

课程编号 1800450037

得分	教师签名	批改日期

# 深 圳 大 学 实 验 报 告

课程名称： 大学物理实验（二）

实验名称： 霍尔效应及其应用

学 院： 电子与信息工程学院

指导教师： 李颖贞

报告人： 蔡岱南 组号： 17

学号 2022280376 实验地点 致原楼 214

实验时间： 2023 年 10 月 10 日

提交时间： 2023 年 10 月 17 日

## 一、实验目的

- 1、了解产生霍尔效应的物理过程；
- 2、学习用霍尔元件测量长直螺线管的轴向磁场分布；
- 3、学习“对称测量法”消除副效应的影响。

## 二、实验原理

### 1、霍尔效应

#### (1) 霍尔效应原理

如图 1 所示，一块长为  $l$ 、宽为  $b$ 、厚度为  $d$  的半导体薄片置于磁场中，磁感应强度  $\mathbf{B}$  垂直于半导体薄片，在半导体薄片的横向上加载工作电流  $I_S$ ，在薄片的纵向两侧会出现一个电压  $U_H$ ，这种现象叫霍尔效应， $U_H$  称为霍尔电压。实验表明：在磁场不太强时， $U_H$  与  $I_S$ 、 $\mathbf{B}$  成正比，与薄片厚度  $d$  成反比，即

$$U_H = R_H \frac{I_S B}{d} \quad (1)$$

式中  $R_H$  叫霍尔系数。

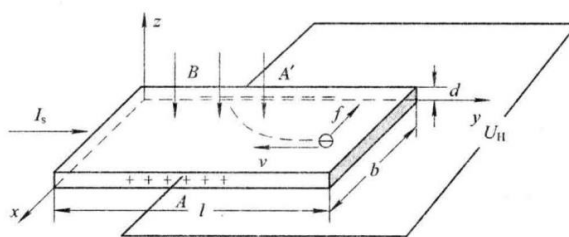


图 1 霍尔效应原理图

霍尔效应可用洛伦兹力来解释。

设半导体薄片内载流子的定向漂移速率为  $v$ ，那么载流子所受洛伦兹力为

$$\mathbf{f} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

在洛伦兹力的作用下，电子向  $A'$  一侧漂移，结果在  $A$ 、 $A'$  两侧分别聚集了正负电荷，在  $A$ 、 $A'$  之间建立了静电场，形成电势差。静电场会阻碍电子的继续漂移，当静电场力和洛伦兹力达到平衡时，电子不再侧向漂移，电势差达到恒定状态，此时

$$qvB = q \frac{U_H}{b} \quad (3)$$

设载流子浓度为  $n$ ，则电流  $I_S$  和载流子定向漂移速率  $v$  的关系为

$$I_S = avb d n \quad \text{或} \quad v = \frac{I_S}{ab d n} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得

$$U_H = \frac{1}{nq} \frac{I_S B}{d} \quad (5)$$

对比式(1)和式(5)，可知霍尔系数为

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (6)$$

式(6)表明，霍尔系数和载流子浓度有关。半导体的载流子浓度比金属导体的载流子浓度小得多。因而半导体的霍尔系数比导体大得多，半导体的霍尔效应较为显著，而导体几乎观察不到该效应。通过测量材料的霍

尔系数可以确定材料的载流子浓度，因此霍尔效应是研究载流子浓度的一个重要方法。

由式（5）还可看出，半导体薄片的厚度  $d$  越小，霍尔效应越显著，所以霍尔器件通常做得很薄。

式(5)中的  $\frac{1}{nqd}$  叫霍尔器件的灵敏度，用  $K_H$  表示：

$$K_H = \frac{1}{nqd} \quad (7)$$

则式(5)可写成

$$U_H = K_H I_S B \quad (8)$$

若已知  $K_H$ （一般由仪器生产厂家给出），通过测量霍尔电压  $U_H$  和工作电流  $I_S$  可以求出磁感应强度的大小，这就是霍尔片测磁场的原理。

半导体的载流子有正有负， $A$ 、 $A'$  之间的电势差（即霍尔电压） $U_H$  与载流子的正负有关。与载流子是正（空穴导电——P 型半导体）时，载流子定向漂移的速度方向与电流方向相同，洛仑兹力使它向上偏转，结果是  $A'$  端电势高于  $A$  端，如图 2(a) 所示；当载流子是负（电子导电——N 型半导体）时，载流子定向漂移的速度方向与电流方向相反，洛仑兹力使电子向上偏转，结果是  $A$  端电势高于  $A'$  端，如图 2(b) 所示。所以根据霍尔系数的正负可以判断半导体的导电类型。

