

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: 霍尔效应实验 实验日期: 2023 年 10 月 19 日 上午
 班 级: 特立2222 教学班级: 胡麟老师班 学 号: 1120221173 姓 名: 陈奕林

一、实验目的

- (1) 掌握利用霍尔效应研究半导体材料性能的方法。
- (2) 学习用“对称测量法”消除副效应影响的方法。

二、实验仪器

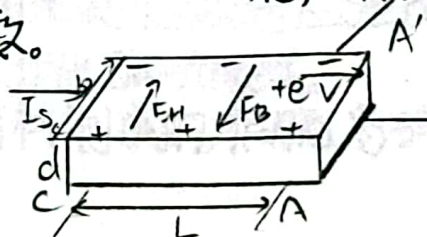
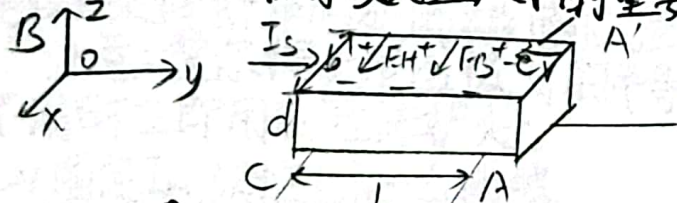
霍尔效应实验仪, 霍尔效应实验组合仪, 霍尔效应测磁仪, 特斯特计万用表等。

三、实验原理

1. 霍尔效应

置于磁场中的载流体, 如果电流方向与磁场垂直, 则在垂直于电场和磁场的方向会产生一附加的横向电场, 这一现象叫做霍尔效应。

如下图所示, 在半导体试样的Y方向通过电流 I_s , Z方向加磁场 B , 则在X方向产生电荷的积累, 从而产生霍尔电压 U_H , 该电势差引起的电场 E_H 称为霍尔电场。设载流子浓度为 n , 则霍尔电压 U_H 与磁感应强度 B 及载流子浓度等量间的关系为: $U_H = \frac{I_s B}{ned} = R_H \cdot \frac{I_s B}{d} = K_H I_s B$ 。式中: $R_H = \frac{1}{ne}$, R_H 称为霍尔系数它是反映材料霍尔效应大小的重要参数。



$$K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{ned}, K_H \text{ 为霍尔元件的灵敏度, 单位为 } V/(A \cdot T)$$

根据霍尔电压的正负(或 R_H 的符号)及磁场的方向可以判断样品的导电类型。半导体材料有P型(空穴型)和N型(电子型)两种。由上图可看出, 若测得 $U_H > 0$, 则 R_H 为正, 样品为P型。若 $U_H < 0$, 则 R_H 为负, 样品为N型。

对于确定的霍尔元件, 灵敏度 K_H 是一个常数, 一般要求越大越好。若测得霍尔电流 I_s 和相应的霍尔电压 U_H 值, 则可求得磁感应强度 B 的大小, 这就是利用霍尔效应测磁场的原理。半导体的电导率 σ : $\sigma = \frac{I_s L}{U_H A S}$

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

班 级: _____ 教学班级: _____ 学 号: _____ 姓 名: _____

载流子的迁移率 μ , 电导率 σ 与载流子浓度 n 及迁移率 μ 之间有如下关系:

$$\mu = |R_H| \cdot \sigma$$

2. 实验中的副效应及其消除法

在霍尔效应产生的同时, 会伴随着多种副效应, 这些副效应产生的电压叠加在霍尔电压上, 对霍尔效应的测量带来了误差。这些副效应均可通过改变工作电流或磁场的方向来减小或消除。即依次改变电流方向、磁场方向, 在 $(+B, +I_s)$ 、 $(-B, +I_s)$ 、 $(+B, -I_s)$ 、 $(-B, -I_s)$ 四种条件下进行测量, 取各测量值的平均值。近似可得: $U_H = \frac{1}{4}(U_{H1} + U_{H2} + U_{H3} + U_{H4})$

