现象。自 1879 年由美国物理学家埃德温·霍尔（Edwin Hall）首次发现以来，霍尔效应在材料科学和固体物理领域中具有重要的理论和应用价值。它不仅为我们提供了研究载流子运动的有力工具，还广泛应用于磁场传感器、霍尔元件等领域。

本实验旨在通过研究霍尔效应，测量半导体材料的霍尔系数、横向电导率、载流子类型和迁移率等参数，进而分析样品的电学特性。实验还采用了对称测量法以消除实验中的副效应，如爱廷豪森效应、能斯特效应等，确保结果的精确性。同时，通过测量锑化铟片的霍尔电压与电流的关系曲线，进一步验证霍尔效应在实际材料中的应用。

2 实验原理

2.1 通过霍尔效应测量磁场

将一个半导体薄片放在垂直于它的磁场中。（B 的方向沿 z 轴方向），当沿 x 方向的电极上施加电流 I 时，薄片内定向移动的载流子（设平均速率为 u）受到洛伦兹力 F_B 的作用：

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

在洛伦兹力的作用下，载流子发生偏转，产生电荷积累，从而在薄片 y 方向产生一个电位差 V_H ，形成电场 E_a 。电场使载流子受到一个与 F_b 方向相反的电场力 F_E ：

$$F_E = qE = q \frac{V_H}{b} \quad (2)$$

其中 b 为薄片宽度, F_E 随着电荷积累而增大, 达到稳定状态时 $F_E = F_B$, 此时称在 y 方向建立起的电场为霍尔电场, 相应的电压为霍尔电压。

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:

$$I = bdnqu \quad (3)$$

联立解得霍尔电压:

$$V_H = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} \quad (4)$$

令霍尔系数为 $R_H = \frac{1}{nq}$, 则有

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

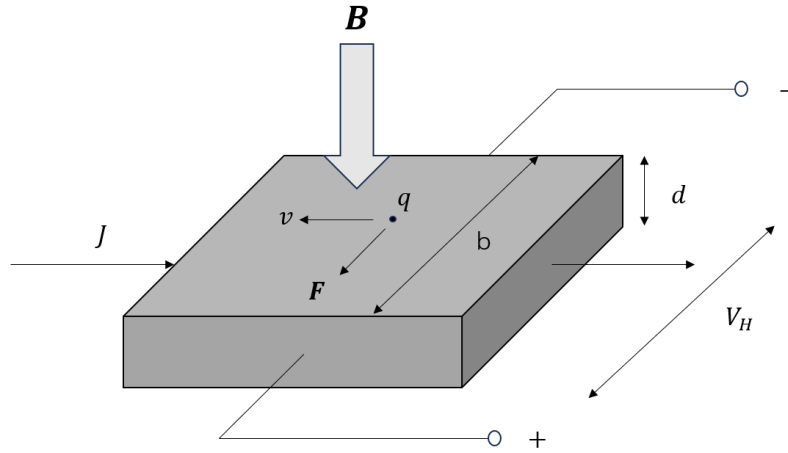


图 1: 霍尔效应原理图

2.2 霍尔效应实验中的副效应

1. 爱廷豪森效应: 实际载流子速率会服从统计分布规律, 会在薄板两侧形成横向温差 (温差电动势 V_E), 采用交流电可以减小误差。
2. 其他副效应如能斯特效应、里纪-勒杜克效应: 用对称测量法消除。
3. 不等位电动势: 霍尔电极不可能绝对焊在霍尔片两侧导致, 可用一个电位器加以平衡, 对称消除法也可以消除不等位电势。

我们可以通过改变 I_S 和磁场 B 的方向消除大多数副效应。具体说在规定电流和磁场正反方向后, 分别测量下列四组不同方向的 I_S 和 B 组合的 V_H , 即

$$(a) +B, +I \quad V_H = V_1$$

(b) $-B, +I$ $V_H = V_2$

(c) $-B, -I$ $V_H = V_3$

(d) $+B, -I$ $V_H = V_4$

然后得到霍尔电压平均值 $V_H = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{4}$

2.3 测量霍尔片半导体的电导率

电导率测量方法如下图所示。设 A' 、 B' 间的距离为 L ，样品横截面积为 $S = bd$ ，流经样品电流为 I_S ，在零磁场下，测得 B 间电压为 V_{BA} ，根据欧姆定律可以算出样品的电导率。

