

霍尔效应及磁电阻测量 实验报告

姓名：王炜致 学号：2022010542 实验日期：2024.5.7 实验台号：5

目录

1	实验目的	2
2	实验仪器	2
3	实验原理	2
3.1	霍尔效应	2
3.2	霍尔效应副效应	3
3.2.1	Etinghausen 效应	3
3.2.2	Nernst 效应	3
3.2.3	Righi-Leduc 效应	3
3.2.4	不等位效应	3
3.3	磁电阻效应	3
4	实验内容及步骤	4
4.1	测量霍尔片的参数	4
4.2	判断霍尔片载流子类型	4
4.3	标定电磁铁磁隙间磁场	4
4.4	测定磁极间隙磁场分布	4
4.5	测量霍尔片载流子迁移率 μ	4
4.6	磁电阻特性测量	4
5	数据处理与分析	5
5.1	测量霍尔片的参数	5
5.2	霍尔片的载流子类型为： N	6
5.3	标定电磁铁磁隙间磁场	6
5.4	测定磁极间隙中磁场分布 $B-x$	7
5.5	霍尔片载流子迁移率 μ 测量	8
5.6	磁电阻特性测量 $B-\frac{\Delta R}{R(0)}$	8
6	实验总结与原始数据记录	10

1 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。

2 实验仪器

霍尔效应实验仪、测试仪（0-10mA 可调工作电流源、200mV 数字电压表、0-1000mA 可调励磁电流源）、万用表、导线

3 实验原理

3.1 霍尔效应

长方体薄金属板如图 1 所示放置，在两侧对称点 1,2 之间接灵敏电流计。沿 x 轴正方向通以工作电流 I 。在 z 方向不存在磁场的情况下，电流计将不发生偏转，1,2 两点等势。若在 z 方向施加磁场 B ，则电流计将发生偏转，即 1,2 两点产生电势差，该电势差 U_H 与电流 I 与磁感应强度 B 均成正比，与金属板厚度 d 成反比。是为霍尔效应。结合图 1，利用洛伦兹力理论推导霍尔电压 U_H 表达式。

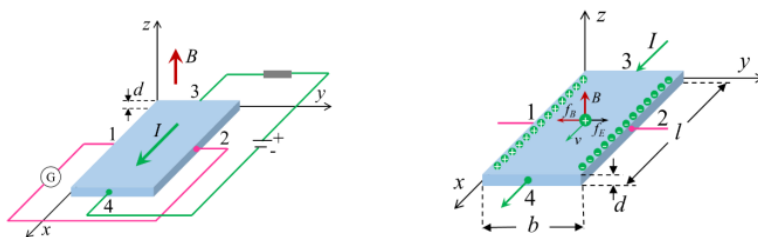


图 1: 霍尔效应原理示意图

不妨设载流子为电子，其运动速率为 v ，则电子在磁场中所受洛伦兹力

$$f = eBv$$

方向沿 y 轴负方向，即电子运动发生偏转，负电荷在金属板左壁积累，使两侧产生电势差

$$U_H = Eb$$

电子受反方向电场力作用。稳定时电子受力平衡有

$$eE = eBv, E = Bv$$

又由于工作电流 I 与载流子浓度 n 、载流子漂移速度 v 及霍尔片横截面积 bd 存在关系

$$I = nevbd, v = \frac{I}{neb d}$$

得到

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

理论分析与实验情况吻合。此外，记霍尔系数及霍尔片的灵敏度分别为

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

表达式对大多数金属成立，对霍尔系数更高的半导体材料不准确。本实验考虑简化通常情况即可。

3.2 霍尔效应副效应

在实际情况下，存在各种副效应与霍尔效应混杂，使霍尔电压测量产生误差，列举如下。

3.2.1 Ettinghausen 效应

半导体载流子以不同速度运动。施加磁场时，大于或小于平均速度的载流子在洛伦兹力和电场力共同作用下分别向左、右侧壁偏转，与侧壁碰撞，动能转化为内能，使 1,2 两点产生温差及温差电动势。

