

实验名称: 霍尔效应

姓名: 刘子言 学号: 20002462 实验班: G13 组号: 15 教师: 倪一

一、实验目的

1. 了解霍尔元件的基本原理及产生的条件
2. 掌握测量室温下半导体材料的霍尔元件的基本参数的方法
3. 测绘霍尔元件的 $U_H - I_S$ 、 $U_H - I_m$ 曲线, 了解霍尔电压与霍尔元件工作电流 I_S 和励磁电流 I_m 之间的关系。

二、实验原理

1. 平板半导体内的霍尔效应

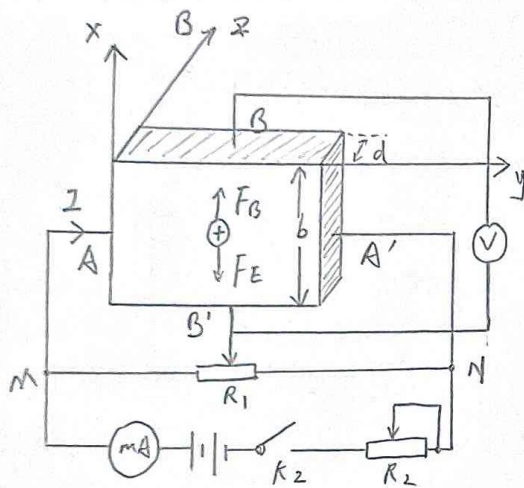


图1: 半导体薄片的霍尔效应

(1) 磁场中速度为 u 运动载流子受洛伦兹力作用:

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

(2) 电荷聚集形成电压 $U_{BB'}$ 载流子受电场力作用:

$$F_E = q \frac{U_{BB'}}{b} \quad (2)$$

(3) 电场力与洛伦兹力达到平衡, 形成稳定电压 $U_{BB'}$:

$$q \frac{U_{BB'}}{b} = qub \quad (3)$$

其中 $U_{BB'}$ 即为霍尔效应所产生的电势差。

又考虑到载流子浓度为 n

$$I_S = nqubd \quad (4)$$

由 (3) 与 (4) 可以得到:

$$U_{BB'} = \frac{1}{nq} \cdot \frac{I_S b}{d} = R_H \cdot \frac{I_S b}{d} \quad (5)$$

霍尔效应是指: 在长方形导体薄板上通以电流, 沿电流的垂直方向施加磁场, 就会在与电流和磁场两者垂直的方向上产生电势差, 这种现象称为霍尔效应。

(4) 公式 (5) 中 $R_H = \frac{1}{nq}$, 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为霍尔元件。

(5) 在应用中, ⑤常用: $U_{BB'} = K_H I_S B$ (6)

其中 $K_H = \frac{1}{nq d}$, 称为霍尔元件的灵敏度。 I_S 是工作电流, 为流过霍尔元件的电流。若已知霍尔片的灵敏度 K_H , 用仪器测出 $U_{BB'}$ 和 I_S 即可求得磁感应强度的量值。

(6) 霍尔元件的电导率: $\begin{cases} R = \rho \cdot \frac{L}{S} \\ S = \frac{L}{R} \end{cases} \Rightarrow \sigma = \frac{1}{U_{BB'}} \cdot \frac{I_S}{bd} \quad (7)$

(7) 霍尔迁移率: 在弱电场作用下, 载流子平均漂移速率与电场强度的比值。

$$\mu = |R_H| \sigma \quad (8)$$

表示每秒钟每伏特电压下载流子的运动范围大小, 用来描述载流子在电场下运动的难易程度。

2. 样品导电类型的确定:

样品导电类型有2种: P型(空穴), N型(电子)

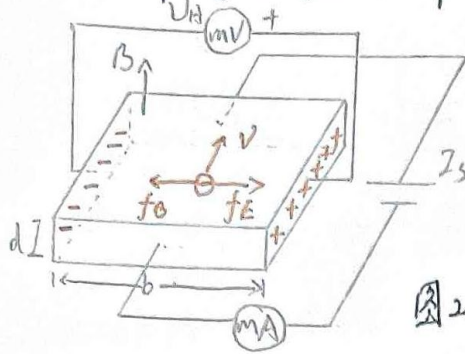


图2: N型霍尔元件

如左图2所示样品即为N型霍尔元件。

根据右手螺旋定则, 从工作电流 I_s 方向旋到磁感应强度 B 的方向, 大拇指所指方向若为正极, 则测得的霍尔电压为正, 样品为P型; 反之, 若指向负极, 则为N型。

3. 霍尔效应实验中的负效应.

