

程强军

# 物理实验

## 实验报告

(2020 - 2021 学年度 春季学期)

实验名称 霍尔效应实验及磁阻测量

姓名	<u>刘祖炎</u>
学号	<u>2019010485</u>
院系	<u>自动化系</u>
教师	<u>程强军</u>
时间	<u>2021 年 5 月 13 日</u>

# 目录

1	实验目的	1
2	实验原理	1
2.1	霍尔效应	1
2.2	霍尔效应的副效应	1
2.3	磁电阻效应原理	2
3	实验仪器	2
4	实验步骤及注意事项	3
4.1	实验步骤	3
4.2	注意事项	3
5	实验数据处理	3
5.1	测定霍尔片输出电压 $U_H$ 与输入电流 $I$ 的关系	3
5.2	标定励磁电流 $I_M$ 与磁极间磁场的关系	5
5.3	标定磁极间隙水平方向磁场分布曲线	6
5.4	测量霍尔元件的载流子迁移率 $\mu$	8
5.5	判断霍尔片载流子类型	8
5.6	磁阻器件的磁电阻效应	9
6	思考题	10
6.1	思考题一	10
6.2	思考题二	11
6.3	思考题三	11
7	实验小结	12
8	附录：原始数据记录表格及预习报告	13

## 1. 实验目的

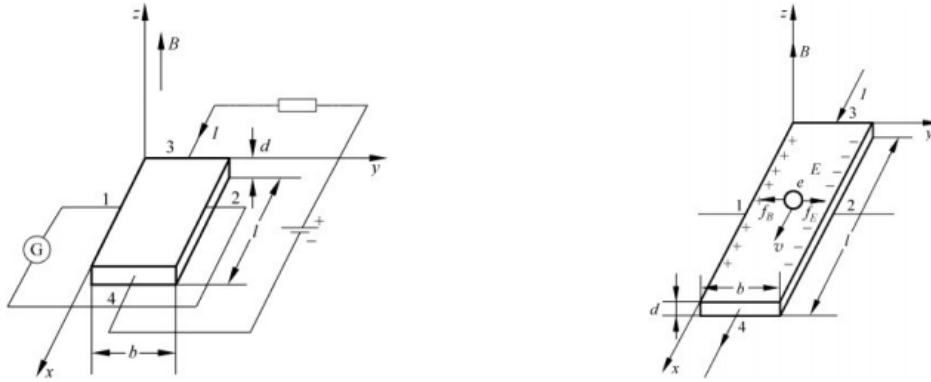
- 了解霍尔效应的产生原理以及副效应的产生原理；
- 掌握霍尔系数的测量方法，学习消除霍尔副效应的实验方法；
- 研究半导体材料的电阻值随磁场的变化规律。

## 2. 实验原理

### 2.1 霍尔效应

霍尔效应原理如图1所示。

图 1: 霍尔效应原理示意图



如图1左所示。沿  $x$  轴正方向通以电流  $I$ ，并在  $z$  方向加以磁场  $B$ ，则 1、2 两点之间将产生电位差，且满足：

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB \quad (1)$$

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。

公式1可用洛伦兹力的原理加以说明。如图1右所示，考虑正电荷空穴型载流子，电荷为  $e$ ，平均迁移速度为  $v$ ，根据洛伦兹力公式和电场力公式  $f_B = evB$ ， $f_E = eE$ ，平衡状态时， $f_B = f_E$ ，可解得  $U_H = vbB$ 。由于  $I = nevbd$  (其中， $e$  为载流子电荷， $n$  为浓度， $v$  为漂移速度， $bd$  为截面积)，可求得：

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

与式1比较可得：

$$R_H = \frac{1}{ne}, K_H = \frac{R_H}{d} \quad (2)$$

考虑半导体器件， $R_H$  应修正为  $R_H = A \frac{1}{ne} = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{ne}$ ，实验中为简化计算，取  $A \approx 1$ 。

### 2.2 霍尔效应的副效应

实际情况下，霍尔效应的副效应将使霍尔电压的测量产生误差，主要包括以下几种效应：

- 厄廷豪森 (Etinghausen) 效应：由于不等于平均速度的载流子在洛伦兹力和霍尔电场力的共同作用下，向  $y$  轴的正向或反向两侧偏转，其动能在霍尔片两侧转化为热能，从而在 1、2 点之间产生温差电动势  $U_E$ 。 $U_E$  的符号取决与  $I$ 、 $B$  的方向。
- 能斯脱 (Nerset) 效应：由于焦耳效应，使得 3、4 两点的温度不同，从而引起载流子在  $x$  方向运动产生热流，在磁场作用下在 1、2 两点间产生电位差  $U_N$ 。 $U_N$  的符号取决与  $B$  的方向。
- 里纪-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应：上述热流中的载流子速度各不相同，同样会在 1、2 两点间产生温差电动势  $U_R$ 。 $U_R$  的符号取决与  $B$  的方向。
- 不等位效应：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  $U_0$ 。
- 其他：由于仪表调整的状态、仪器电压受杂散电磁场和电源地线的影响而产生的附加电压  $U_S$ 。

$I, B$  确定时，霍尔片的输出电压为上述几项代数和，即：

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

通过改变工作电流  $I$  和外加磁场  $B$  的方向的不同组合可消除或减少  $U_N, U_R, U_0$  的影响。 $U_E$  不可通过上述方法消除，但其大小在实验精度下可忽略。因此，消除副效应的重点是消除不等位效应  $U_0$ 。