3. 一对共轴线圈的耦合度

当一对共轴线圈的间距 a 等于线圈的半径 R 时, 构成所谓的“亥姆霍兹线圈”。此时轴线上的磁场强度 H 分布是均匀的, 当 $a \neq R$ 时, 其轴线上的 H 将是不均匀的, 会出现欠耦合、过耦合的状态。两线圈的耦合度可以通过霍尔元件检测。

四. 实验内容

(1) 用特斯拉计测定电磁铁磁滞曲线, 即 I_m-B 曲线。

特斯拉计是利用霍尔效应原理制成用来测量磁感应强度的仪器。测定电磁铁间隙中心处的磁感应强度 B , 作出 I_m-B 曲线。

注意: 霍尔探头是由极薄的半导体材料制成的, 很脆、易碎, 使用必须小心。不用时立即用套管保护好。

(2) 固定 I_m , 测定 U_H-I_s 曲线。

令 $I_m = 0.00A$, 调节 I_s , 使 I_s 为某一值, 例如 $I_s = 1.00mA$, 然后按照消除副效应方法得到一个 U_H , 在 $I_s = 1.00 \sim 10.00mA$ 的范围, 每隔 $1.00mA$ 分别测出所对应的 U_H , 并画出 U_H-I_s 关系曲线。

(3) 固定 I_s , 测定 U_H-I_m 曲线

令 $I_s = 5mA$, 调节 I_m , 使 $I_m = 0.100A, 0.200A, \dots, 0.800A$, 按照消除副效应方法分别测出各 U_H 值, 画出 U_H-I_m 关系曲线。

(4) 在零磁场下($B=0$), $I_s = 0.20mA$ 时, 测出 U_{CH} 值。

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

班 级: _____ 教学班级: _____ 学 号: _____ 姓 名: _____

(5) 根据公式计算霍尔灵敏度 K_H , 霍尔系数 R_H 及载流子浓度 n , 最后求出 $\overline{K_H}$, $\overline{R_H}$, \overline{n} 。

(6) 根据公式计算电导率和载流子的迁移率。霍尔片 $b=4mm$, $L=3mm$, $d=0.5mm$ 。

(7) 由霍尔电压的正负判断样品的导电类型, 是N型还是P型。

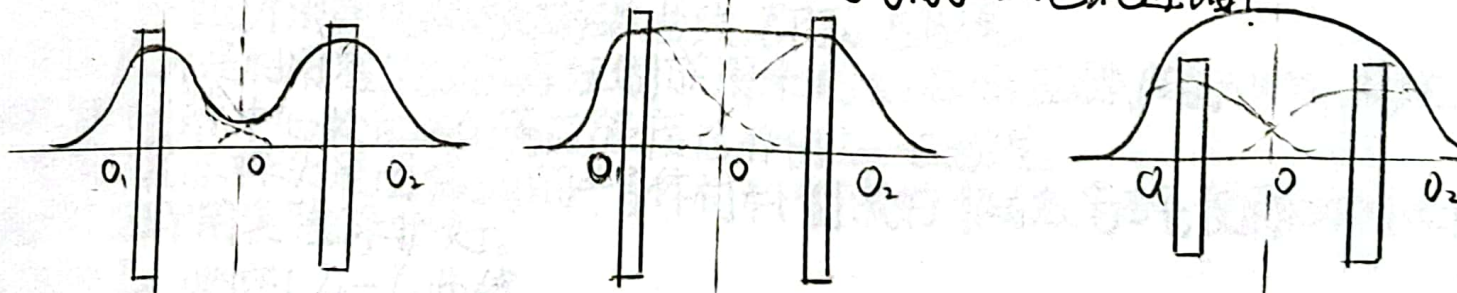
(8) 观察一对共轴线圈的耦合度。

首先将两个共轴线圈串联相接, 然后调节霍尔效应组合仪的励磁电流为一定值 $0.80A$, 将霍尔效应测磁仪的工作电流调为 $8mA$ 。改变两个共轴线圈的间距 a , 分别使 $a > R$, $a = R$, $a < R$, 求出 R 值。

将霍尔器件的探针杆在两个线圈间沿轴线移动, 记录探针杆移动的距离 x 及对应的霍尔电压值, 三种耦合状态分别需要取10个以上不同的位置点, 自己设计数据表格。

做出共轴线圈在三种耦合状态下 $U_H = f(x)$ 的关系曲线图。

注意: 霍尔片允许通过的电流很小; 切勿与励磁电流连错!