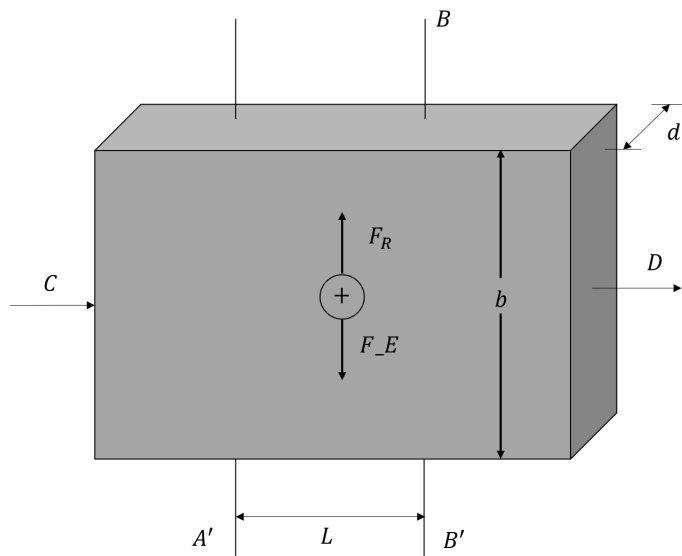


图 2: 霍尔效应原理图

2.4 实验仪器

1. 恒流源；
2. 电磁铁 ($3000Gs/A$)；
3. 霍尔样品和样品架；
4. 换向开关和接线柱；
5. 数字万用表；
6. 小磁针；

2.5 实验内容与设计

2.5.1 实验内容

- 用六脚霍尔片接好线路，霍尔片的尺寸为： $d = 0.5mm, b = 4.0mm, L = 3.0mm$
- 1. 保持 I_M 不变，取 $I_M \pm 0.45A$ ， I_S 取 $\pm 1.00, 1.50 \cdots 4.50mA$ ，测绘 $V_H - I_S$ 曲线，计算 R_H 。
- 2. I_S 不变，取 $I_S 4.50mA$ ， I_M 取 $0.100, 0.150 \cdots 0.450A$ ，测绘 $V_H - I_M$ 曲线，计算 R_H 。
- 3. 在零磁场下，取 $I_S = 1.00mA$ ，测 $V_{B'A'}$ 。
- 4. 确定样品导电类型，并求 R_H 、 n 、 σ 、 μ 。
- 下面的内容用四脚的锑化铟片完成，
- 5. 取 $I_S 1.00mA$ ， I_M 在 $0 - 0.800A$ 之间，测绘锑化铟片 $V_H - I_M$ 曲线。（此实验 I_S, I_M 不用换向）

3 实验结果

3.1 保持励磁电流不变测量霍尔系数

3.1.1 原始数据

表 1: 保持励磁电流不变测量霍尔系数

$I_m = 0.45A$				$I_m = -0.45A$			
$I_S(mA)$	$V_1(mV)$	$I_S(mA)$	$V_2(mV)$	$I_S(mA)$	$V_3(mV)$	$I_S(mA)$	$V_4(mV)$
1.04	2.20	-1.04	-2.29	1.09	-2.33	-1.08	2.31
1.55	3.20	-1.57	-3.26	1.57	-3.32	-1.55	3.30
2.05	4.24	-2.04	-4.20	2.05	-4.30	-2.04	4.28
2.55	5.21	-2.56	-5.26	2.56	-5.35	-2.54	5.32
3.00	6.20	-3.02	-6.20	3.01	-6.29	-3.00	6.26
3.51	7.20	-3.47	-7.10	3.50	-7.27	-3.47	7.21
3.98	8.15	-3.97	-8.11	3.96	-8.26	-3.93	8.18
4.52	9.23	-4.51	-9.21	4.52	-9.37	-4.44	9.21

3.1.2 数据处理

根据 $V_H = \frac{V_1+V_2+V_3+V_4}{4}$ 计算得到表2

表 2: 保持励磁电流不变测量霍尔系数

$I_S(mA)$	$V_H(mV)$
1.08	2.28
1.56	3.27
2.05	4.26
2.55	5.28
3.01	6.24
3.49	7.20
3.96	8.18
4.49	9.26