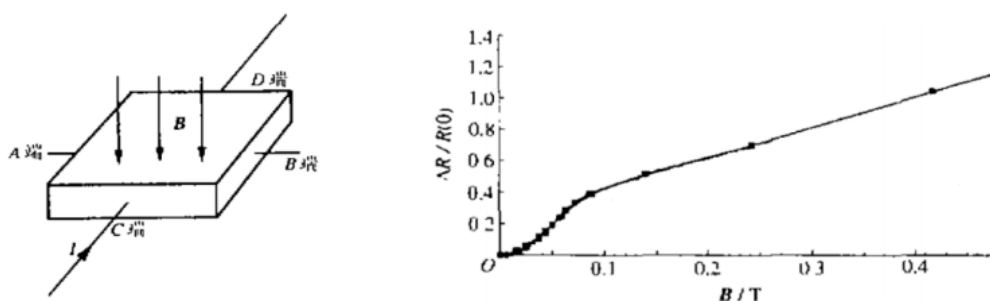
## 2.3 磁电阻效应原理

一定条件下，导电材料的电阻值  $R$  随磁感应强度  $B$  的变化规律为磁电阻效应。正常磁电阻情况下，半导体内载流子受洛伦兹力作用，发生偏转，形成霍尔电场。若霍尔电场作用于某一速度的载流子受到的洛伦兹力作用抵消，那么不等于该速度的载流子将发生偏转，沿电场方向运动的载流子数目减小，电阻增大，此即横向磁电阻效应。

设磁阻器件在零磁场时电阻及电阻率为  $R(0), \rho(0)$ ，磁场为  $B$  时电阻及电阻率为  $R(B), \rho(B)$ ， $\Delta\rho = \rho(B) - \rho(0)$ ， $\Delta R = R(B) - R(0)$ 。以电阻率相对该变量  $\Delta\rho/\rho(0)$  表示磁阻。分析可得，磁场较弱时， $\Delta R/R(0) \propto B^2$ ；磁场较强时， $\Delta R/R(0) \propto B$ ，如图2右所示。本实验中， $B \leq 0.06T$  看作弱磁场， $B \geq 0.12T$  看作强磁场。

由于  $\Delta R/R(0)$  与电流输入端 C、D 的状态以及 A、B 输出端短路或开路有关，因此实验结果应注明工作条件。

图 2: 磁电阻效应示意图



## 3. 实验仪器

实验桌号：5 号

- 万用表
- 霍尔元件磁阻元件及电磁铁 (仪器编号: 110838)
- 电流源

相关参数为:

- 励磁电流  $I_M = 0 \sim 1000mA$ , 工作电流  $I_S = 1.5 \sim 10mA$
- 霍尔片尺寸  $300 \times 100 \times 3\mu m$
- 当  $I_M = 500mA$  时, 磁极中心磁感应强度  $B = 126.1mT$

## 4. 实验步骤及注意事项

### 4.1 实验步骤

- 安装实验电路, 使用位置调整机构使霍尔片位于磁隙中心位置后开始实验。
- 测量霍尔片输出电压  $U_H$  与输入电流  $I$  的关系曲线。其中, 电流源的工作电流  $I_S$  的变化范围为  $2mA \sim 8mA$ , 测量点间隔  $1mA$ , 每次均测量  $U_1(+B, +I_H)$ 、 $U_2(+B, -I_H)$ 、 $U_3(-B, -I_H)$ 、 $U_4(-B, +I_H)$  四组数据。
- 标定激励电流  $I_M$  与磁极间磁场  $B$  的关系。其中, 工作电流  $I_S = 4.00mA$ , 励磁电流  $I_M = 0 \sim 1000mA$ 。
- 测定磁极间隙水平方向磁场的分布曲线  $B \sim x$ 。 ( $I_M = 500mA, I_S = 4.00mA$ )
- 测量霍尔片中载流子的迁移率  $\mu$ 。
- 测量磁阻元件的磁阻特性曲线, 即  $\Delta R/R(0)$  随磁场的变化规律。
- 判断霍尔片载流子的类型。

### 4.2 注意事项

- 避免挤压、碰撞霍尔元件及二维移动标尺。实验前检查二者及电磁铁是否松动、移位并加以调整。
- 实验前应将霍尔元件移至电磁铁气隙中心, 调整霍尔元件方位, 使其在  $I_M$ 、 $I$  固定时, 输出  $U_H$  达到最大。
- 除在测量有关数据时通励磁电流  $I_M$  外, 其余时间最好断开励磁电流。

## 5. 实验数据处理

### 5.1 测定霍尔片输出电压 $U_H$ 与输入电流 $I$ 的关系

实验测量结果如表1所示。其中电压与磁场、电流方向对应关系为:  $U_1 \sim (+B, +I_H)$ ,  $U_2 \sim (+B, -I_H)$ ,  $U_3 \sim (-B, -I_H)$ ,  $U_4 \sim (-B, +I_H)$

表 1:  $U_H \sim I$  数据表格

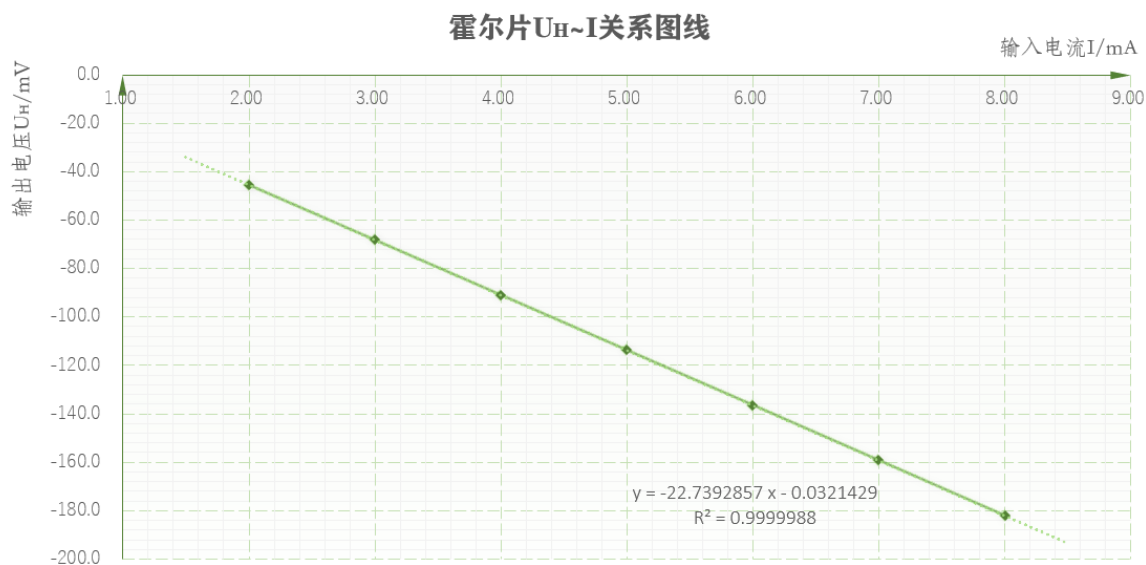
$I/\text{mA}$	$U_1/\text{mV}$	$U_2/\text{mV}$	$U_3/\text{mV}$	$U_4/\text{mV}$	$U_H/\text{mV}$
2.00	-45.3	45.0	-46.1	45.9	-45.6
3.00	-67.9	67.4	-69.1	68.6	-68.3
4.00	-90.7	89.6	-92.2	91.3	-91.0
5.00	-113.4	111.7	-115.6	114.1	-113.7
6.00	-136.3	133.8	-138.9	136.6	-136.4
7.00	-159.4	155.8	-162.4	159.2	-159.2
8.00	-182.7	177.8	-186.0	181.6	-182.0