联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

班 级: _____ 教学班级: _____ 学 号: _____ 姓 名: _____

原始数据

1. 表 5.

| | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 |
|-----------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| X | $I_{IS} + I_m$ | $I_{IS} - I_m$ | $-I_{IS} - I_m$ | $-I_{IS} + I_m$ |
| ± 120 | 0.94 | -0.60 | 0.60 | -0.94 |
| ± 110 | 1.03 | -0.69 | 0.69 | -1.03 |
| ± 100 | 1.13 | -0.80 | 0.80 | -1.13 |
| ± 90 | 1.23 | -0.89 | 0.89 | -1.23 |
| ± 80 | 1.31 | -0.97 | 0.98 | -1.31 |
| ± 70 | 1.38 | -1.05 | 1.05 | -1.38 |
| ± 60 | 1.43 | -1.10 | 1.11 | -1.43 |
| ± 50 | 1.47 | -1.14 | 1.14 | -1.47 |
| ± 40 | 1.49 | -1.16 | 1.16 | -1.49 |
| ± 30 | 1.50 | -1.16 | 1.17 | -1.50 |
| ± 20 | 1.50 | -1.17 | 1.17 | -1.50 |
| ± 10 | 1.50 | -1.16 | 1.17 | -1.50 |
| 0 | 1.50 | -1.16 | 1.17 | -1.50 |

$$U_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (mV) \quad I_S = 3.5mA, I_m = 0.5mA$$

$$\beta = \frac{U_H}{k_H I_S} \quad (mT)$$

2. 表 1:

| $I_m (A)$ | 0.800 | 0.700 | 0.600 | 0.500 | 0.400 | 0.300 | 0.200 | 0.100 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\beta (mT)$ | 469 | 420 | 336 | 289 | 242 | 186 | 126 | 73 |

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

班 级: _____ 教学班级: _____ 学 号: _____ 姓 名: _____

3. 固定 $I_m = 0.35A$

| $I_s (mA)$ | $V_1 (mV)$ $+I_s + I_m$ | V_2 $+I_s - I_m$ | V_3 $-I_s - I_m$ | V_4 $-I_s + I_m$ |
|------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 10.00 | 13.92 | -14.96 | 14.95 | -13.92 |
| 9.00 | 13.92 | -14.96 | 14.95 | -13.92 |
| 8.00 | 12.38 | -13.30 | 13.30 | -12.38 |
| 7.00 | 10.83 | -11.64 | 11.63 | -10.84 |
| 6.00 | 9.29 | -9.96 | 9.95 | -9.28 |
| 5.00 | 7.73 | -8.30 | 8.29 | -7.74 |
| 4.00 | 6.18 | -6.64 | 6.63 | -6.19 |
| 3.00 | 4.64 | -4.98 | 4.97 | -4.64 |
| 2.00 | 3.09 | -3.33 | 3.32 | -3.10 |
| 1.00 | 1.54 | -1.66 | 1.65 | -1.55 |

$$I_m = 0.35A$$

$$U_H = \frac{|V_1 - V_2| + |V_3 - V_4|}{4} \quad (mV)$$

4. 零磁场 T : $I_s = 0.2mA$, U_{CH}

| $I_s (mA)$ | $V_1 (mV)$ $+I_s$ | $V_2 (mV)$ $-I_s$ |
|------------|----------------------|----------------------|
| 0.2 | 11.8 | -11.8 |

$$U_{CH} = \frac{|V_1 - V_2|}{2} \quad (mV)$$

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日
 班级: _____ 教学班级: _____ 学号: _____ 姓名: _____