做出 $V_H - I_S$ 散点图并线性拟合得到图3

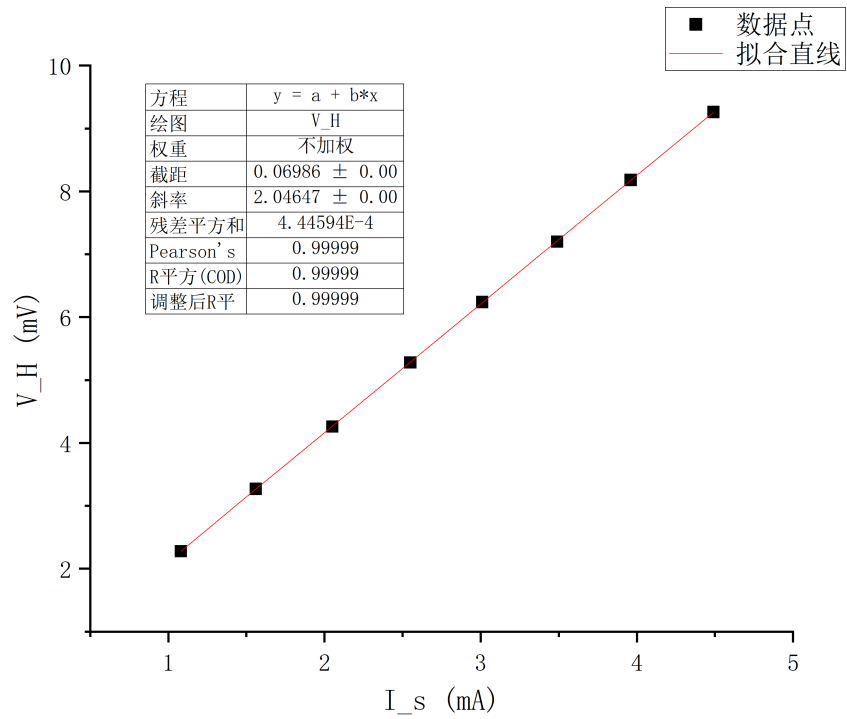


图 3: $V_H - I_S$

其中，斜率 $k = 2.05V/A$, $R^2 = 0.99999$

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{d}{B} \cdot \frac{V_H}{I_S} \\ &= \frac{2.05V/A \times 5 \times 10^{-4}m}{3000Gs/A \times 0.45A \times 10^{-4}T/Gs} \\ &= 7.59 \times 10^{-3}m^3/C \end{aligned}$$

3.2 保持样品电流不变测量霍尔系数

3.2.1 原始数据

表 3: 保持样品电流不变测量霍尔系数

$I_S = 0.45mA$				$I_s = -0.45mA$			
$I_M(A)$	$V_1(mV)$	$I_M(A)$	$V_2(mV)$	$I_M(A)$	$V_3(mV)$	$I_M(A)$	$V_4(mV)$
0.10	2.07	-0.10	-2.11	0.10	-2.10	-0.10	1.94
0.15	3.07	-0.15	-3.10	0.15	-3.09	-0.15	2.93
0.20	4.07	-0.20	-4.10	0.20	-4.09	-0.20	3.97
0.25	5.08	-0.25	-5.11	0.25	-5.10	-0.25	4.95
0.30	6.09	-0.30	-6.13	0.30	-6.11	-0.30	5.96
0.35	7.12	-0.35	-7.16	0.35	-7.12	-0.35	7.00
0.40	8.19	-0.40	-8.23	0.40	-8.21	-0.40	8.06
0.45	9.34	-0.45	-9.39	0.45	-9.37	-0.45	9.22

根据 $V_H = \frac{V_1+V_2+V_3+V_4}{4}$ 计算得到表4

表 4: 保持样品电流不变测量霍尔系数

$I_S(mA)$	$V_H(mV)$
0.10	2.06
0.15	3.05
0.20	4.05
0.25	5.06
0.30	6.07
0.35	7.11
0.40	8.17
0.45	9.26