其中，根据实验原理， $U_H$  的计算公式为 (保留一位小数)：

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

根据表1，在 Excel 软件中作出输出电压与输入电流  $U_H \sim I$  关系图线如图3所示。

图 3:  $U_H \sim I$  关系图线



根据线性拟合关系，相关系数  $R^2 = 0.9999988$ ，表明线性相关系数强，拟合直线斜率  $k \approx -22.74(\text{V}/\text{A})$ 。由此计算霍尔片灵敏度：

$$K_H = \frac{U_H}{IB_0} = \frac{k}{B_0} = \frac{-22.74}{126.1 \times 10^{-3}} = -180.33 \text{V}/(\text{A} \cdot \text{T})$$

霍尔系数：

$$R_H = K_H d = -180.333 \times 3 \times 10^{-6} = -5.4100 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{C}$$

载流子浓度：

$$n = \frac{1}{R_H e} = \frac{1}{5.410 \times 10^{-4} \times 1.602 \times 10^{-19}} = 1.1538 \times 10^{22} m^{-3}$$

计算拟合斜率不确定度：

$$s_k = t_p(n-2)|k| \sqrt{\frac{r^{-2}-1}{n-2}} = 2.571 \times 22.74 \times \sqrt{\frac{0.9999988^{-1}-1}{7-2}} = 0.029 V/A$$

计算  $K_H$  不确定度：

$$\Delta K_H = \frac{1}{B_0} s_k = \frac{0.029}{126.1 \times 10^{-3}} = 0.23 V/(A \cdot T)$$

计算  $R_H$  不确定度：

$$\Delta R_H = \Delta K_H d = 0.227 \times 3 \times 10^{-6} = 6.8 \times 10^{-7} m^3/C$$

计算载流子浓度  $n$  不确定度：

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial R_H}\right)^2 (\Delta R_H)^2} = n \frac{\Delta R_H}{R_H} = 1.1538 \times 10^{22} \times \frac{6.8 \times 10^{-7}}{5.4100 \times 10^{-4}} = 1.45 \times 10^{19} m^{-3}$$

由计算结果可得各物理量的最终结果为：

$$K_H = (-180.33 \pm 0.23) V/(A \cdot T)$$

$$R_H = (-5.4100 \pm 0.0069) \times 10^{-4} m^3/C$$

$$n = (1.1538 \pm 0.0015) \times 10^{22} m^{-3}$$

## 5.2 标定励磁电流 $I_M$ 与磁极间磁场的关系

实验测量结果如表2所示 ( $I_S = 4.00 mA$ )。

表 2:  $B \sim I_M$  数据表格

$I_M/mA$	$U_1/mV$	$U_2/mV$	$U_3/mV$	$U_4/mV$	$U_H/mV$	$B/mT$
100	-17.6	16.5	-19.5	18.3	-18.0	24.9
200	-35.8	34.7	-37.5	36.5	-36.1	50.1
300	-54.0	52.9	-55.6	54.6	-54.3	75.2
400	-72.2	71.1	-73.9	72.9	-72.5	100.5
500	-90.4	89.4	-91.9	90.9	-90.7	125.7
600	-108.9	107.8	-110.4	109.5	-109.2	151.3
700	-127.1	126.1	-128.2	127.4	-127.2	176.3
800	-145.2	144.2	-146.6	145.8	-145.5	201.6