3.2.2 Nernst 效应

由于霍尔元件 3,4 点接触电阻可能不同（或由于电极、半导体材料不同），产生不同焦耳热，使两点温度不同，载流子运动产生热流，在磁场作用下在 1,2 两点间产生电势差。

3.2.3 Righi-Leduc 效应

由于上述热流中载流子速度不同，在磁场作用下使 1,2 两点间产生温差电动势。

3.2.4 不等位效应

受器件制作工艺限制，1,2 两点不能恰好处在同一等势线上，只要有电流通过就会出现电势差。

此外还存在电压表附加电压。当 I, B 确定后，霍尔片输出电压为上述几项的代数和。通过改变工作电流和外加磁场方向、忽略较小误差值可以消除除不等位效应外的副效应。

3.3 磁电阻效应

磁电阻效应指：在一定条件下，导电材料的电阻值 R 随外加磁场 B 的变化而变化。在霍尔实验背景下，将表现横向磁电阻效应：霍尔电场作用和某一速度的载流子受到的洛伦兹力作用刚好抵消，小于或大于该速度的载流子将发生偏转，沿外加电场方向运动的载流子数目将减少，电阻增大。实验考虑将图 2 所示 A,B 端短接。

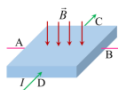


图 2: 磁阻器件

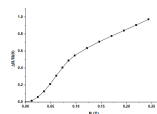


图 3: $\Delta R/R(0) - B$ 关系

令 $\Delta R = R(B) - R(0)$ ，对于实验所用磁阻器件， $B \leq 0.06T$ 时， $\Delta R/R(0)$ 正比于 B^2 ； $B > 0.12T$ 时， $\Delta R/R(0)$ 正比于 B 。

4 实验内容及步骤

4.1 测量霍尔片的参数

设定励磁电流 $I_M = 500mA$ ，查表得对应磁隙间磁感应强度 B 。约定正方向，间隔 $1.00mA$ 改变霍尔片工作电流 $I = 2.00 - 8.00mA$ ，测量霍尔元件输出电压 U_H ，改变 I, B 方向测四组数据。拟合 $U_H - I$ 关系，计算 K_H, R_H, n ，估算不确定度。

4.2 判断霍尔片载流子类型

依据霍尔元件内部引线结构，根据约定正方向及对应测量结果的正负号判断霍尔片为 N 型还是 P 型。

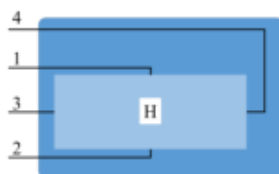


图 4: 霍尔元件内部结构

4.3 标定电磁铁磁隙间磁场

固定霍尔元件工作电流 $I = 4.00mA$ ，以 $100mA$ 间隔改变励磁电流 $I_M = 0 - 1000mA$ ，从而改变磁感应强度，测量霍尔元件的输出电压 U_H ，进而计算对应的磁感应强度 B 。拟合 B 与 I_M 函数关系。

4.4 测定磁极间隙磁场分布

取 $I = 4.00mA$ $I_M = 500mA$ ，水平移动霍尔元件（改变 x ）。测量并绘制磁极间隙中沿水平方向磁场的分布曲线 $B - x$ ，判断水平方向上磁隙匀强磁场的分布范围。

4.5 测量霍尔片载流子迁移率 μ

置励磁电流 I_M 为 0，在无外加磁场的条件下测量图 1 沿 x 轴正方向的电流与电势降。推导 μ 表达式并计算。

4.6 磁电阻特性测量

在图 2C、D 端 $I_{CD} = 1.50mA$ 恒流，A、B 端短路的情况下，在 $0 - 1000mA$ 范围内改变励磁电流 I_M ，用万用表 $2V$ 量程测量 C、D 端电压，根据欧姆定律计算磁阻元件的电阻值 $R(B)$ ，研究磁电阻 $R/R(0)$ 随磁场 B 的变化规律。在开始的非线性区励磁电流间隔取 $50mA$ ，后面的近似线性区励磁电流间隔取 $100mA$ 。绘制 $R/R(0) - B$ 关系曲线，说明磁电阻特性。