做出 $V_H - I_M$ 散点图并线性拟合得到图4

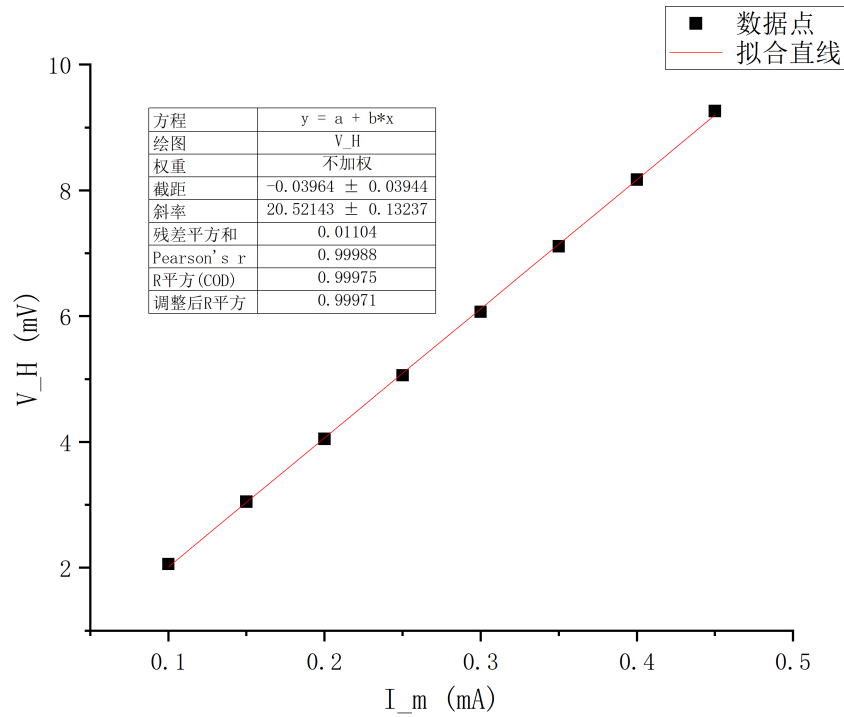


图 4: $V_H - I_M1$

其中，斜率 $k = 20.52V/A$ ， $R^2 = 0.99975$

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{d}{B} \cdot \frac{V_H}{I_S} \\ &= \frac{20.52V/A \times 5 \times 10^{-7}m}{3000Gs/A \times 0.0045A \times 10^{-4}T/Gs} \\ &= 7.60 \times 10^{-3}m^3/C \end{aligned}$$

3.3 零磁场下测量横向电势差

3.3.1 六脚霍尔片导电类型

结合图1、2，和实验装置原理图。电磁铁正向通电时，磁场于地磁场相反。可以判断六脚霍尔片导电类型为 N 型。

3.3.2 六脚霍尔片对应参数

零磁场下。 $I_S = 1mA$ ，测得 $V_{A'B'} = 68.45mV$

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{1}{\rho} \\ &= \frac{L}{bd} \frac{I_S}{V_{A'B'}} \\ &= \frac{3}{4 \times 0.5 \times 68.45 \times 10^{-3}} S/m \\ &= 21.914 S/m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}n &= \frac{1}{R_H q} \\ &= \frac{1}{7.60 \times 10^{-3} \times 1.6 \times 10^{-19}} \\ &= 8.22 \times 10^{20}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{\sigma}{nq} \\ &= \frac{21.914}{8.22 \times 10^{20} \times 1.6 \times 10^{-19}} m^2/V \cdot s \\ &= 0.167 m^2/V \cdot s\end{aligned}$$

3.4 使用锑化铟片，保持样品电流 $I_S = 1mA$ 不变，绘制 $V_H - I_M$ 图像

表 5: 保持样品电流不变测量霍尔系数

$I_M(A)$	$V_H(mV)$	$I_M(A)$	$V_H(mV)$
0.00	1.19	0.45	268.70
0.05	51.85	0.50	281.57
0.10	99.95	0.55	296.56
0.15	145.00	0.60	312.45
0.20	183.53	0.65	327.60
0.25	212.59	0.70	342.44
0.30	228.10	0.75	356.89
0.35	243.15	0.80	371.75
0.40	255.67		