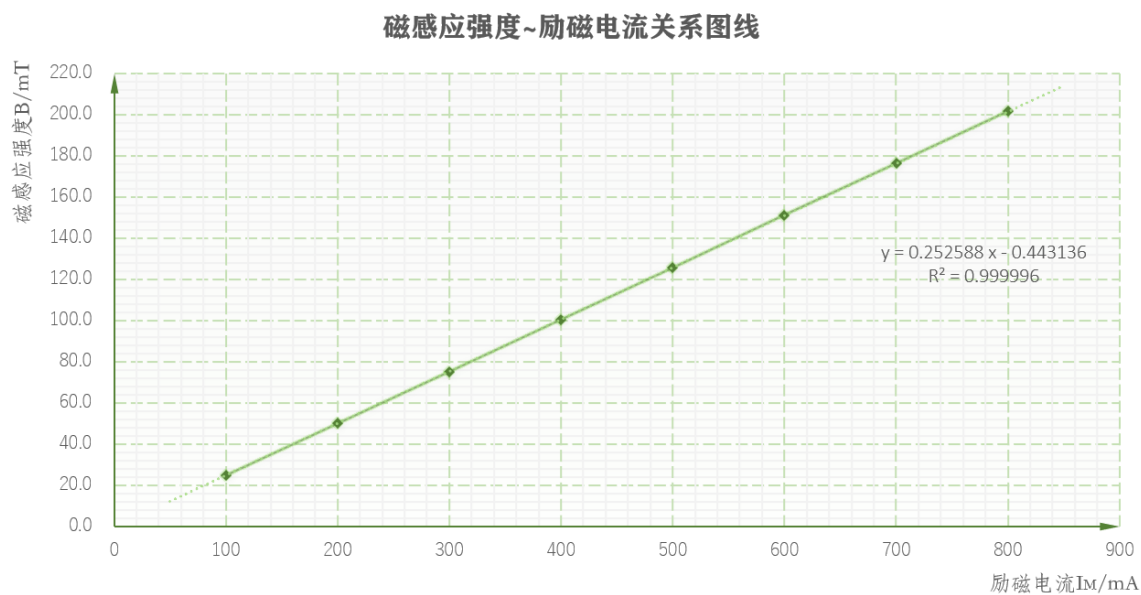
其中， $U_H$ 、 $B$  的计算公式分别为：

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

$$B = \frac{U_H}{K_H I} = \frac{U_H}{-180.33 \times 4 \times 10^{-3}}$$

根据表2，在 Excel 软件中作出磁感应强度与励磁电流  $B \sim I_M$  关系图线如图4所示。

图 4:  $B \sim I_M$  关系图线



线性拟合所得直线为  $B = 0.2526I_M - 0.4431$ ，相关系数  $R_2 = 0.999996$ ，表明线性相关系数强，与理论分析相符。

### 5.3 标定磁极间隙水平方向磁场分布曲线

实验测量结果如表3所示 ( $I_S = 4.00mA$ ,  $I_M = 500mA$ )。



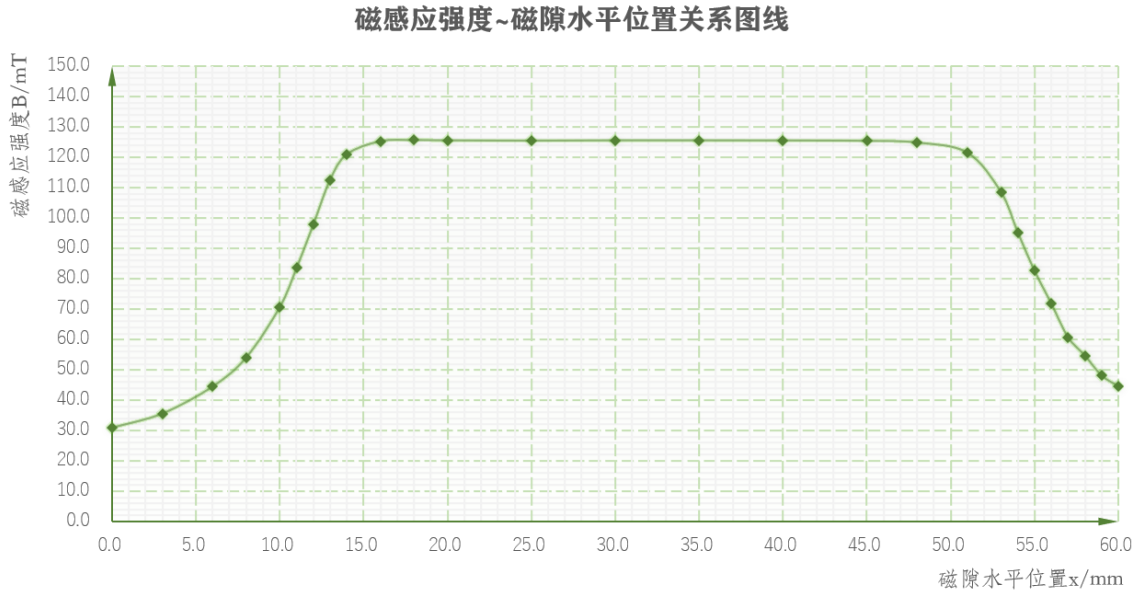
表 3: 水平方向磁场分布数据表格

$x/mm$	$U_1/mV$	$U_2/mV$	$U_3/mV$	$U_4/mV$	$U_H/mV$	$B/mT$
0.0	-22.2	21.1	-23.7	22.6	-22.4	30.9
3.0	-25.6	24.5	-27.1	26.0	-25.8	35.6
6.0	-32.1	31.0	-33.5	32.5	-32.3	44.5
8.0	-39.4	39.8	-39.4	38.3	-39.2	54.1
10.0	-51.1	50.0	-52.5	51.5	-51.3	70.7
11.0	-60.4	59.3	-61.9	60.9	-60.6	83.6
12.0	-70.8	69.8	-72.2	71.3	-71.0	97.9
13.0	-81.5	80.5	-82.9	82.0	-81.7	112.7
14.0	-87.6	86.6	-89.0	88.1	-87.8	121.1
16.0	-90.8	89.7	-92.1	91.2	-91.0	125.4
18.0	-91.0	89.9	-92.4	91.5	-91.2	125.7
20.0	-91.0	89.9	-92.3	91.4	-91.2	125.7
25.0	-90.9	89.8	-92.3	91.3	-91.1	125.6
30.0	-91.0	89.8	-92.4	91.4	-91.2	125.7
35.0	-91.0	89.9	-92.3	91.4	-91.2	125.7
40.0	-90.9	89.9	-92.3	91.4	-91.1	125.6
45.0	-90.8	89.8	-92.2	91.3	-91.0	125.5
48.0	-90.4	89.4	-91.8	90.9	-90.6	124.9
51.0	-88.0	86.9	-89.4	88.5	-88.2	121.6
53.0	-78.6	77.5	-80.0	79.0	-78.8	108.6
54.0	-69.0	67.9	-70.4	69.4	-69.2	95.4
55.0	-59.8	58.7	-61.2	60.2	-60.0	82.7
56.0	-51.9	50.8	-53.3	52.5	-52.1	71.9
57.0	-43.8	42.8	-45.3	44.3	-44.1	60.7
58.0	-39.5	38.4	-41.0	39.9	-39.7	54.7
59.0	-34.7	33.6	-36.2	35.1	-34.9	48.1
60.0	-32.1	31.0	-33.6	32.6	-32.3	44.6