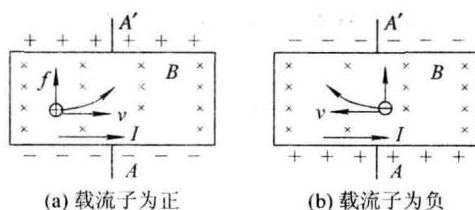


图 2 霍尔电压与载流子正负之间的关系

## （2）霍尔器件的重要参数

霍尔器件的電要参数包括：

a. 霍尔系数：

$$R_H = \frac{1}{nq}$$

b. 霍尔器件的灵敏度：

$$K_H = \frac{1}{nqd}$$

c. 迁移率、电导率：

在低电下载流子平均漂移速度  $v$  和场强  $E$  成正比，即  $v = \mu E$ 。比例系数  $\mu$  称为迁移率。

场强  $E$  与电流密度  $J$  成正比，即  $E = \rho J$ ，比例系数  $\rho$  称为电阻率，电阻率的倒数称为电导率，即  $\sigma = 1/\rho$ 。

又因为电流密度的大小  $j = ne\bar{v}$ 。可得电导率和迁移率之间的关系为  $\sigma = ne\mu$ ，进而可得

$$\mu = K_H \sigma d \quad (9)$$

测出电导率，即可求出迁移率。

## 2、对称测量法与附加电动势

### （1）附加电动势

将载流半导体薄片置于磁场中，除了会产生霍尔效应外，还会有其他的副效应产生。实际测量霍尔片两侧的电压时，得到的不只是  $U_H$ ，还包括副效应产生的附加电动势(如图 3 所示)。

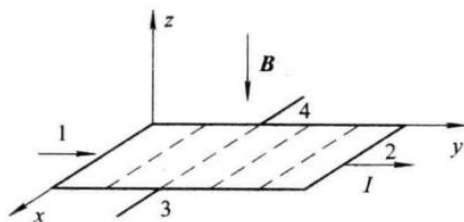


图3 霍尔效应的附加电动势

副效应主要有以下4种：

a. 厄廷豪森(Ettinghausen)效应引起的电势差  $U_E$ 。由于电子实际上并非以同一速度  $v$  沿  $y$  轴负向运动，速度大的电子回转半径大，能较快地到达接点3的侧面。从而导致3侧面较4侧面集中了较多能量高的电子，结果3、4侧面出现温差，产生温差电动势  $E_E$ 。可以证明  $E_E \propto I \cdot B$ ，容易理解  $E_E$  的正负与  $I$  和  $B$  的方向有关。

b. 能斯特(Nernst)效应引起的电势差  $U_N$ 。焊点1、2间的接触电阻可能不同，通电发热程度不同，故1、2两点间的温度可能不同，于是引起热扩散电流。与霍耳效应类似，该热扩散电流也会在3、4点间形成电势差  $U_N$ 。若只考虑接触电阻的差异，则  $U_N$  的方向仅与  $B$  的方向有关。

c. 里纪-勒杜克(Righi-Leduc)效应产生的电势差  $U_{RL}$ 。上述热扩散电流的载流子由于速度不同，根据厄廷豪森效应同样的理由，又会在3、4点间形成温差电动势  $E_{RL}$ 。 $E_{RL}$  的正负仅与  $B$  的方向有关，而与  $I$  的方向无关。

d. 不等电位效应引起的电势差  $U_0$ 。由于制造上的困难及材料的不均匀性，3、4两点实际上不可能在同一条等势线上，因而只要有电流，即使没有磁场  $B$ ，3、4两点间也会出现电势差  $U_0$ 。 $U_0$  的正负只与电流  $I$  的方向有关，而与  $B$  的方向无关。

## (2) 对称测量法消除附加电动势

上述副效应产生的附加电动势叠加在霍尔电压上，在测量中形成系统误差。由于副效应与磁感应强度  $B$  和电流  $I$  的方向有关，测量时可采用“对称测量法”，即通过改变电流  $I$  和磁感应强度  $B$  的方向基本可以消除附加电动势。具体操作如下(测4组数据)：

$$\begin{aligned} +B, +I_S: & U_1 = U_H + E_E + U_N + E_{RL} + U_0 \\ +B, -I_S: & U_2 = -U_H - E_E + U_N + E_{RL} - U_0 \\ -B, -I_S: & U_3 = U_H + E_E - U_N - E_{RL} - U_0 \\ -B, +I_S: & U_4 = -U_H - E_E - U_N - E_{RL} + U_0 \end{aligned}$$