5 数据处理与分析

5.1 测量霍尔片的参数

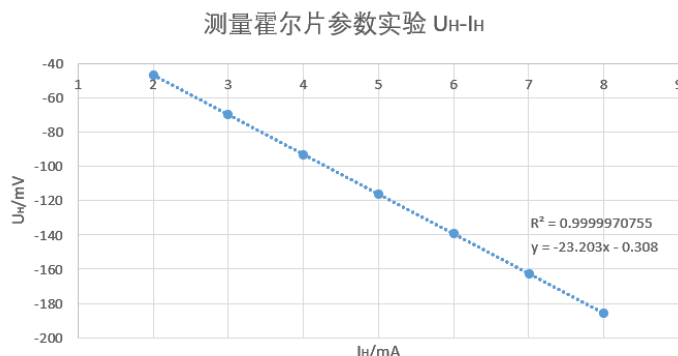
霍尔片尺寸: 长 $l = 300\mu m$, 宽 $b = 100\mu m$, 厚 $d = 3\mu m$

激励电流 $I_M = 500mA$, 对应磁场 $B = 134.1mT$, 霍尔片所在相对位置: $x = 26.3mm$, $y = 12.2mm$

I_H/mA	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
$U_1(+B, +I)$	-46.3	-69.8	-92.9	-115.9	-139.0	-162.2	-185.2
$U_2(+B, -I)$	46.8	70.2	93.5	116.7	140.0	163.4	186.5
$U_3(-B, -I)$	-46.7	-70.0	-93.3	-116.4	-139.6	-162.9	-185.9
$U_4(-B, +I)$	46.6	69.9	93.1	116.3	139.4	162.8	185.7
U_H/mV	-46.6	-69.975	-93.2	-116.325	-139.5	-162.825	-185.875

计算 U_H 使用了公式 $U_H = \frac{1}{4}(U_1 + U_3 - U_2 - U_4)$, 下同。

绘制 $U_H - I_H$ 图像如下:



得到关系

$$U_H = -23.203I_H - 0.308(mV)$$

I_H 单位为 mA; 则有

$$k = \frac{B}{ned} = -23.203V/A$$

亦即

$$K_H = \frac{k}{B} = -\frac{23.203}{134.1 \times 10^{-3}} \approx -173.027591m^2/C$$

$$R_H = \frac{kd}{B} = -\frac{23.203 \times 3 \times 10^{-6}}{134.1 \times 10^{-3}} \approx -5.190828 \times 10^{-4}m^3/C$$

$$n = \frac{B}{ked} = -\frac{134.1 \times 10^{-3}}{23.203 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^{-6}} \approx -1.204047 \times 10^{22}m^{-3}$$

下面考虑不确定度。斜率 k 的不确定度为 (取正值)

$$\Delta_k = t_P(v)|S_k| = |k|t_P(n-2)\sqrt{\frac{R^{-2}-1}{n-2}} = 23.203 \times 2.57 \times \sqrt{\frac{1-R^2}{5R^2}} \approx 0.0456056562V/A$$

则

$$\begin{aligned}\Delta K_H &= \frac{\Delta k}{B} \approx \frac{0.0456056562}{134.1 \times 10^{-3}} \approx 0.3 \text{ m}^2/\text{C} \\ \Delta R_H &= \frac{\Delta k d}{B} \approx \frac{0.0456056562 \times 3 \times 10^{-6}}{134.1 \times 10^{-3}} \approx 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{C} \\ \Delta n &= \frac{\Delta k B}{k^2 e d} \approx \frac{0.0456056562 \times 134.1 \times 10^{-3}}{23.203^2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^{-6}} \approx 2.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}\end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned}K_H &= -(173.0 \pm 0.3) \text{ m}^2/\text{C} \\ R_H &= -(5.19 \pm 0.01) \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{C} \\ n &= -(1.2040 \pm 0.0024) \times 10^{22} \text{ m}^{-3}\end{aligned}$$