(1) 4种负效应:

埃廷斯豪森效应	U_E 方向与 I 和 B 方向有关
能斯特效应	U_N 方向只与 B 方向有关
里吉-勒迪克效应	U_{RL} 的方向只与 B 方向有关
不等位效应	U_0 的方向只与 I 的方向有关。

(2) 负效应的消除:

改变 I 和 B 的方向, 即对称测量法。

磁场和工作电流方向	测得的电压 U_i	U_H 的方向
$+B, +I$	$U_1 = U_H + U_E + U_N + U_{RL} + U_0$	+
$+B, -I$	$U_2 = -U_H - U_E + U_N + U_{RL} - U_0$	-
$-B, -I$	$U_3 = U_H + U_E - U_N - U_{RL} - U_0$	+
$-B, +I$	$U_4 = -U_H - U_E - U_N - U_{RL} + U_0$	-

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

由于 U_E 一般可以忽略

所以简化后, 则有: $U_H = \frac{1}{4}(|U_1| + |U_2| + |U_3| + |U_4|)$

三. 实验仪器

Q5-14 霍尔效应组合仪, 小磁针, 测试仪。

霍尔效应组合仪包括电磁磁铁、霍尔样品和样品架, 换向开关以及接线柱

霍尔效应组合仪见实验报告末尾附图(图3)。

四、实验内容与主要步骤

1. 连线:

将测试仪上励磁电流 I_m 输出、工作电流 I_s 输出和霍尔电压 U_H (特等不等位电压 U_6) 输入三对接线柱分别与实验台上对应接线柱连接;

将霍尔元件与工作电流的换向开关连接。

2. 在零磁场 $I_m = 0$ 下, 取 $I_s = 0.1 \text{ mA}$, 测量不等位电势 U_6 (取绝对值), 计算电导率 σ

3. 保持磁场不变, 取 $I_m = 0.450 \text{ A}$, I_s 取 $0.50, 1.00, \dots, 4.50 \text{ mA}$, 记录数据, 测绘 $U_H - I_s$ 曲线, 计算 R_H 。

4. 保持 I_s 不变, 取 $I_s = 4.50 \text{ mA}$, I_m 取 $0.050, 0.100, \dots, 0.450 \text{ A}$, 记录数据, 测绘 $U_H - I_m$ 曲线, 计算 K_H 。

5. 将使用的所有旋钮调为0, 关闭电源, 整理实验仪器, 结束实验。

五、数据记录与处理

1. 零磁场下由 $I_s = 0.1 \text{ mA}$ 时产生的不等位电势 V_6 (绝对值)

I_s / mA	$V_{(+I_s)} / \text{mV}$	$V_{(-I_s)} / \text{mV}$
$I_s = 0.1 \text{ mA}$	15.18	15.18

2. $U_H - I_s$

(1) 此时励磁电流大小 $I_m = 0.450 \text{ A}$

(2) 电磁线圈的磁场大小 $B = 5120 \text{ G/A} \times I_m = 2304 \text{ G} = 0.2304 \text{ T}$

(3) I_s 每次变化 0.5 mA 时显示的电压值 $V / (\text{mV})$

I_s / mA	$V_{(+I_m, +I_s)}$	$V_{(-I_m, +I_s)}$	$V_{(+I_m, -I_s)}$	$V_{(-I_m, -I_s)}$	$U_H = \frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$
0.50	1.47	-1.46	-1.49	1.48	1.475
1.00	2.95	-2.94	-2.97	2.96	2.955
1.50	4.43	-4.42	-4.45	4.44	4.435
2.00	5.91	-5.90	-5.93	5.92	5.915
2.50	7.39	-7.38	-7.41	7.40	7.395
3.00	8.86	-8.86	-8.88	8.86	8.865
3.50	10.34	-10.33	-10.36	10.35	10.345
4.00	11.82	-11.81	-11.84	11.83	11.825
4.50	13.30	-13.29	-13.32	13.31	13.305

(4) 用 Excel 绘制 $U_H - I_s$ 图像, 如图(4)所示, 见报告末附图4。

由图中的曲线拟合可得: $\frac{U_H}{I_s} = 2.954 \text{ (mV/mA)}$

3. $U_H - I_m$

(1) 此时工作电流大小 $I_s = 4.50 \text{ mA}$

(2) I_m 每次变化 0.05 A 时, 显示的电压值 (mV)

$$B = 5120 \text{ G/A} \times I_m, 1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$$