由四组数据可得：

$$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4} - E_E$$

$E_E$  比  $U_H$  小得多，可略去不计，于是霍尔电压为

$$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4} \quad (10)$$

## 3、长直螺线管的磁场分布

如图4所示，一密绕螺线管，管内是真空，管长  $l$ ，半径为  $R$ ，单位长度匝数为  $n$ ，当通以电流  $I$  时，则在管内外产生磁场，根据毕奥-萨伐尔定律  $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \times r}{r^3}$  可求得密绕螺线管内部轴线上磁感应强度为

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad (11)$$

其中  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$  是真空磁导率。

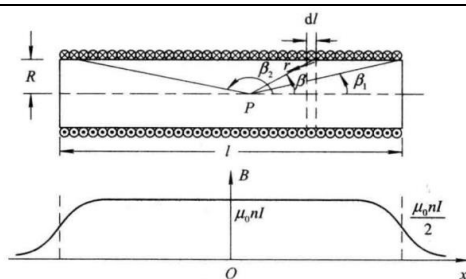


图4 长直螺线管的磁场分布

当  $l \gg R$  时, 螺线管称为长直螺线管。在远离端点的螺线管内部, 近似地认为式(11)中  $\beta_1 = 0$ ,  $\beta_2 = \pi$ , 则  $B = \mu_0 n I$ , 即在远离端点的螺线管内部的轴线上可视为均匀磁场, 而在长直螺线管的端点处  $B = \frac{1}{2} \mu_0 n I$ 。

### 三、实验仪器

TH—H 霍尔效应实验测试仪、TH—H 霍尔效应实验组合仪

### 四、实验内容与步骤

#### 1、测量试样的 $V_H - I_S$ 和 $V_H - I_M$ 曲线, 确定材料的霍尔系数。

(1) 实验仪双刀开关倒向 “ $V_H$ ”, 测试仪功能选择置于 “ $V_H$ ”。

测绘  $V_H - I_S$  曲线:

(2) 保持  $I_M = 0.5A$  不变, 调节  $I_S$ , 记录不同  $I_S$  下电流  $I_S$  和磁感应强度  $B$  的方向分别为  $+B, +I_S$ 、 $-B, +I_S$ 、 $B, -I_S$ 、 $+B, -I_S$  时的电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 。

(3) 利用公式  $V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4}$  计算不同  $I_S$  下的霍尔电压, 绘制  $V_H - I_S$  曲线。

(4) 对  $V_H - I_S$  曲线进行线性拟合, 得到霍尔系数。

测绘  $V_H - I_M$  曲线:

(2) 保持  $I_S$  的值不变 ( $I_S = 3.00mA$ ), 确定材料的霍尔系数  $R_H$ 。记录电磁铁规格数值  $k$ , 单位为高斯(Gs/A) 或特斯拉(T/A, 10kGs/A)。

(3) 调节  $I_M$ , 记录不同  $I_M$  下电流  $I_S$  和磁感应强度  $B$  的方向分别为  $+B, +I_S$ 、 $-B, +I_S$ 、 $B, -I_S$ 、 $+B, -I_S$  时的电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 。

(4) 利用公式  $V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4}$  计算不同  $I_M$  下的霍尔电压, 绘制  $V_H - I_S$  曲线。

(5) 对  $V_H - I_M$  曲线进行线性拟合, 得到霍尔系数。

#### 2、测量螺线管轴线上磁场分布。

(1) 调节励磁电流  $I_M = 0.500A$ , 霍尔片工作电流  $I_S = 3.00mA$  并保持不变。记录线圈的霍尔灵敏度  $K_H$ , 单位  $mV / (mA \cdot T)$ 。

(2) 调节霍尔片在螺线管轴线上的位置, 记录不同位置下电流  $I_S$  和磁感应强度  $B$  的方向分别为  $+B, +I_S$ 、 $-B, +I_S$ 、 $B, -I_S$ 、 $+B, -I_S$  时的电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 。

(3) 利用公式  $V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4}$  计算不同位置下的霍尔电压。