5.2 霍尔片的载流子类型为: N

考虑 $U_1(+B, +I)$ 的情形, 如图 4 所示。由霍尔电压值为负, 知下侧电势高于上侧电势。由左手定则分析容易得知载流子类型为 N , 负电荷在上侧积累。

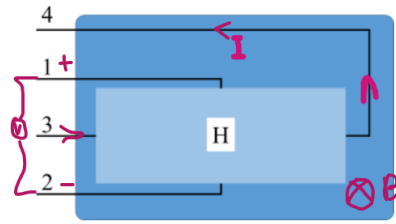


图 5: 载流子类型判断

5.3 标定电磁铁磁隙间磁场

霍尔片工作电流 $I_H = 4.00 \text{ mA}$

I_M/mA	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$U_1(+B, +I)$	0.2	-18.4	-36.9	-55.8	-74.0	-92.8	-111.0	-129.4	-147.1	-165.2	-182.5
$U_2(+B, -I)$	0.4	18.9	37.7	56.3	74.8	93.3	111.8	130.0	148.0	165.9	183.4
$U_3(-B, -I)$	-0.3	-18.8	-37.5	-56.2	-74.6	-93.1	-111.6	-129.7	-147.6	-165.5	-183.0
$U_4(-B, +I)$	-0.1	18.2	37.3	55.8	74.5	92.7	111.5	129.4	147.7	165.3	183.1
U_H/mV	-0.1	-18.575	-37.35	-56.025	-74.475	-92.975	-111.475	-129.625	-147.6	-165.475	-183

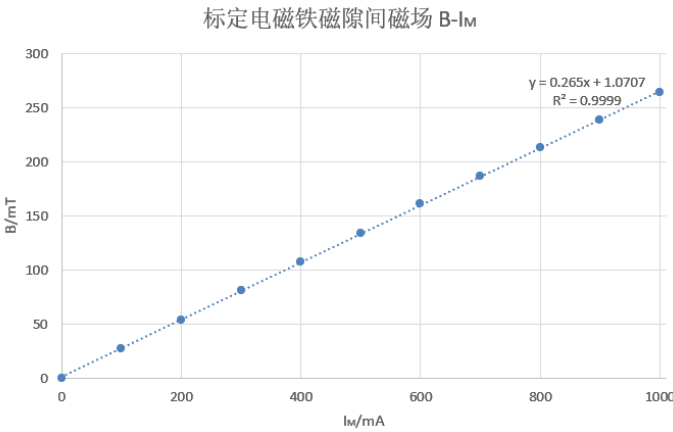
由于磁隙间磁感应强度

$$B = \frac{U_H}{I_H K_H}$$

得到 $B - I_M$ 关系, 列表如下:

I_M/mA	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
B/mT	0.145	26.842	53.974	80.961	107.623	134.357	161.091	187.319	213.295	239.126	264.451

绘制 $B - I_M$ 图像如下：



则近似有线性关系 (I_M 单位为 mA)

