

霍尔效应与应用设计

Hall Effect And Application Design

【实验目的】

1. 通过实验掌握霍尔效应基本原理，了解霍尔元件的基本结构；
2. 学会测量半导体材料的霍尔系数、载流子浓度及迁移率等参数的实验方法和技术；
3. 学会用“对称测量法”消除副效应所产生的系统误差的实验方法。
4. 利用霍尔效应测量磁场。

【预备问题】

1. 霍尔效应基本原理的电磁学解释；
2. 测量半导体材料霍尔系数的实验方法；
3. 霍尔系数测量中副效应的来源、性质及消除或减小的实验方法；
4. 利用霍尔效应测量磁场的方法

【实验背景】

随着半导体物理学的迅速发展，霍尔系数和电导率的测量已成为研究半导体材料的主要方法之一。通过实验测量半导体材料的霍尔系数和电导率可以判断材料的导电类型、计算载流子浓度、载流子迁移率等主要参数。若能测量霍尔系数和电导率随温度变化的关系，还可以求出半导体材料的杂质电离能和材料的禁带宽度。如今，霍尔效应不但是测定半导体材料电学参数的主要手段，而且随着电子技术的发展，利用该效应制成的霍尔器件，由于结构简单、频率响应宽（高达 10GHz）、寿命长、可靠性高等优点，已广泛用于非电量测量、自动控制、信息处理及航空等方面。在工业生产要求自动检测和控制的今天，作为敏感元件之一的霍尔器件，将有更广阔的应用前景。

【实验原理】

1879 年，霍尔在研究关于载流导体在磁场中的受力性质时发现：“电流通过金属，在磁场作用下产生横向电动势”，这种效应被称为霍尔效应，所产生的横向电动势称为霍尔电压 V_H 。不仅金属，半导体同样具有霍尔效应，并被广泛使用。

霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力作用而引起的偏转。如图 1（a）所示，半导体薄片上施加 Z 正向的外磁场 B ，同时通以 X 正向的工作电流 I_S 。假设载流子为电子（N 型半导体材料），它沿着 X 负向运动时受到洛伦兹力（ $F_B = e\vec{v}B$ ），使得电子沿 Y 负向发生偏转，并在下表面积累，而相对的上表面形成正电荷积累。正

负电荷的积累导致在 Y 方向形成一附加的横向电场，因此电子还受到 Y 正向的电场力 F_E 作用。 F_E 随着电荷积累量的增加而增大，直至方向相反的两力大小相等时，电子积累便达到动态平衡，这时在上下两端面之间建立的电场称为霍尔电场 E_H ，相应的电势差称为霍尔电势 V_H 。

假设样品长为 L ，宽为 d 、高为 b ，电流 I_s 可表示为：

$$I_s = ne\bar{v}bd \quad (1)$$

式中 e 为电子电量， \bar{v} 为电子运动平均速度， n 为载流子浓度。平衡时有：

$$eE_H = e\bar{v}B \quad (2)$$

由 (1)、(2) 两式可得霍尔电压：

$$V_H = E_H \cdot b = \frac{1}{ne} \cdot \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (3)$$

其中比例系数 $R_H = \frac{1}{ne}$ 称为霍尔系数，它是反映材料霍尔效应强弱的重要参数。

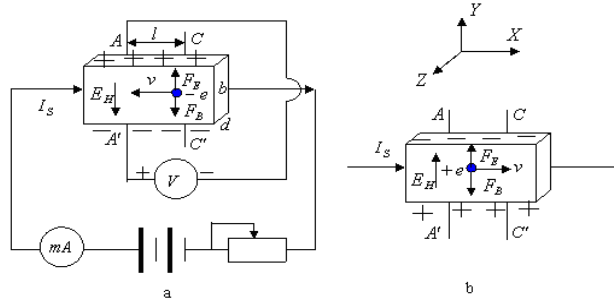


图 1 霍尔效应原理示意图 (a) N 型半导体 (b) P 型半导体

当 霍

尔元件的厚度 d 确定时，设：

$$K_H = R_H / d = 1 / ned \quad (4)$$

则 (3) 式可表示为：

$$V_H = K_H I_s B \quad (5)$$

K_H 称为霍尔元件的灵敏度，它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位工作电流下的霍尔电压大小，其单位是 $[V/(A \cdot T)]$ ，愈大愈好。