(4) 利用公式  $B = V_H / (K_H I_S)$  计算不同位置的磁感应强度。

(5) 绘制磁场分布曲线 (B-X)。

## 五、数据处理

### 1、测量试样的 $V_H - I_S$ 和 $V_H - I_M$ 曲线，确定材料的霍尔系数。

励磁线圈参数  $K = 4.35 \text{ KGs} \cdot \text{A}^{-1}$

霍尔片厚度  $d = 0.5 \text{ mm}$

(1) 保持励磁电流  $I_M$  ( $I_M = 0.500 \text{ A}$ ) 不变，测绘  $V_H - I_S$  曲线：

数据记录表格：

$I_S / \text{mA}$	$V_1 / \text{mV}$	$V_2 / \text{mV}$	$V_3 / \text{mV}$	$V_4 / \text{mV}$	$V_H = \frac{ V_1  +  V_2  +  V_3  +  V_4 }{4} \text{ mV}$
	$+B, +I_S$	$-B, +I_S$	$-B, -I_S$	$+B, -I_S$	
1.00	-2.70	2.73	-2.71	2.69	2.7075
1.50	-4.03	4.10	-4.07	4.03	4.0575
2.00	-5.37	5.44	-5.42	5.37	5.4
2.50	-6.70	6.78	-6.76	6.70	6.735
3.00	-8.05	8.14	-8.12	8.05	8.09
3.50	-9.41	9.53	-9.50	9.37	9.4525
4.00	-10.71	10.86	-10.83	10.70	10.775

以  $I_S = 1.00 \text{ mA}$  为例，根据公式  $V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4}$ ：

$$V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4} = \frac{|-2.70| + |2.73| + |-2.71| + |2.69|}{4} = 2.7075 \text{ mV}$$

同理计算其他  $V_H$ 。

对  $V_H - I_S$  曲线进行线性拟合：

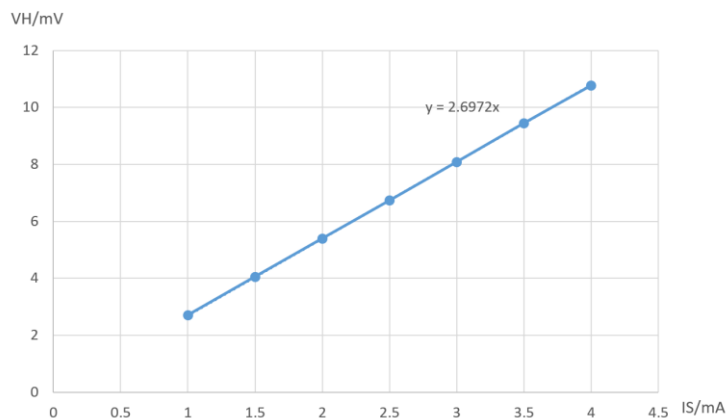


图5 霍尔电压  $V_H$  (mV) 与霍尔片工作电流  $I_S$  (mA) 的关系曲线

日期：2023年10月10日

线性拟合结果:

$$V_H = 2.6972 I_S \tag{12}$$

由式(1)和  $B=K I_M$  可得:

$$V_H = \frac{R_H K I_M}{d} I_S \tag{13}$$

对比式(12)和式(13)可得:

$$R_H = \frac{2.6972 \times d}{K I_M} = \frac{2.6972 \text{ mV} \cdot \text{mA}^{-1} \times 0.5 \text{ mm}}{4.35 \text{ KGs} \cdot \text{A}^{-1} \times 0.500 \text{ A}} = 6.200 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}$$

即为所求霍尔系数。

(2) 保持霍尔片工作电流  $I_S$  的值不变 ( $I_S = 3.00 \text{ mA}$ )，测绘  $V_H - I_M$  曲线:

数据记录表格:

$I_M/\text{A}$	$V_1/\text{mV}$	$V_2/\text{mV}$	$V_3/\text{mV}$	$V_4/\text{mV}$	$V_H = \frac{ V_1  +  V_2  +  V_3  +  V_4 }{4} \text{ mV}$
	$+B, +I_S$	$-B, +I_S$	$-B, -I_S$	$+B, -I_S$	
0.300	-4.85	4.93	-4.90	4.82	4.875
0.400	-6.44	6.53	-6.52	6.42	6.4775
0.500	-8.05	8.11	-8.10	8.06	8.08
0.600	-9.66	9.76	-9.73	9.67	9.705
0.700	-11.25	11.34	-11.32	11.27	11.295
0.800	-12.87	12.91	-12.89	12.88	12.8875