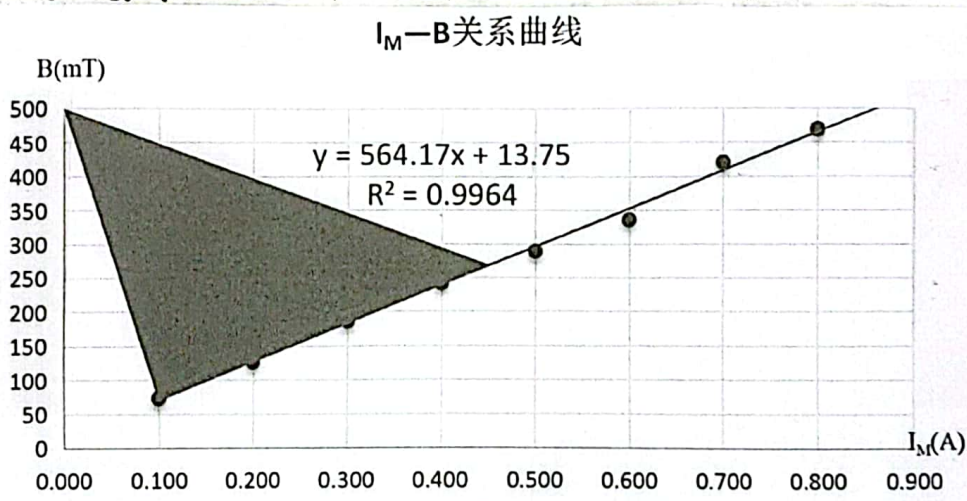
数据处理

1. 用特斯拉计测定电磁铁的励磁曲线

在不同的 I_M 下,测量电磁铁间隙中心处的磁感应强度 B ,测量数据如下表所示:

| 1、用特斯拉计测定电磁铁的励磁曲线 | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_M (A)$ | 0.800 | 0.700 | 0.600 | 0.500 | 0.400 | 0.300 | 0.200 | 0.100 |
| $B (mT)$ | 469 | 420 | 336 | 289 | 242 | 186 | 126 | 73 |

由上述数据,利用Excel,采用线性回归拟合的方法作出 I_M-B 关系曲线如下图所示:(阴影没太弄好,自己Excel上看没有)



用Excel求出回归方程为 $B=564.17I_M+13.75$,相关系数 $R^2=0.9964 \approx 1$,拟合程度较好,符合理论上 B 与 I_M 成正比关系。

2. 固定 I_M ,测定 U_H-I_S 曲线

实验中,固定 $I_M=0.35A$,利用消除副效应的方法,在不同的 I_S 下,测量 U_H ,得到 U_H-I_S 关系数据如下图所示。(见后页)

联系方式: _____

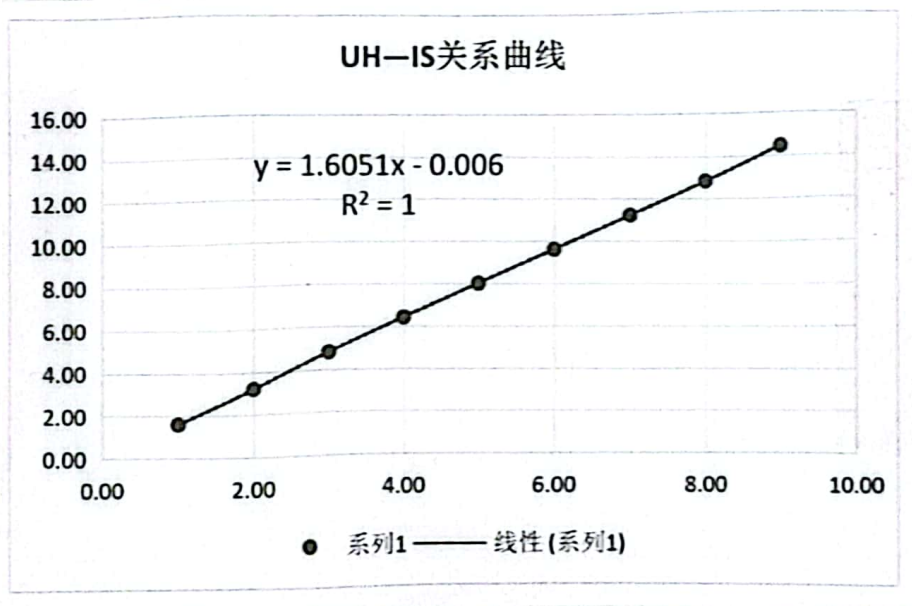
指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日
班 级: _____ 教学班级: _____ 学 号: _____ 姓 名: _____