$$B = 0.2650I_M + 1.0707(mT)$$

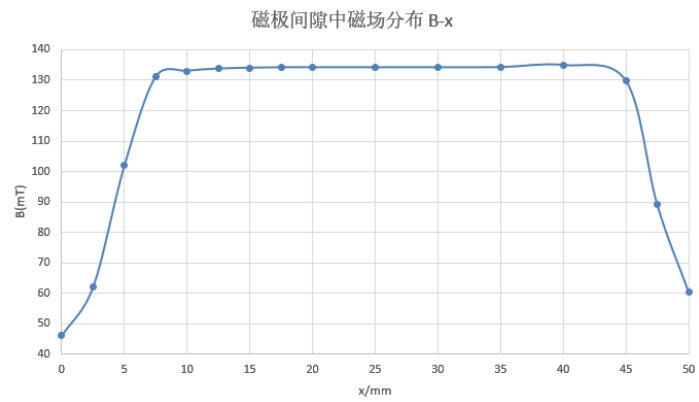
5.4 测定磁极间隙中磁场分布 $B - x$

霍尔片工作电流 $I_H = 4.00mA$ ，励磁电流 $I_M = 500mA$ ，霍尔片所在相对位置： $y = 12.2mm$

x/mm	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5
$U_1(+B, +I)$	-31.5	-42.8	-70.4	-90.4	-91.8	-92.3	-92.5	-92.6
$U_2(+B, -I)$	32.2	43.2	70.9	91.0	92.3	92.8	93.0	93.1
$U_3(-B, -I)$	-32.1	-43.1	-70.6	-90.8	-92.1	-92.6	-92.8	-92.9
$U_4(-B, +I)$	31.9	42.9	70.4	90.7	92.0	92.5	92.7	92.8
U_H/mV	-31.925	-43	-70.575	-90.725	-92.05	-92.55	-92.75	-92.85

x/mm	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	47.5	50.0
$U_1(+B, +I)$	-92.6	-92.6	-92.6	-92.6	-93.1	-89.5	-61.4	-41.6
$U_2(+B, -I)$	93.1	93.1	93.1	93.2	93.6	90.0	61.9	42.1
$U_3(-B, -I)$	-92.9	-92.9	-92.9	-92.9	-93.4	-89.8	-61.7	-41.9
$U_4(-B, +I)$	92.8	92.8	92.8	92.8	93.3	89.7	61.5	41.8
U_H/mV	-92.85	-92.85	-92.85	-92.875	-93.35	-89.75	-61.625	-41.85

同上变换，得到 $B - x$ 关系，绘图（列表略）如下：



可知水平方向上，匀强磁场的分布范围大致在 10-40mm 区间。

5.5 霍尔片载流子迁移率 μ 测量

I/mA	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00
U/V	1.465	2.209	2.954	3.707	4.484	5.276	6.097	6.942

由于

$$\mu = \frac{v}{E}$$

其中

$$v = \frac{I}{nebd}, E = \frac{U}{l}$$

故

$$\mu = \frac{Il}{nebdU} = \frac{Il}{bU}K_H$$

取 $I = 5.00mA, U = 3.707V$ ，计算得

$$\mu = -\frac{5.00 \times 10^{-3} \times 300 \times 10^{-6}}{3.707 \times 100 \times 10^{-6}} \times 173.0 \approx 0.70m^2/(V \cdot s) = 0.70 \times 10^4cm^2/(V \cdot s)$$

5.6 磁电阻特性测量 $B - \frac{\Delta R}{R(0)}$

磁阻片工作电流： $I_{CD} = 1.50mA$ ，A、B 端短路
磁阻片所在相对位置： $x = 39.4mm, y = 12.5mm$
数字万用表量程： $2V$

I_M/mA	0	50	100	150	200	250	300	350
U_{CD}/V	0.5283	0.5375	0.5627	0.5985	0.6407	0.6793	0.7041	0.7227
B/mT	1.0707	14.3207	27.5707	40.8207	54.0707	67.3207	80.5707	93.8207
$R(B)/\Omega$	352.2	358.3333	375.1333	399	427.1333	452.8667	469.4	481.8
$\frac{\Delta R}{R(0)}$	0	0.0174	0.0651	0.1329	0.2128	0.2858	0.3328	0.3680