其中,  $U_H$ 、 $B$  的计算公式与表2相同。

根据表2, 在 Excel 软件中作出磁感应强度与水平磁隙  $B \sim x$  关系图线如图5所示。

图 5:  $B \sim x$  关系图线



根据图线可得出，在  $18.0\text{mm} \leq x \leq 45.0\text{mm}$  范围内，磁感应强度稳定。计算得均匀磁场区间长度为  $27.0\text{mm}$ 。

根据该区域内的磁感应强度取平均值，可得  $\bar{B} = 125.64\text{mT}$ 。

#### 5.4 测量霍尔元件的载流子迁移率 $\mu$

实验测量结果如表4所示 ( $I_M = 0\text{mA}$ )。

表 4: 测量  $\mu$  数据表格

$I_S/\text{mA}$	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
$U/\text{V}$	1.5269	2.297	3.084	3.881	4.692	5.506	6.376

取其中一个测量结果计算霍尔片中载流子迁移率  $\mu$ 。不妨取  $I_S = 4.00\text{mA}$ ,  $U = 3.084\text{V}$ ，则流入电流方向场强：

$$E = \frac{U}{l} = \frac{3.084}{300 \times 10^{-6}} = 10.28 \times 10^3 \text{V/m}$$

载流子平均运动速率：

$$v = \frac{I}{neS} = \frac{|K_H|I}{b} = \frac{181.33 \times 4.00 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-6}} = 7.2532 \times 10^3 \text{m/s}$$

霍尔元件载流子迁移率：

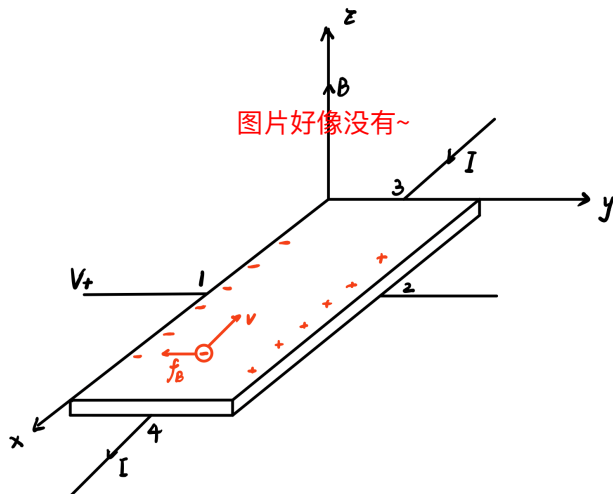
$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{7.2532 \times 10^3}{10.28 \times 10^3} = 0.706 \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$$

#### 5.5 判断霍尔片载流子类型

霍尔片载流子应为电子，霍尔片材质为 N 型半导体。

如图6所示，当电压表正接线柱接 1 端时，测得  $U_H < 0$ 。不妨假设载流子为电子，电子从 4→3 运动产生 3→4 的电流，根据左手定则，载流子将受到 2→1 方向的洛伦兹力，从而向霍尔片 1 端聚集，产生  $U_H < 0$ 。假设正确，因而霍尔片载流子为电子，材质为 N 型半导体。

图 6: 霍尔片载流子类型分析示意图



## 5.6 磁阻器件的磁电阻效应

实验测量结果如表5所示 (AB 间短路, CD 间恒流  $I_{CD} = 1.50mA$ )。

表 5: 磁电阻效应数据表格

$I_M/mA$	$U_{CD}/mV$	$R(B)/\Omega$	$\Delta R/\Omega$	$\Delta R/R(0)$	$B/mT$
0	0.4879	325.27	0.00	0.0000	-0.443
50	0.4964	330.93	5.66	0.0174	12.186
100	0.5202	346.80	21.53	0.0662	24.816
150	0.5549	369.93	44.66	0.1373	37.445
200	0.5995	399.67	74.40	0.2287	50.075
250	0.6487	432.47	107.20	0.3296	62.704
300	0.7020	468.00	142.73	0.4388	75.334
350	0.7490	499.33	174.06	0.5351	87.963
400	0.7851	523.40	198.13	0.6091	100.593
500	0.8333	555.53	230.26	0.7079	125.852
600	0.8727	581.80	256.53	0.7887	151.111
700	0.9088	605.87	280.60	0.8627	176.370
800	0.9434	628.93	303.66	0.9336	201.629
900	0.9786	652.40	327.13	1.0057	226.888
1000	1.0132	675.47	350.20	1.0766	252.147

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：

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

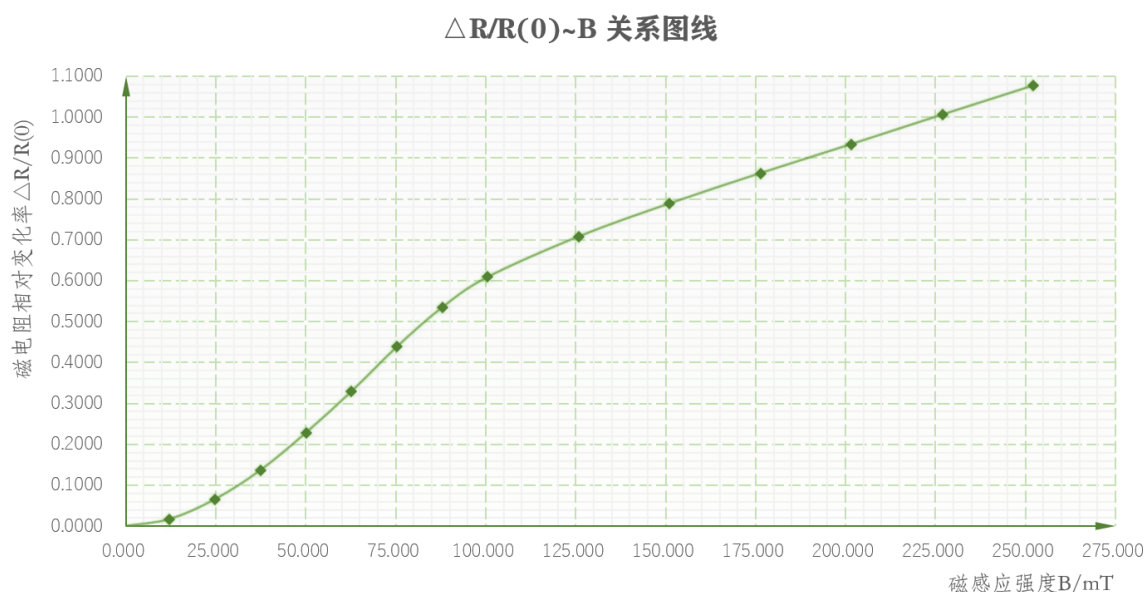
$\Delta R$  表示上述等效电阻与  $R(0)$  之差  $\Delta R = R(B) - R(0)$ ，比值表示为  $\Delta R/R(0)$ 。