I_m / A	$V(+I_m, +I_s)$	$V(-I_m, +I_s)$	$V(+I_m, -I_s)$	$V(-I_m, -I_s)$	$B(\text{T})$	$U_H = \frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$
0.050	1.36	-1.35	-1.36	1.35	0.0256	1.355
0.100	2.85	-2.84	-2.86	2.85	0.0512	2.850
0.150	4.34	-4.34	-4.34	4.34	0.0768	4.340
0.200	5.84	-5.83	-5.85	5.84	0.1024	5.840
0.250	7.33	-7.32	-7.34	7.33	0.1280	7.330
0.300	8.82	-8.81	-8.84	8.83	0.1536	8.825
0.350	10.32	-10.31	-10.33	10.32	0.1792	10.320
0.400	11.81	-11.80	-11.82	11.81	0.2048	11.810
0.450	13.30	-13.29	-13.32	13.31	0.2304	13.305

(3) 用 Excel 绘制 $U_H - I_m$ 图像, 如图 5 所示, 见报告末尾附图 5

由图中曲线拟合可得: $\frac{U_H}{I_m} = 30.724 \text{ (mV/A)}$

4. 计算霍尔效应相关量 (霍尔元件规格: $L = 2.94 \text{ mm}$, $b = 3.92 \text{ mm}$, $d = 0.499 \text{ mm}$)

(1) 根据实验原理中公式 (5), 霍尔系数:

$$R_H = \frac{U_H}{I_s} \cdot \frac{d}{B} = 2.954 \times \frac{0.499 \times 10^{-3}}{0.2304} \approx 6.398 \text{ m}^3/\text{C}$$

(2) 根据实验原理中 R_H 的定义, 载流子浓度:

$$n = \frac{1}{R_H e} = \frac{1}{6.398 \times 1.6022 \times 10^{-19}} \approx 9.755 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$$

(3) 根据实验原理中公式 (7), 电导率:

$$\sigma = \frac{1}{V_6} \cdot \frac{I_s L}{b d} = \frac{1}{15.18 \times 10^{-3}} \times \frac{0.1 \times 10^{-3} \times 2.94 \times 10^{-3}}{3.92 \times 10^{-3} \times 0.499 \times 10^{-3}} \approx 9.90 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

(4) 根据实验原理中公式 (8), 迁移率:

$$\mu = |R_H| \sigma = 6.398 \times 9.90 \approx 63.35 \text{ m}^2/(\text{C} \cdot \Omega)$$

(5) 根据实验原理中公式 (6), 灵敏度:

$$K_H = \frac{U_H}{B} \cdot \frac{1}{I_s} = \frac{U_H}{I_m} \cdot \frac{1}{0.5120} \cdot \frac{1}{I_s} = 30.724 \times 10^{-3} \times \frac{1}{0.5120} \times \frac{1}{4.50 \times 10^{-3}} \approx 13.34 \text{ V/(A} \cdot \text{T)}$$

(6) 由记录的数据表可知, 当 I_m 与 I_s 同向时, 测得的电压值均为正; 反向时 V 均为负; 所以判断样品的导电类型为 P 型 (空穴)。

六、结果与分析

1. 基本了解了霍尔元件的工作原理, 掌握了测量霍尔元件基本参数的方法;
2. 根据实验数据及处理结果, 求得该霍尔元件的 R_H 、 n 、 σ 、 μ 、 K_H 等参数值, 并判断确定该样品导电类型为 P 型;
3. 实验过程中有以下两点需要细心注意:
 - 应对实验仪器进行调零, 并检查霍尔元件中霍尔电压电路和不等位电压电路的连接。
 - 调节霍尔元件片使其置于磁场最大处。

七、分析讨论题:

1. 若磁场不恰好与霍尔元件片的法线一致, 对测量结果有何影响, 如何用实验方法判断 B 与元件法线是否一致?

答: (1) 若磁场与元件片法线不一致, 则测出来的 B 带有一个余弦值 $\cos\alpha$ (α 为法线与 B 的夹角), 导致 B 比实际值小, 也就使得测量元件电势差时 V 的测量值不是最大电势差。

(2) 慢慢旋转元件, 若输出电压能达到更大的值, 则说明原来的元件法线与 B 不一致, 输出电压达到最大值时元件法线才与 B 一致。

2. 能否用霍尔元件片测量交变磁场?