| 2、 U_H-I_S 关系数据 | | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|
| $I_S(mA)$ | $V_1(mV)$ | $V_2(mV)$ | $V_3(mV)$ | $V_4(mV)$ | $V_H = (V_1 - V_2 + V_3 - V_4) / 4 (mV)$ |
| | $+I_S, +I_M$ | $+I_S, -I_M$ | $-I_S, -I_M$ | $-I_S, +I_M$ | |
| 1.00 | 1.54 | -1.66 | 1.65 | -1.55 | 1.60 |
| 2.00 | 3.09 | -3.33 | 3.32 | -3.10 | 3.21 |
| 3.00 | 4.64 | -4.98 | 4.97 | -4.64 | 4.81 |
| 4.00 | 6.18 | -6.64 | 6.63 | -6.19 | 6.41 |
| 5.00 | 7.73 | -8.30 | 8.29 | -7.74 | 8.02 |
| 6.00 | 9.29 | -9.96 | 9.95 | -9.28 | 9.62 |
| 7.00 | 10.83 | -11.64 | 11.63 | -10.84 | 11.24 |
| 8.00 | 12.38 | -13.30 | 13.30 | -12.38 | 12.84 |
| 9.00 | 13.92 | -14.96 | 14.95 | -13.92 | 14.44 |
| 10.00 (达不到) | | | | | 0.00 |

用Excel对上述数据进行处理,得到 U_H-I_S 曲线如下图所示:



用Excel求出回归方程为 $U_H = 1.6051I_S - 0.006$,相关系数 $R^2 = 1$,拟合效果非常好
由霍尔电压公式 $U_H = \frac{I_S B}{ned}$

I_M 相同,即 B 恒定 U_H 和 I_S 成正比。由回归方程可知, U_H 和 I_S 确定成正比
理论与实践相统一。

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

班 级: _____ 教学班级: _____ 学 号: _____ 姓 名: _____

3. 在零磁场下 ($B=0T$), $I_S=0.2mA$ 时, 测出 U_{CA} 值 (仪表显示 V_0)

| 3、测出 V_{CA} 值 | | | |
|-----------------|-----------|-----------|---------------------------------|
| $I_S(mA)$ | $V_1(mV)$ | $V_2(mV)$ | $U_{CA} = V_1 - V_2 / 2 (mV)$ |
| | $+I_S, 0$ | $-I_S, 0$ | |
| 0.20 | 11.80 | -11.80 | 11.80 |

4. 根据公式计算霍尔灵敏度 K_H , 霍尔系数 R_H 及载流子 n , 求 $\bar{K}_H, \bar{R}_H, \bar{n}$

$$K_H = \frac{U_H}{I_S \cdot B} \quad R_H = K_H \cdot d \quad n = \frac{1}{R_H \cdot q} \quad d = 0.5mm$$

可计算出 K_H, R_H, n 。其中 U_H 取该 I_S 下的 U_H 测量值, 即表 2 中的最后一列, B 取 $I_m=0.3A$ 下产生的磁感应强度, 即表 1 中的 $B=186mT$, $d=0.5mm$, q 取电子电量 $e=1.602 \times 10^{-19}C$, 计算出不同的 I_S 下, K_H, R_H, n 值如下表所示:

| 4、根据公式计算霍尔灵敏度 K_H , 霍尔系数 R_H 及载流子浓度 n | | | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| $I_S(mA)$ | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 平均值 |
| $U_H(mV)$ | 1.60 | 3.21 | 4.81 | 6.41 | 8.02 | 9.62 | 11.24 | 12.84 | 14.44 | |
| K_H ($V/(A \cdot T)$) | 8.60 | 8.63 | 8.62 | 8.62 | 8.62 | 8.62 | 8.63 | 8.63 | 8.62 | 8.62 |
| $R_H (\Omega \cdot C)$ | 4.30E-03 | 4.31E-03 | 4.31E-03 | 4.31E-03 | 4.31E-03 | 4.31E-03 | 4.31E-03 | 4.31E-03 | 4.31E-03 | 4.31E-03 |
| $n(m^{-3})$ | 1.45E+21 | 1.45E+21 | 1.45E+21 | 1.45E+21 | 1.45E+21 | 1.45E+21 | 1.45E+21 | 1.45E+21 | 1.45E+21 | 1.45E+21 |

下面计算 K_H, R_H, n 的平均值:

$$\bar{K}_H = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 K_{Hi} = 8.66 V/(A \cdot T)$$

$$\bar{R}_H = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} R_{Hi} = 4.43 \times 10^{-3} m^3/C$$

$$\bar{n} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} n_i = 1.41 \times 10^{21} m^{-3}$$

5. 根据公式计算电导率 σ 和载流子的迁移率 μ

取 $b=4mm$, $L=3mm$, $d=0.5mm$, I_S 和 U_{CA} 即为实验过程 3. 表 3 中的 $I_S=0.20mA$,

$U_{CA}=11.80mV$, 计算可得:

$$\sigma = \frac{I_S \cdot L}{U_{CA} \cdot S} = \frac{I_S \cdot L}{U_{CA} \cdot b \cdot d} = 27.31 S/m$$

$$\mu = |R_H| \cdot \sigma = \bar{R}_H \sigma = 0.12 m^2(V \cdot S)$$

因 $R_H > 0$, 可判断该元件为 N 型

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

班 级: _____ 教学班级: _____ 学 号: _____ 姓 名: _____

6. 测量亥姆霍兹线圈中的

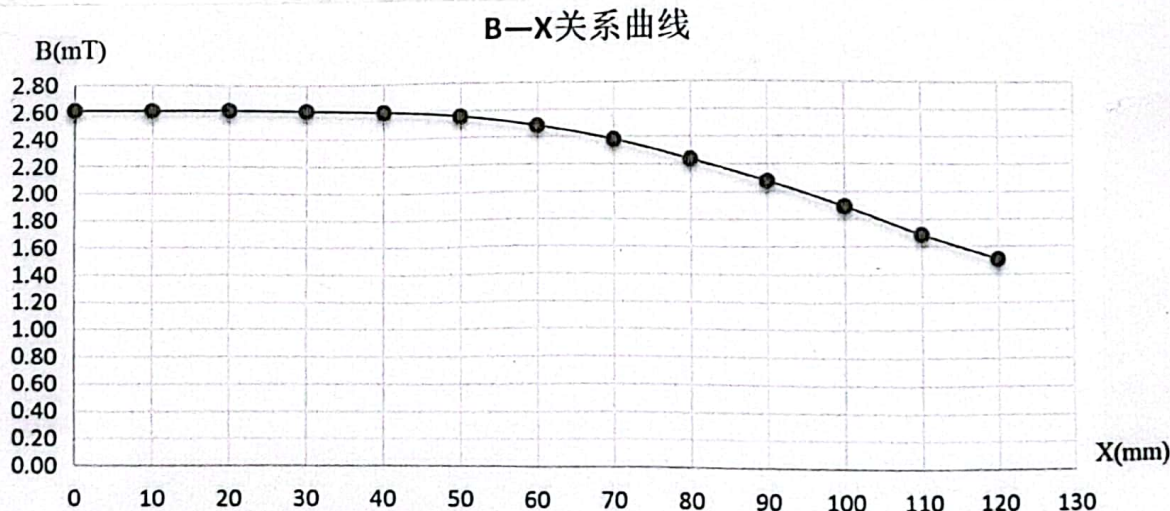
实验所用仪器的 K_H 值为: $K_H = 146 \text{ mV/(mA}\cdot\text{T)}$