磁感应强度  $B$  根据 5.2 节中拟合所得直线计算得出：

$$B = 0.2526 I_M - 0.4431$$

根据表5，在 Excel 软件中作出磁感应强度与电阻比值  $\frac{\Delta R}{R(0)} \sim B$  关系图线如图7所示。

图 7:  $\frac{\Delta R}{R(0)} \sim B$  关系图线



根据实验讲义，当  $0 \leq B \leq 60 mT$  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  $B \geq 120 mT$  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。

利用 Excel 软件对上述数据进行拟合，计算得前 6 个点的相关系数  $R_2 = 0.9991$ ，二次函数关系理想；后 6 个点的相关系数  $R_2 = 0.99987$ ，线性关系理想，实验结果与理论分析相符。

## 6. 思考题

### 6.1 思考题一

如何计算实验中的霍尔片的载流子迁移率  $\mu$ ？ $\mu$  可定义为单位电场强度作用下载流子的平均漂移速度  $\mu = \frac{v}{E}$ ， $v$  为载流子速率， $E$  为电流场的电场强度。

不妨设霍尔片中匀强电场大小为  $E$ ，通过万用表、电流源可得出霍尔片 3、4 两表面电势差  $U$  以及输入电流大小  $I$ 。霍尔片沿  $I$  方向的长度为  $l$ ，垂直  $I$  方向面积  $S = bd$ ，则：

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

根据公式  $I = neSv$ ，可求得：

$$v = \frac{I}{neS} = \frac{I}{nebd}$$

结合公式：

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

联立可得：

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

因而载流子迁移率：

$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{|K_H|Ib}{Ul}$$

## 6.2 思考题二

如何观察不等位效应？如何消除不等位效应对测量带来的影响？

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。

工作电流相同时，可以认为不等位电压的符号仅与输入电流  $I$  的方向相关。因此，可通过测量  $B$ 、 $I$  在不同极性时的霍尔电压对不等位效应以及其他霍尔效应的副效应进行消除。

其中，根据理论分析， $U_E$  的值可忽略， $U_R$ 、 $U_N$  的符号仅与  $B$  的方向有关，不等位效应  $U_0$  的符号仅与  $I$  的方向有关，其他副效应与  $I$ 、 $B$  无关。

因此，可得  $B$ 、 $I$  取不同方向时的函数关系式：

$$\begin{aligned} U_1 &= U(+B, +I_H) = f(U_H, U_N, U_R, U_0, U_S) \\ U_2 &= U(+B, -I_H) = f(-U_H, U_N, U_R, -U_0, U_S) \\ U_3 &= U(-B, -I_H) = f(U_H, -U_N, -U_R, -U_0, U_S) \\ U_4 &= U(-B, +I_H) = f(-U_H, -U_N, -U_R, U_0, U_S) \end{aligned} \quad (3)$$

因此，利用公式：

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

即可消除不等位效应以及其他所述副效应带来的影响。其中， $U_1 + U_3$ 、 $U_2 + U_4$  可消除不等位效应  $U_0$  的影响。

## 6.3 思考题三

如何利用霍尔效应测量磁场？

首先需要测量或标定霍尔片灵敏度  $K_H$  (可依照本实验 5.1 部分拟合得出，也可通过霍尔系数  $R_H$ ，根据公式  $K_H = R_H/d$  得出)。由公式：

$$U_H = K_H IB$$

对  $U_H$ 、 $I$  进行测量 (需按照本实验方案消除副效应), 即可得到磁感应强度:

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

## 7. 实验小结

总体而言, 本次实验操作难度不大, 实验仪器精确度较高, 实验结果准确, 但实验数据量较大, 需要处理的图片较多, 需要进行严谨的分析。概括而言, 本次实验有以下几点收获。

- 正确理解实验原理, 仔细阅读实验操作

本次实验原理并不复杂, 笔者在预习阶段便理解了实验内容。但由于笔者对实验操作的细节有一些疏忽, 因而在实验过程中, 测量载流子迁移率  $\mu$  以及磁电阻效应时, 忘记将霍尔元件移回中心, 霍尔元件仍处于测量  $B \sim x$  曲线时的结束位置, 测得值明显较小。在更正该操作后, 问题得到解决。

- 对霍尔效应有更进一步的认识

此前, 笔者对霍尔效应的认识还停留在较为浅显的阶段, 在此次进行实验后, 一方面通过直观实验对霍尔效应的现象有了形象化的认识, 另一方面对霍尔效应的副效应以及霍尔效应最新的研究进展有了更多了解。

- 对物理实验消除误差的方法有了更多了解

本次实验通过较为巧妙的方法消除了霍尔效应的副效应带来的误差, 在思考题中对这一消除误差的方式进行分析的过程中, 笔者对物理实验如何进行设计并减小实验误差有了更多认识。

最后, 感谢助教对我们的悉心指导!

## 8. 附录：原始数据记录表格及预习报告

图 8: 原始数据记录表格-第一页

110838 . 126.1 mT .