以  $I_M = 0.300 \text{ A}$  为例，根据公式  $V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4}$ ，

$$V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4} = \frac{|-4.85| + |4.93| + |-4.90| + |4.82|}{4} = 4.875 \text{ mV}$$

同理计算其他  $V_H$ 。

对  $V_H - I_S$  曲线进行线性拟合:

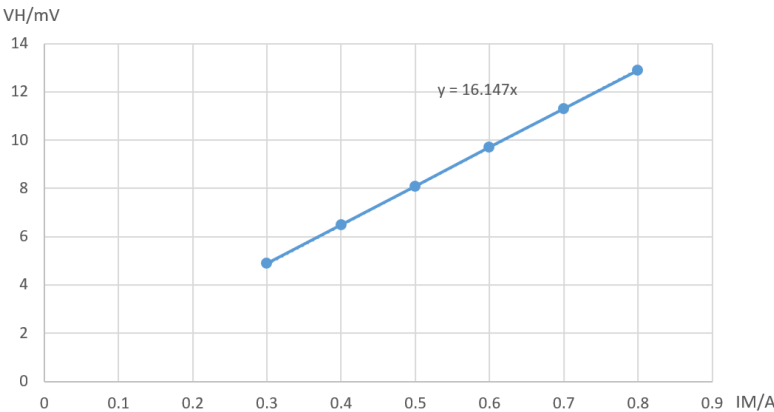


图 6 霍尔电压  $V_H$  (mV) 与励磁电流  $I_M$  (A) 的关系曲线

日期: 2023 年 10 月 10 日

线性拟合结果:

$$V_H = 16.147 I_M \tag{14}$$

由式(1)和  $B=K I_M$  可得:

$$V_H = \frac{R_H K I_S}{d} I_M \quad (15)$$

对比式(14)和式(15)可得:

$$R_H = \frac{16.147 \times d}{K I_S} = \frac{16.147 \times 0.5mm}{4.35 \text{ KGS} \cdot \text{A}^{-1} \times 3.00 \text{ mA}} = 6.187 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}$$

即为所求霍尔系数。

## 2、测量螺线管轴线上磁场分布。

霍尔片工作电流  $I_S = 3.00 \text{ mA}$ , 励磁电流  $I_M = 0.500 \text{ A}$ ,

霍尔元件灵敏度  $K_H = 165 \text{ mV/mA} \cdot \text{T}$

数据记录表格:

X/cm	$V_1/\text{mV}$	$V_2/\text{mV}$	$V_3/\text{mV}$	$V_4/\text{mV}$	$V_H/\text{mV}$	$B/\text{T}$
	$+B, +I_S$	$-B, +I_S$	$-B, -I_S$	$+B, -I_S$		
0	0.62	-0.24	0.26	-0.60	0.43	$8.69 \times 10^{-4}$
0.5	0.76	-0.38	0.39	-0.75	0.57	$1.15 \times 10^{-3}$
1	0.97	-0.58	0.59	-0.95	0.77	$1.56 \times 10^{-3}$
1.5	1.23	-0.85	0.86	-1.24	1.05	$2.11 \times 10^{-3}$
2	1.58	-1.19	1.20	-1.57	1.39	$2.80 \times 10^{-3}$
3	2.24	-1.85	1.86	-2.24	2.05	$4.14 \times 10^{-3}$
5	2.89	-2.48	2.49	-2.87	2.68	$5.42 \times 10^{-3}$
7	3.05	-2.65	2.66	-3.05	2.85	$5.76 \times 10^{-3}$
11	3.12	-2.72	2.73	-3.12	2.92	$5.90 \times 10^{-3}$
15	3.08	-2.68	2.69	-3.07	2.88	$5.82 \times 10^{-3}$
17	2.96	-2.57	2.58	-2.97	2.77	$5.60 \times 10^{-3}$
19	2.56	-2.16	2.17	-2.54	2.36	$4.76 \times 10^{-3}$
20	2.04	-1.63	1.65	-2.01	1.83	$3.70 \times 10^{-3}$
21	1.35	-0.95	0.97	-1.33	1.15	$2.32 \times 10^{-3}$
21.5	1.04	-0.65	0.66	-1.03	0.85	$1.71 \times 10^{-3}$
22	0.82	-0.44	0.45	-0.80	0.63	$1.27 \times 10^{-3}$
22.5	0.66	-0.28	0.29	-0.65	0.47	$9.49 \times 10^{-4}$