答: 能够测量。根据实验原理中霍尔效应应用原理公式 (6) (7):

$$U_H = K_H \cdot I_S \cdot B$$

其中 K_H 为霍尔元件片灵敏度, 是常数; I_S 为工作电流, 是直流电流, 大小可定, 所以霍尔电势 U_H 可以实时地反映交变磁场的磁感应强度 B 的大小和极性。

附图：

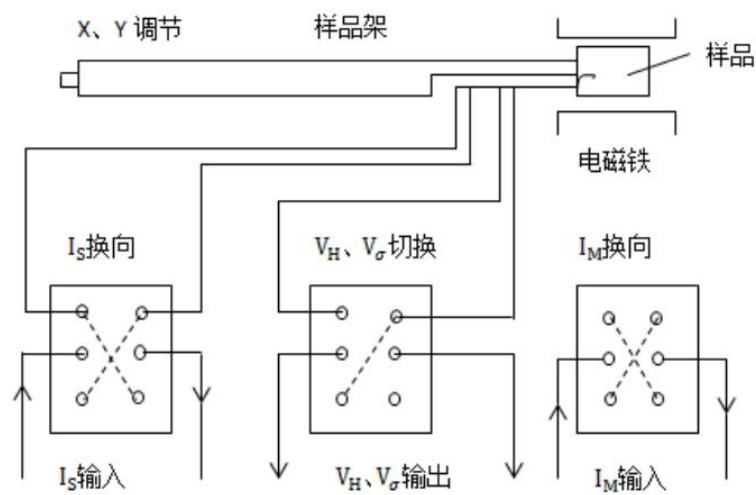


图 3：霍尔效应组合仪原理图

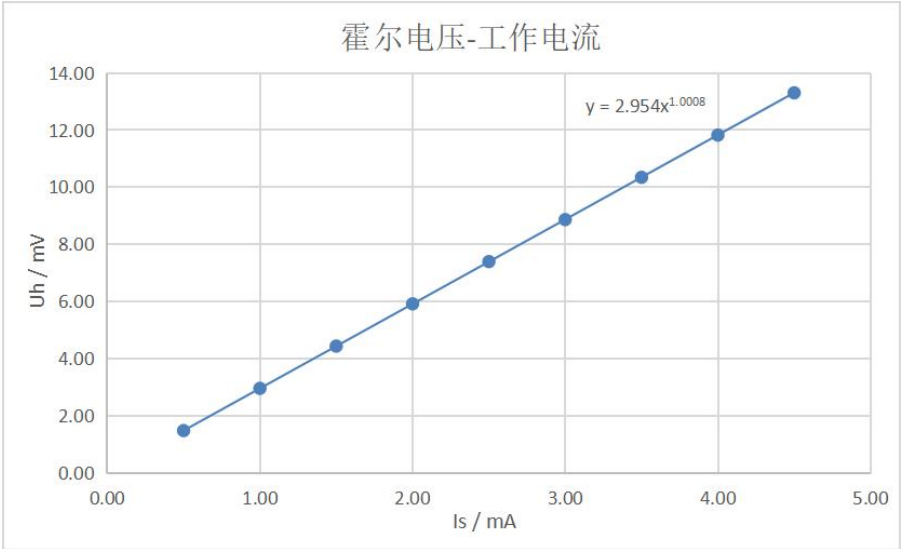


图 4： $U_H - I_S$ 图像

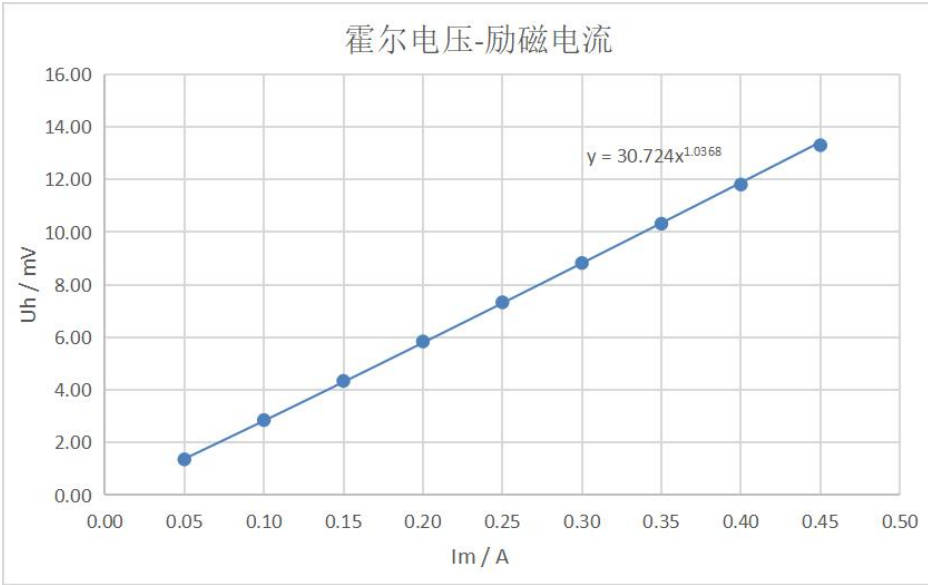


图 5： $U_H - I_M$ 图像