### 5. 实验数据表格

#### 5.1 测定 $U_H$ 和 $I$ 的关系

表 1:  $U_H \sim I$  数据表格

$I/\text{mA}$	$U_1/\text{mV}$	$U_2/\text{mV}$	$U_4/\text{mV}$	$U_3/\text{mV}$	$U_H/\text{mV}$	$R_H(\text{m}^3/\text{C})$
2.00	-45.3	45.0	45.9	-46.1		
3.00	-67.9	67.4	68.6	-69.1		
4.00	-90.7	89.6	91.3	-92.2		
5.00	-113.4	111.7	114.1	-115.6		
6.00	-136.3	133.8	136.6	-138.9		
7.00	-159.4	155.8	159.2	-162.4		
8.00	-182.7	177.8	181.6	-186.0		

#### 5.2 标定励磁电流 $I_M$ 与磁极间磁场关系

程强宇

表 2:  $B \sim I_M$  数据表格

$I_M/\text{mA}$	$U_1/\text{mV}$	$U_2/\text{mV}$	$U_4/\text{mV}$	$U_3/\text{mV}$	$U_H/\text{mV}$	$B/\text{mT}$
<del>10</del>	<del>17.6</del>	<del>16.5</del>				
100	-17.6	16.5	18.3	-19.5		
200	-35.8	34.7	36.5	-37.5		
300	-54.0	52.9	54.6	-55.6		
400	-72.2	71.1	72.9	-73.9		
500	-90.4	89.4	90.9	-91.9		
600	-108.9	107.8	109.5	-110.4		
700	-127.1	126.1	127.4	-128.2		
800	-145.2	144.2	145.8	-146.6		

图 9: 原始数据记录表格-第二页

0	50	100	150	200	250	300	350	400
0.4879	0.4964	<del>0.5202</del>	0.5549	0.5995	<del>0.6487</del>	0.7020	0.7490	0.7851

5.3 磁电阻效应测量

500	600	700	800	900	1000
0.8333	0.8727	0.9088	0.9434	0.9786	1.0132

表 3: 磁电阻效应数据表格  $I_s = 1.50 \text{ mA}$ , 2V 档

$I_M/\text{mA}$	0	50	100	150	200	250	300	350
$U/\text{V}$	<del>0.4983</del>	<del>0.4998</del>	<del>0.5012</del>	<del>0.5035</del>	<del>0.5070</del>	<del>0.5126</del>	<del>0.5168</del>	<del>0.5227</del>
$I_M/\text{mA}$	400	500	600	700	800	900	1000	
$U/\text{V}$	<del>0.5296</del>	<del>0.5446</del>	<del>0.5623</del>	<del>0.5800</del>	<del>0.5999</del>	<del>0.61976</del>	<del>0.6369</del>	

#### 5.4 磁极间隙水平方向磁场分布

表 4: 水平方向磁场分布数据表格

$x/\text{mm}$	$U_1/\text{mV}$	$U_2/\text{mV}$	$U_4/\text{mV}$	$U_5/\text{mV}$	$U_H/\text{mV}$	$B/\text{mT}$
0.0	-22.2	21.1	22.6	-23.7		
3.0	-25.6	24.5	26.0	-27.1		
6.0	-32.1	31.0	32.5	-33.5		
8.0	-39.4	39.8	<del>38.3</del>	-39.4		
10.0	-51.1	50.0	51.5	-52.5		
12.0	-70.8	69.8	71.3	-72.2		
14.0	-87.6	86.6	88.1	-89.0		
16.0	-90.8	89.7	91.2	-92.1		
18.0	-91.0	89.9	91.5	-92.4		
20.0	-91.0	89.9	91.4	-92.3		
11.0	-60.4	59.3	60.9	-61.9		
13.0	-81.5	80.5	82.0	-82.9		

量程

#### 5.5 测量 $\mu$

表 5: 测量  $\mu$  数据表格

$I_s/\text{mA}$	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
$U/\text{V}$	<del>1.7985</del>	<del>2.297</del>	<del>3.084</del>	<del>3.881</del>	<del>4.692</del>	<del>5.506</del>	<del>6.376</del>
	1.5269	2.297	3.084	3.881	4.692	5.506	6.376



图 10: 原始数据记录表格-第三页

(续表)

$x/\text{mm}$	$U_1/\text{mV}$	$U_2/\text{mV}$	$U_A/\text{mV}$	$U_B/\text{mV}$
25.0	-90.9	89.8	91.3	-92.3
30.0	-91.0	89.8	91.4	-92.4
35.0	<del>9</del> -91.0	89.9	91.4	-92.3
40.0	-90.9	89.9	91.4	-92.3
45.0	-90.8	89.8	91.3	-92.2
48.0	-90.4	89.4	90.9	-91.8
51.0	-88.0	86.9	88.5	-89.4
53.0	-78.6	77.5	79.0	-80.0
54.0	-69.0	67.9	69.4	-70.4
55.0	-59.8	58.7	60.2	-61.2
56.0	-51.9	50.8	52.5	-53.3
57.0	-43.8	42.8	44.3	-45.3
58.0	-39.5	38.4	39.9	<del>41.0</del> -41.0
59.0	-34.7	33.6	35.1	-36.2
60.0	-32.1	31.0	32.6	-33.6

程强

## 1. 实验目的

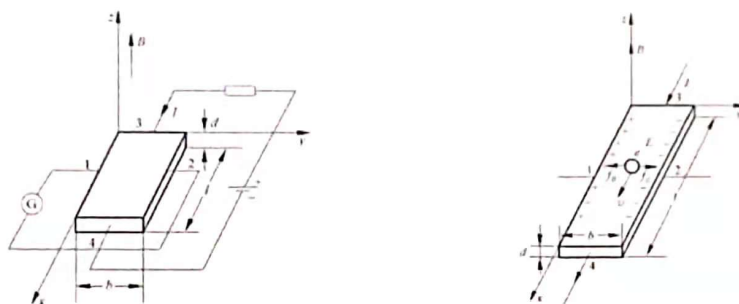
- 了解霍尔效应的产生原理以及副效应的产生原理；
- 掌握霍尔系数的测量方法，学习消除霍尔副效应的实验方法；
- 研究半导体的电阻值随磁场的变化规律。