23	0.55	-0.17	0.18	-0.53	0.36	$7.22 \times 10^{-4}$
----	------	-------	------	-------	------	-----------------------

以  $X=0\text{cm}$  处为例，根据公式  $V_H = \frac{|V_1|+|V_2|+|V_3|+|V_4|}{4}$ ：

$$V_H = \frac{|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4|}{4} = \frac{|0.62| + |-0.24| + |0.26| + |-0.60|}{4} = 0.43\text{mV}$$

根据公式  $B = V_H / (K_H I_S)$ ：

$$B = \frac{V_H}{K_H I_S} = \frac{0.43 \text{ mV}}{165 \text{ mV/mA} \cdot \text{T} \times 3.00 \text{ mA}} = 8.69 \times 10^{-4} \text{ T}$$

同理计算其他  $V_H$  和  $B$ 。

绘制螺线管轴线上的磁场分布曲线：

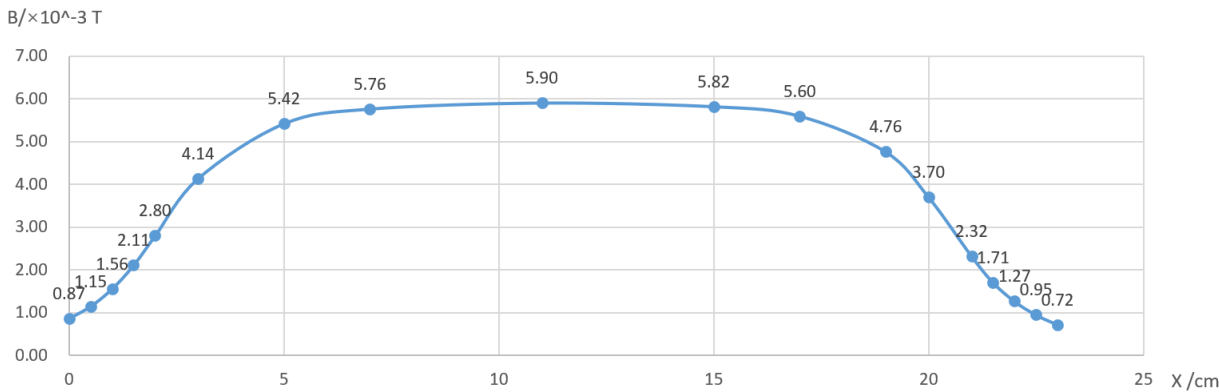


图 7 螺线管轴线上磁场分布曲线

日期：2023 年 10 月 10 日

## 六、结果陈述

1、 $V_H-I_S$  曲线和  $V_H-I_M$  曲线分别如图 5 和图 6 所示。

根据  $V_H-I_S$  曲线，分析得到实验材料的霍尔系数为  $6.200 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}$ ；

根据  $V_H-I_M$  曲线，分析得到实验材料的霍尔系数为  $6.187 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}$ ；

2、螺线管轴线上磁场分布曲线如图 7 所示。从磁场分布曲线可以看出，远离端点的位置（5-17cm）磁感应强度  $B$  大致相同；越靠近两端，磁感应强度  $B$  越小。

## 七、思考题

1. 如果磁感应强度  $B$  不垂直于霍尔片，对测量结果有何影响？如何由实验判断  $B$  与霍尔片是否垂直？

答：霍尔片感应到的是磁场的垂直分量，如果不垂直，会比实际的值小。

将霍尔片绕轴线方向左右旋转，观察示数大小变化，当时数最大时，就是  $B$  垂直于霍尔片。

2. 霍尔效应有哪些应用，试举一例，并简单阐述其原理。

答：霍尔效应在汽车工业中的应用：转向角度传感器。

原理：转向角度传感器使用磁场传感器来测量车辆的转向角度。霍尔元件被安装在转向机构附近，感知

转向机构的磁场变化。当驾驶员转动方向盘时，转向机构会引起磁场的改变，从而产生相应的霍尔电压。转向角度传感器通过测量霍尔电压的变化来确定方向盘的旋转角度，并将该信息传递给车辆的电子控制单元（ECU）。这些数据用于辅助驾驶系统、电动助力转向系统和稳定控制系统等，以实现更精确和响应迅速的车辆转向控制。

指导教师批阅意见

成绩评定

预习 (20 分)	操作及记录 (40 分)	数据处理与结果陈述 (30 分)	思考题 (10 分)	报告整体 印 象	总分