调节 $I_S = 350 \text{ mA}$, $I_M = 0.500 \text{ A}$, 测得距离轴线中心不同距离时的 U_H 值
并根据公式 $K_H = \frac{U_H}{I_S \cdot B}$ 计算出 B 值, 即 $B = \frac{U_H}{K_H \cdot I_S}$ 。实验数据和计算结果如下。

| 6. 共轴线线圈轴上的磁场分布 | | | | | | |
|------------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--|--|
| $X \text{ (mm)}$ | $V_1 \text{ (mV)}$ | | $V_2 \text{ (mV)}$ | | $V_H = (V_1 - V_2 + V_3 - V_4) / 4 \text{ (mV)}$ | $B = V_H / (K_H \cdot I_S) \text{ (mT)}$ |
| | $+I_S, +I_M$ | $+I_S, -I_M$ | $-I_S, -I_M$ | $-I_S, +I_M$ | | |
| 120 | 0.94 | -0.60 | 0.60 | -0.94 | 0.77 | 1.51 |
| 110 | 1.03 | -0.69 | 0.69 | -1.03 | 0.86 | 1.68 |
| 100 | 1.13 | -0.80 | 0.80 | -1.13 | 0.97 | 1.89 |
| 90 | 1.23 | -0.89 | 0.89 | -1.23 | 1.06 | 2.07 |
| 80 | 1.31 | -0.97 | 0.98 | -1.31 | 1.14 | 2.24 |
| 70 | 1.38 | -1.05 | 1.05 | -1.38 | 1.22 | 2.38 |
| 60 | 1.43 | -1.10 | 1.11 | -1.43 | 1.27 | 2.48 |
| 50 | 1.47 | -1.14 | 1.14 | -1.47 | 1.31 | 2.55 |
| 40 | 1.49 | -1.16 | 1.16 | -1.49 | 1.33 | 2.59 |
| 30 | 1.50 | -1.16 | 1.17 | -1.50 | 1.33 | 2.61 |
| 20 | 1.50 | -1.17 | 1.17 | -1.50 | 1.34 | 2.61 |
| 10 | 1.50 | -1.16 | 1.17 | -1.50 | 1.33 | 2.61 |
| 0 | 1.50 | -1.16 | 1.17 | -1.50 | 1.33 | 2.61 |

亥姆霍兹线圈的有效半径为 110 mm , 线圈匝数为 800 匝, 可计算出
线圈中心的磁感应强度为: $B_0 = \frac{\mu_0 I N}{R} = \frac{8}{5} = 2.04 \text{ mT}$ 。

实验测得 $x = 0$ 处的磁感应强度为 2.61 mT , 相对误差稍大。
根据表中的数据, 用Excel做出 $B-X$ 关系曲线, 如下图所示。



联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: _____ 实验名称: _____ 实验日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

班 级: _____ 教学班级: _____ 学 号: _____ 姓 名: _____

由亥姆霍兹线圈的 B - x 关系曲线可知,在距离轴中心 $0-50\text{mm}$ 范围内, B 几乎不随 x 的变化而变化。该线圈的两线圈间距为 110mm ,即在图中 $0-50\text{mm}$ 的范围内为两线圈中间区域,理论上在两线圈之间应产生匀强磁场,与实验结果相符。

思考题

1. 用特斯拉计测量磁场时要注意什么?

答: ① 特斯拉计的霍尔探头是由极薄的半导体材料制成的,很脆,易碎,使用时要小心,不可碰压、弯曲,要轻拿轻放,不用时套好保护套。

② 保证霍尔元件的法线方向与磁场一致,否则测量结果不准

③ 测量时尽可能贴近磁体表面,否则示数会偏小。

2. 对制造霍尔片的材料有什么要求?

答: ① 根据 $k_H = \frac{1}{ne\mu}$, 要想使霍尔片的灵敏度提高,需要选择具有较高迁移率的材料,并且材料要易于塑形,使得制造出的霍尔片对称、均匀。

② 电导率 σ 较低

③ 半导体材料的迁移率较高,电导率较低,是制造霍尔片的理想材料。

联系方式: _____

指导教师签字: _____