做出 $V_H - I_M$ 图，如图5

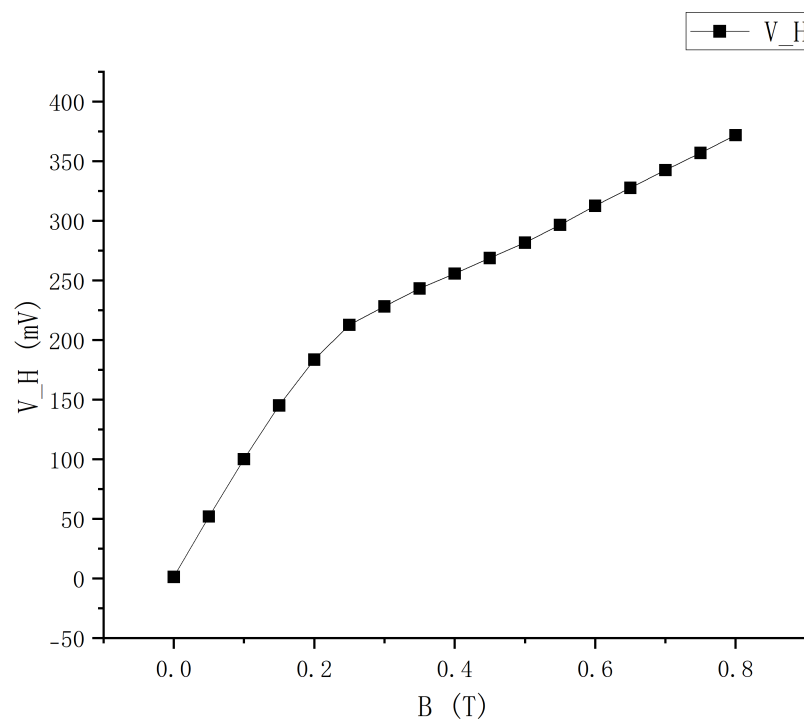


图 5: 铋化钢 $V_H - B$ 关系图

铋化钢片导电类型为 P 型，其霍尔电压在磁场强度较小时 ($B \leq 9000Gs$)， $V_H - I_M$ 为二次曲线。如图6

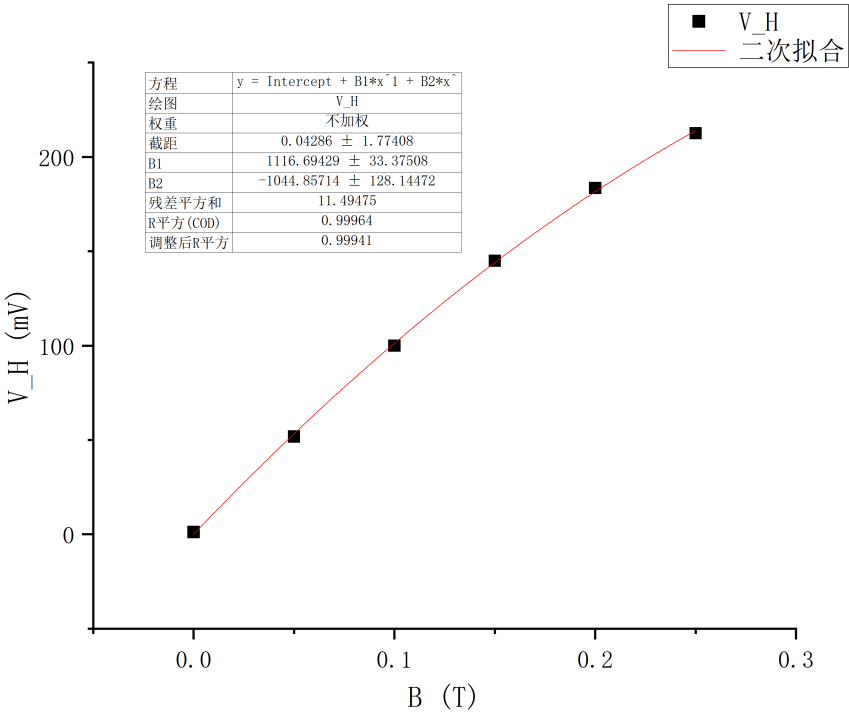


图 6: $B \leq 9000Gs$ 时 $V_H - B$

在磁场强度较大 ($B > 9000Gs$) 时 $V_H - I_M$ 为线性关系如图7

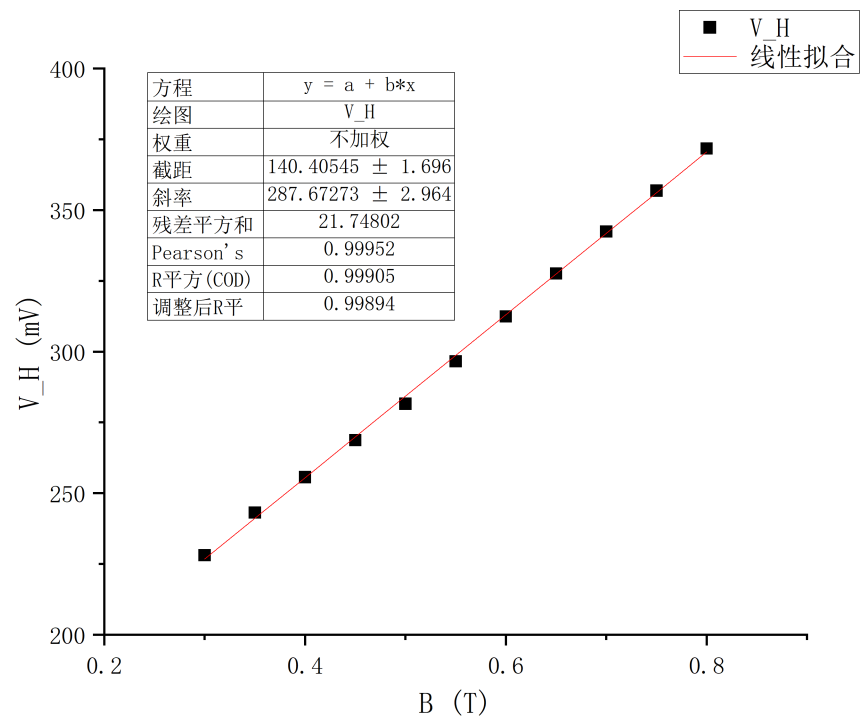


图 7: $B > 9000Gs$ 时 $V_H - B$

在二次拟合和线性拟合中 R^2 都接近 1，表明拟合准确。

4 结论

本实验通过霍尔效应的测量方法成功确定了六脚霍尔片和铽化铟片的霍尔系数、载流子类型、浓度和迁移率等关键电学特性。实验采用对称测量法，有效消除了爱廷豪森效应等副效应的影响，确保了测量结果的精确性和可靠性。实验数据与理论分析的高一致性进一步验证了霍尔效应在半导体材料分析中的有效性。六脚霍尔片显示出 N 型导电特性，而铽化铟片则表现出 P 型导电特性。特别是在磁场强度较小时，铽化铟片的霍尔电压-电流曲线呈现二次关系，而在磁场强度较大时则转变为线性关系，这一现象揭示了材料在不同磁场条件下的导电特性变化。总体而言，本实验不仅加深了对霍尔效应理论的理解，也展示了霍尔效应在实际半导体材料分析中的应用潜力，为进一步的材料特性研究和器件设计提供了重要的实验数据和理论支持。

参考文献

[1] 吕斯骅，段家砥. 新编基础物理实验. 高等教育出版社, 2006.