I_M/mA	400	500	600	700	800	900	1000
U_{CD}/V	0.7399	0.7736	0.8048	0.8340	0.8619	0.8911	0.9202
B/mT	107.0707	133.5707	160.0707	186.5707	213.0707	239.5707	266.0707
$R(B)/\Omega$	493.2667	515.7333	536.5333	556	574.6	594.0667	613.4667
$\frac{\Delta R}{R(0)}$	0.4005	0.4643	0.5234	0.5786	0.6315	0.6867	0.7418

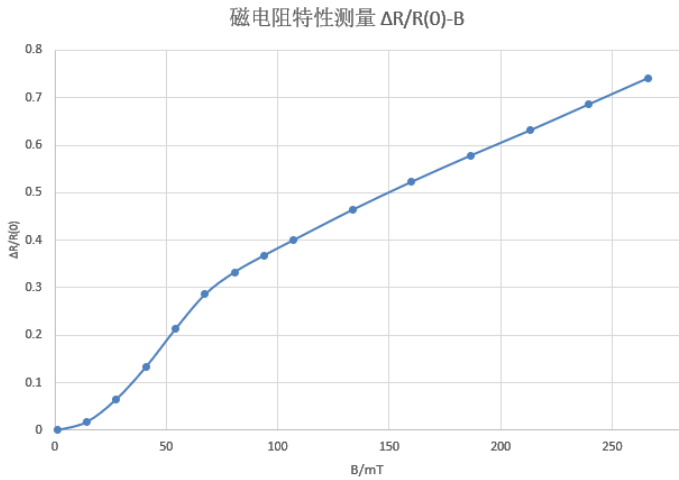
其中磁感应强度有线性关系 (I_M 单位为 mA)

$$B = 0.2650I_M + 1.0707(mT)$$

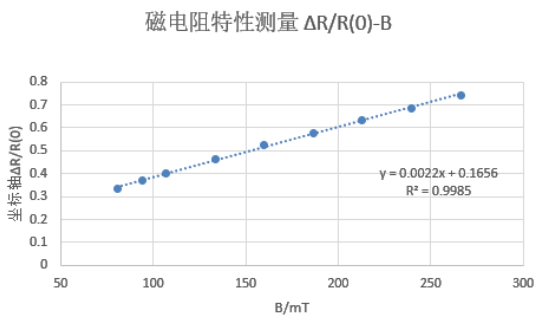
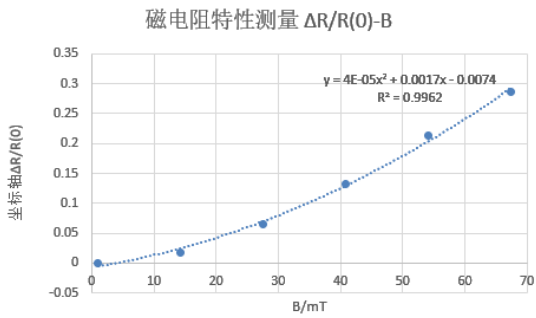
阻值

$$R(B) = \frac{U_{CD}}{I_{CD}}$$

得到 $\frac{\Delta R}{R(0)} - B$ 图像如下:



拟合如下:



可见实验磁阻元件的磁电阻特性：在 $B < 0.06T$ 时，近似为二次方关系；在 $B > 0.12T$ 时，近似为线性关系。这与讲义的描述一致。

6 实验总结与原始数据记录

通过本次实验，我了解了霍尔效应的产生原理以及副效应的产生原理，掌握了霍尔系数的测量方法，学习了消除霍尔副效应的实验方法，深刻认识了半导体材料的电阻值随磁场的变化规律。

原始数据记录见下：

附录：实验测量数据记录参考表格

实验题目：霍尔效应及磁电阻测量

姓名：王林松，学号2021010144，实验组号：第二组，实验台号：5，实验日期：2024.5.7

一、测量霍尔片的参数：

霍尔片尺寸：长 $L=300\text{ }\mu\text{m}$ ，宽 $b=100\text{ }\mu\text{m}$ ，厚 $d=3\text{ }\mu\text{m}$ ，磁阻中心 26.3