P 型半导体霍尔效应的机理相同，霍尔电压方向则相反，如图 (b) 所示。

【霍尔效应的副效应及其消除】

测量霍尔电势 V_H 的基本电路如图 2 所示，将霍尔元件置于待测磁场的相应位置，并使元件平面与磁感应强度 B 垂直，在其控制端输入恒定的工作电流 I_s ，霍尔元件的霍尔电压输出端接毫伏表，测量霍尔电压 V_H 的值。但是测量时，不可避免地会产生一些副效应，由此

而产生的附加电势叠加在霍尔电势上，形成测量系统误差，这些副效应有：

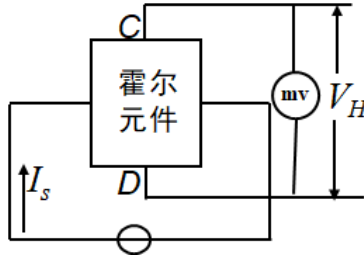


图 2 霍尔元件测量电路示意图

1、不等位电势 V_0

实际的霍尔元件因封装方式不同，接线方式也有差异，两个霍尔电极不可能绝对对称地焊在霍尔元件两侧（图 2）、霍尔元件电阻率不均匀、工作电极的端面接触不良都可能造成 C、D 两极不处在同一等位面上，此时虽未加磁场，但 C、D 间存在电势差 V_0 ，称为不等位电势（ $V_0=I_s R_0$ ， R_0 是 C、D 两极间的不等位电阻）。由此可见，在 R_0 确定的情况下， V_0 与 I_s 的大小成正比，且其正负随 I_s 的方向改变而改变。

2、爱廷豪森（Etinghausen）效应

当霍尔元件的 X 方向通以工作电流 I_s ，Z 方向加磁场 B 时，由于霍尔元件内的载流子速度服从统计分布，有快有慢。在达到动态平衡时，在磁场的作用下慢速与快速的载流子将在洛伦兹力和霍尔电场的共同作用下，沿 Y 轴分别向相反的两侧偏转，这些载流子的动能将转化为热能，使两侧的温度不同，因而造成 Y 方向上两侧出现温差（ $\Delta T=T_C-T_D$ ）。

由于霍尔电极和霍尔元件两者材料不同，电极和元件之间形成温差电偶，这一温差在 C、D 间产生温差电动势 $V_E (\propto I_s B)$ 。这一效应称爱廷豪森效应， V_E 的大小及正负与 I_s 、 B 的大小和方向有关，不能在测量中消除。

3、伦斯脱（Nernst）效应

由于工作电流的两个电极与霍尔元件的接触电阻不同，工作电流在两电极处将产生不同的焦耳热，从而引起工作电流两极间的温差电动势，此电动势又产生温差电流 I_Q （称为热电流）。热电流在磁场作用下将发生偏转，结果在 Y 方向上产生附加的电势差 $V_N (\propto I_Q B)$ ，这一效应称为伦斯脱效应。 V_N 的符号只与 B 的方向有关。

4、里纪-勒杜克（Righi-Leduc）效应

如 3 所述，霍尔元件在 X 方向有温度梯度，引起载流子沿梯度方向扩散而有热电流 I_Q 通过霍尔元件，在此过程中载流子受 Z 方向的磁场 B 作用，在 Y 方向引起类似爱廷豪森效应的温差 $\Delta T=T_C-T_D$ ，由此产生电势差 $V_R \propto I_Q B$ ，其符号与 B 的方向有关，与 I_s 的方向无关。

在确定的磁场 B 和工作电流 I_s 下，实际测出的电压是 V_H 、 V_0 、 V_E 、 V_N 和 V_R 这 5 种电势差的代数和。上述 5 种电势差与 B 和 I_s 方向的关系如表 1：

表 1 5 种电势差与磁场 B 和工作电流 I_S 方向的关系

V_H		V_0		V_E		V_N		V_R	
B	I_S	B	I_S	B	I_S	B	I_S	B	I_S
有关	有关	无关	有关	有关	有关	有关	无关	有关	无关