5 附件

5.1 原始数据

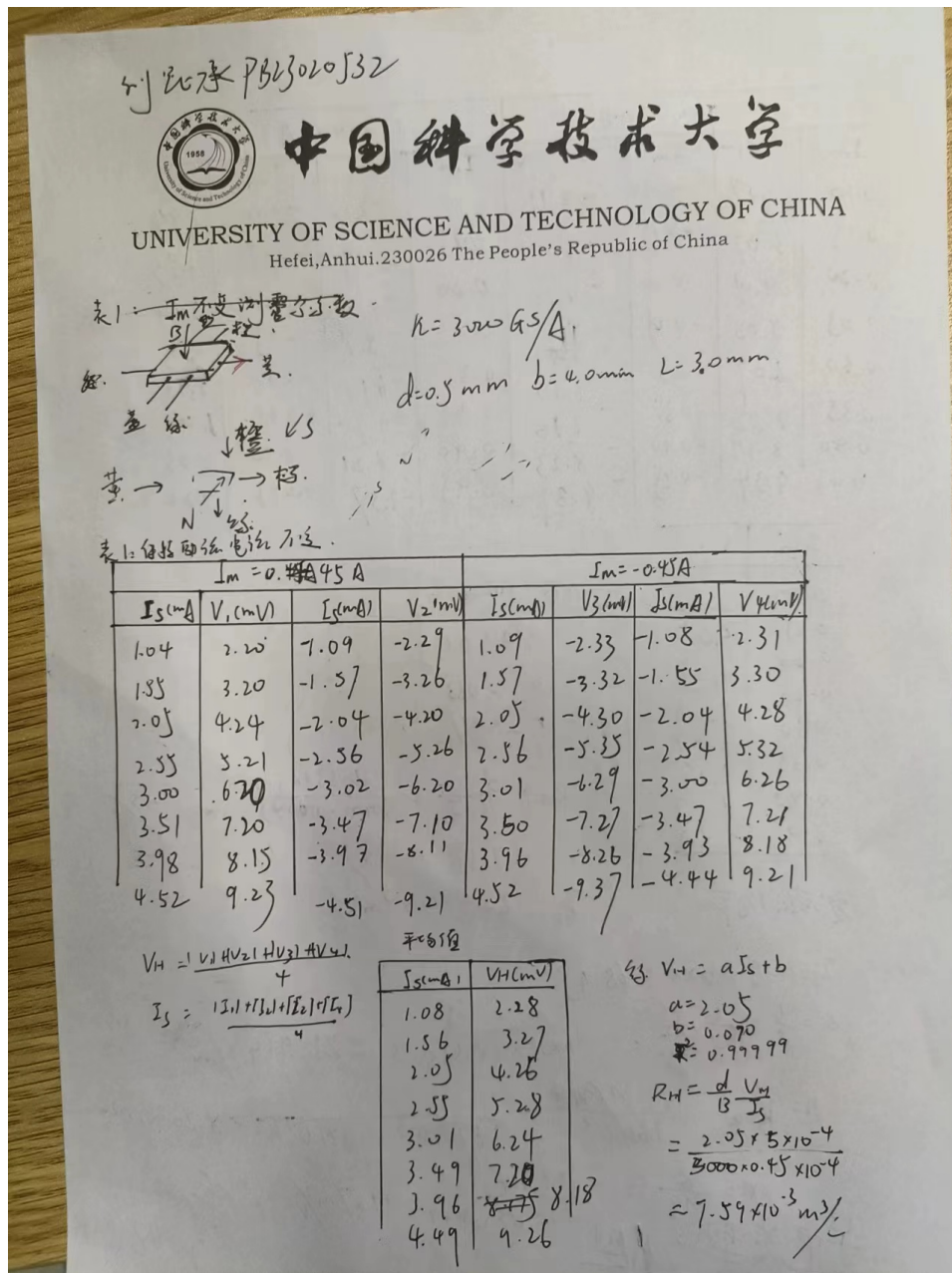


图 8: 原始数据 1