## 2. 实验原理

### 2.1 霍尔效应

霍尔效应原理如图1所示。

图 1: 霍尔效应原理示意图



如图1左所示。沿  $x$  轴正方向通以电流  $I$ ，并在  $z$  方向加以磁场  $B$ ，则 1、2 两点之间将产生电位差，且满足：

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB \quad (1)$$

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。

公式1可用洛伦兹力的原理加以说明。如图1右所示，考虑正电荷空穴型载流子，电荷为  $e$ ，平均迁移速度为  $v$ ，根据公式  $f_B = evB$ ,  $f_E = eE$ ，平衡状态时， $f_B = f_E$ ，可解得  $U_H = vbB$ 。由于  $I = nevbd$ ，可得：

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

与式1比较可得， $R_H = 1/ne$ ， $K_H = \frac{R_H}{d}$ 。

### 2.2 霍尔效应的副效应

实际情况下，霍尔效应的副效应将使霍尔电压的测量产生误差，主要包括以下几种效应：

- 厄廷好森 (Etinghausen) 效应：由于不等于平均速度的载流子在洛伦兹力和霍尔电场力的共同作用下，向  $y$  轴的正向或反向两侧偏转，其动能在霍尔片两侧转化为热能，从而在 1、2 点之间产生温差电动势  $U_e$ 。

- 能斯脱 (Nerset) 效应：由于焦耳效应，使得 3、4 两点的温度不同，从而引起载流子在  $x$  方向运动产生热流，在磁场作用下在 1、2 两点间产生电位差  $U_N$ 。
- 里纪-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应：上述热流中的载流子速度各不相同，同样会在 1、2 两点间产生温差电动势  $U_R$ 。
- 不等位效应：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  $U_0$ 。
- 其他：由于仪表调整的状态、仪器电压受杂散电磁场和电源地线的影响而产生的附加电压  $U_S$ 。

$I, B$  确定时，霍尔片的输出电压为上述几项代数和，即： $U = f(U_H, U_E, U_N, U_R, U_0, U_S)$ 。

通过改变工作电流  $I$  和外加磁场  $B$  的方向的不同组合来消除或减少  $U_N, U_R, U_0$  的影响。 $U_E$  不可通过上述方法消除，但其大小在实验精度下可忽略。因此，消除副效应的重点是消除不等位效应  $U_0$ 。

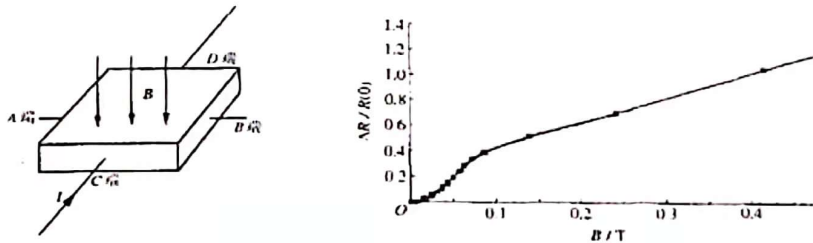
### 2.3 磁电阻效应原理

一定条件下，导电材料的电阻值  $R$  随磁感应强度  $B$  的变化规律为磁电阻效应。正常磁电阻情况下，半导体内载流子受洛伦兹力作用，发生偏转，形成霍尔电场。若霍尔电场作用于某一速度的载流子受到的洛伦兹力作用抵消，那么不等于该速度的载流子将发生偏转，沿电场方向运动的载流子数目减小，电阻增大，此即横向磁电阻效应。

设磁阻器件在零磁场时电阻及电阻率为  $R(0), \rho(0)$ ，磁场为  $B$  时电阻及电阻率为  $R(B), \rho(B)$ ， $\Delta\rho = \rho(B) - \rho(0)$ ， $\Delta R = R(B) - R(0)$ 。以电阻率相对该变量  $\Delta\rho/\rho(0)$  表示磁阻。分析可得，磁场较弱时， $\Delta R/R(0) \propto B^2$ ；磁场较强时， $\Delta R/R(0) \propto B$ ，如图2右所示。

由于  $\Delta R/R(0)$  与电流输入端 C、D 的状态以及 A、B 输出端短路或开路有关，因此实验结果应注明工作条件。

图 2: 磁电阻效应示意图



## 3. 实验仪器

- 万用表
- 霍尔元件磁阻元件及电磁铁
- 电流源

## 4. 实验步骤及注意事项

### 4.1 实验步骤

- 设计电路，画出完整电路图。安装实验电路，使用位置调整机构使霍尔片位于磁隙中心位置后开始实

验。

- 测量霍尔片输出电压  $U_H$  与输入电流  $I$  的关系曲线。其中，电流源的工作电流  $I_S$  的变化范围为  $2mA \sim 8mA$ , 测量点间隔  $1mA$ , 每次均测量  $U_1(+B, +I_H)$ 、 $U_2(+B, -I_H)$ 、 $U_3(-B, -I_H)$ 、 $U_4(-B, +I_H)$  四组数据。
- 标定激励电流  $I_M$  与磁极间磁场  $B$  的关系。
- 测量磁阻元件的磁阻特性曲线，即  $\Delta R/R(0)$  随磁场的变化规律。
- 测定磁极间隙水平方向磁场的分布曲线  $B \sim x$ 。 ( $I_M = 500mA$ ,  $I_S = 4.00mA$ )
- 判断霍尔片载流子的类型。
- 测量霍尔片中载流子的迁移率  $\mu$ 。

#### 4.2 注意事项

- 避免挤压、碰撞霍尔元件及二维移动标尺。实验前检查二者及电磁铁是否松动、移位并加以调整。
- 实验前应将霍尔元件移至电磁铁气隙中心，调整霍尔元件方位，使其在  $I_M$ 、 $I$  固定时，输出  $U_H$  达到最大。
- 除在测量有关数据时通励磁电流  $I_M$  外，其余时间最好断开励磁电流。
- 仪器不应在强光照射下，高温、强磁场、有腐蚀气体的环境下工作和存放。