激励电流 $I_H=50.0\text{ mA}$ ，对应磁场 $B=139.1\text{ mT}$ ，霍尔片所在相对位置： $x=122.2\text{ mm}$ ， $y=12.2\text{ mm}$

$U_H = \frac{1}{2}(U_{H1} + U_{H2})$

I_H/mA	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
$U_H(+B, +I)$	-46.3	-87.8	-92.9	-115.9	-139.0	-162.2	-185.2
$U_H(+B, -I)$	46.8	70.2	93.5	116.7	140.0	163.4	186.5
$U_H(-B, +I)$	-46.7	-70.0	-93.5	-116.4	-139.6	-162.9	-185.9
$U_H(-B, -I)$	46.6	69.9	93.1	116.3	139.4	162.8	185.8
U_H/mV	-46.6	-69.9	-93.2	-116.3	-139.5	-162.8	-185.8

二、霍尔片的载流子类型为：N型 (报告中请画图解释)

三、标定电磁铁磁隙间磁场

霍尔片工作电流 $I_H=4.00\text{ mA}$

I_H/mA	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$U_H(+B, +I)$	0.2	-18.8	-36.7	-55.8	-74.0	-92.8	-111.0	-129.4	-147.1	-165.2	-182.5
$U_H(+B, -I)$	0.4	18.9	37.7	56.3	74.8	93.3	111.8	130.0	148.0	165.9	183.4
$U_H(-B, +I)$	-0.3	-18.8	-37.5	-56.2	-74.6	-93.1	-111.6	-129.7	-147.6	-165.5	-183.0
$U_H(-B, -I)$	-0.1	18.2	37.3	55.8	74.5	92.7	111.5	129.4	147.7	165.3	183.1
U_H/mV	0.05	-18.7	-37.5	-56.0	-74.4	-92.9	-111.3	-129.3	-147.4	-165.3	-183.1

四、测定磁极间隙中磁场分布 $B \sim x$

霍尔片工作电流 $I_H=4.00\text{ mA}$ ，激励电流 $I_M=50.0\text{ mA}$ ，霍尔片所在相对位置： $y=12.2\text{ mm}$

x/mm	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
$U_H(+B, +I)$	-31.5	-32.8	-70.4	-70.4	-70.4	-71.8	-72.5	-72.5	-72.6	-72.6	-72.6	-72.6	-72.6	-72.6	-72.6
$U_H(+B, -I)$	32.2	32.2	70.9	70.9	70.9	72.8	73.0	73.1	73.1	73.1	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
$U_H(-B, +I)$	-32.1	-32.1	-70.4	-70.4	-70.4	-72.4	-72.8	-72.9	-72.9	-72.9	-72.9	-72.9	-72.9	-72.9	-72.9
$U_H(-B, -I)$	31.9	31.9	70.4	70.4	70.4	72.4	72.7	72.8	72.8	72.8	72.8	72.8	72.8	72.8	72.8
U_H/mV	28.8	28.8	70.4	70.4	70.4	72.4	72.7	72.8	72.8	72.8	72.8	72.8	72.8	72.8	72.8

五、霍尔片载流子迁移率 μ 测量 $\mu = \frac{U_H}{E}$

测量计算式推导：

模拟表格记录数据：

I_H/mA	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00
U_H/mV	2.954	3.707	4.484	5.276	6.097	6.942	7.799	8.655	9.511

六、磁电阻特性测量 $R \sim \Delta R/R(0)$

磁阻片工作电流： $I_{CD}=1.00\text{ mA}$ ，A、B端是否短路？是 ☒ 否 ☐

磁阻片所在相对位置： $x=37.4\text{ mm}$ ， $y=12.5\text{ mm}$

数字万用表量程：2V

I_H/mA	0	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800	900	1000
U_{CD}/V	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328
$R/\text{m}\Omega$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$\Delta R/R(0)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

温记板

2024.5.7