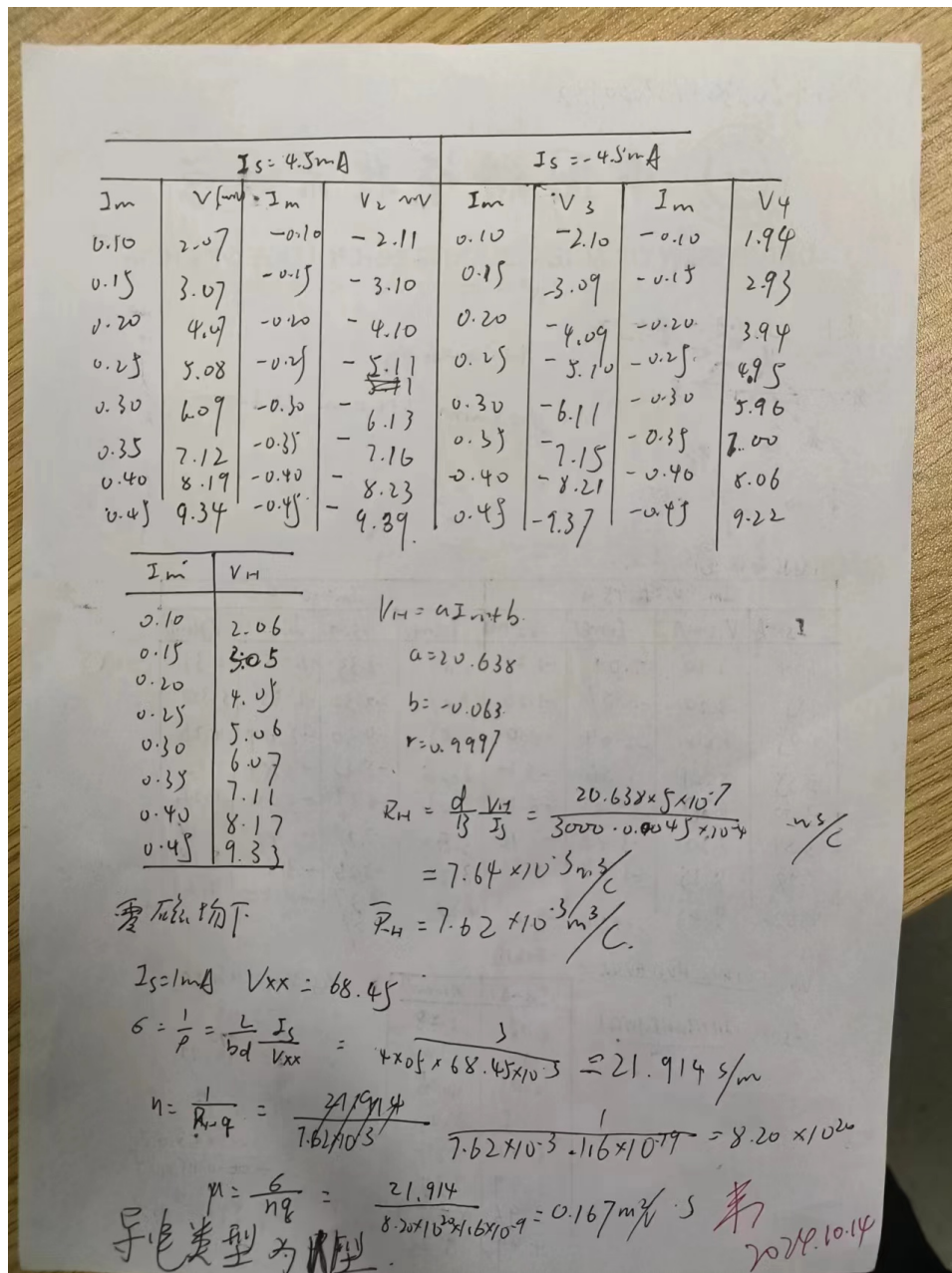


图 9: 原始数据 2

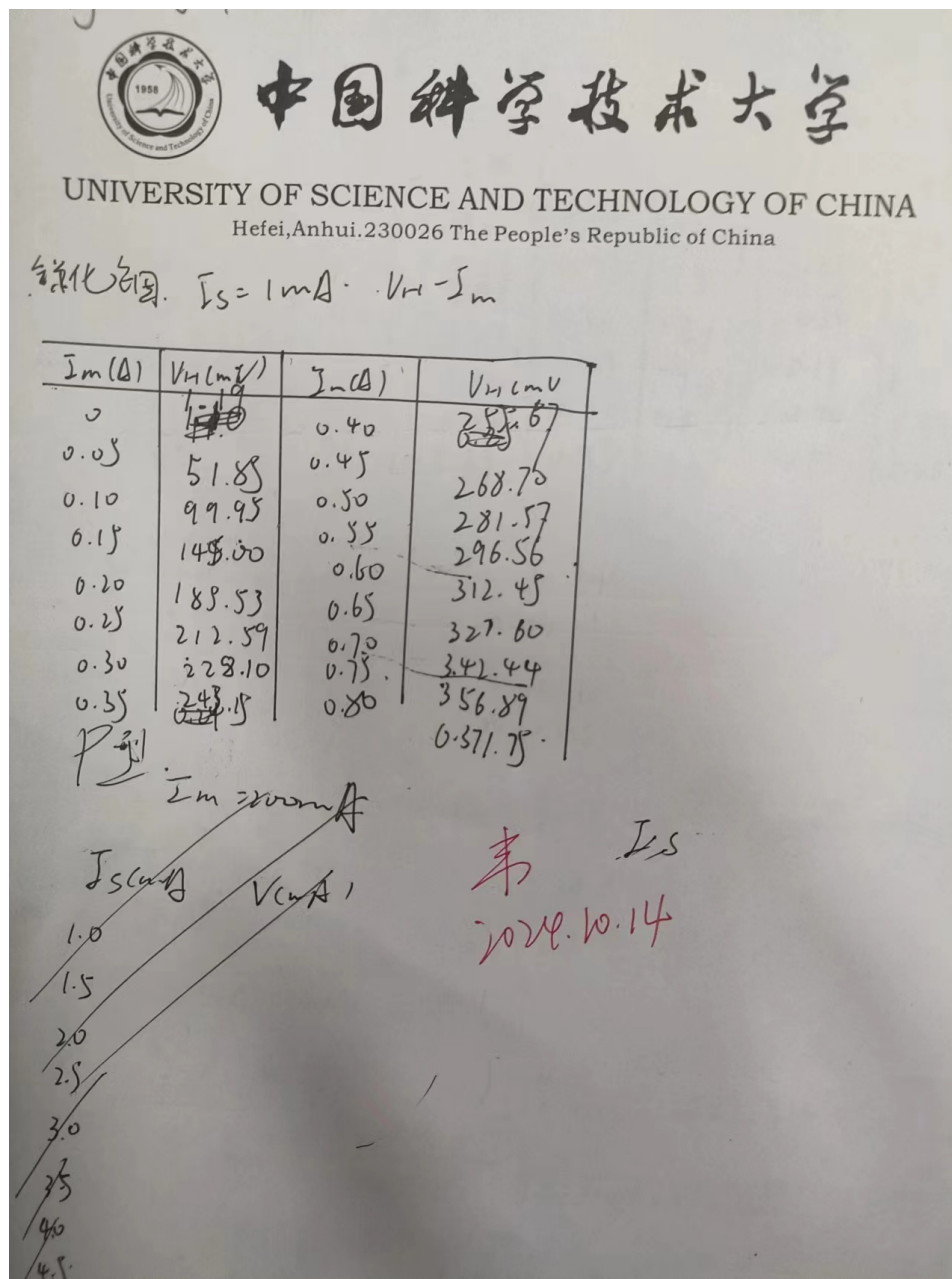


图 10: 原始数据 3