为了减少和消除以上效应引起的附加电势差,利用这些附加电势差与霍尔元件工作电流 I_S 、磁场 B (即相应的励磁电流 I_M) 的关系,采用对称(交换)测量法测量 C、D 间电势差:

$$\text{当 } +I_M, +I_S \text{ 时} \quad V_{CD1} = +V_H + V_0 + V_E + V_N + V_R$$

$$\text{当 } +I_M, -I_S \text{ 时} \quad V_{CD2} = -V_H - V_0 - V_E + V_N + V_R$$

$$\text{当 } -I_M, -I_S \text{ 时} \quad V_{CD3} = +V_H - V_0 + V_E - V_N - V_R$$

$$\text{当 } -I_M, +I_S \text{ 时} \quad V_{CD4} = -V_H + V_0 - V_E - V_N - V_R$$

对以上四式作如下运算:

$$\frac{1}{4}(V_{CD1} - V_{CD2} + V_{CD3} - V_{CD4}) = V_H + V_E \quad (6)$$

可见,除爱廷豪森效应以外的其他副效应产生的电势差会全部消除。因爱廷豪森效应所产生的电势差 V_E 的符号和霍尔电势 V_H 的符号,与 I_S 及 B 的方向关系相同,故无法消除。但在非大电流、非强磁场下, $V_H \gg V_E$, 因而 V_E 可以忽略不计,故有:

$$V_H \approx \frac{1}{4}(V_{CD1} - V_{CD2} + V_{CD3} - V_{CD4}) \quad (7)$$

【实验仪器】

仪器配件包括: COC-PS32 通用电源、COC-HL-C 通用霍尔测试仪、霍尔转接板、C 型电磁铁、霍尔传感器、二维移动座。

1、COC-PS 通用电源



图 3 通用电源面板

本电源使用数控模块对输出的电流电压进行调节,主要功能区如图 3 所示。电压输出范围 0.00~32.00V, 电流输出范围 0.00~3.000A, 最大输出功率为 50W。本实验用作电流源来

调节通过 C 型电磁铁的励磁电流 I_M 。

2、COC-HL-C 通用霍尔测试仪

本测试仪采用五位数码管显示，按照正确的接线方法连接线路后，通过“电流调节”旋钮调节工作电流（0.000~12.000mA），其中顺时针为增加，电流为连续变化，再记录电压显示屏的电压来测量霍尔电压（范围-199.99~199.99mV）。



图 4 霍尔测试仪

3、霍尔转接板

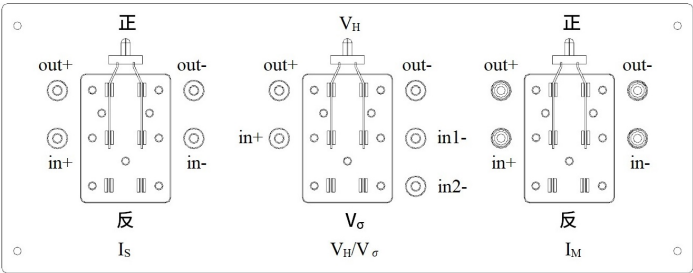


图 5 霍尔转接板示意图

本转接板用于控制实验中的工作电流 I_S 和励磁电流 I_M 方向和路线，双刀双掷开关从左到有分别调节工作电流方向、电压输出 V_H 或 V_σ 、励磁电流方向。

4、C 型电磁铁

实验仪由 C 型电磁铁和底座滑块组成，线径 0.6mm，1750 匝，磁隙为 16mm。底座有滑块，带标识线与锁紧螺钉，可前后左右调节，配合导轨使用。

5、霍尔传感器模块

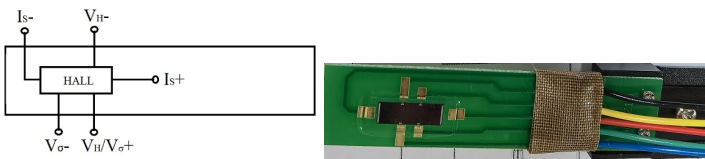


图 6 霍尔片示意图及印制板

霍尔传感器模块以灵敏度较高的锑化铟霍尔元件为主,传感器模块通过尾部的四芯航空插头安装到二维移动座的纵向滑块的插孔槽中,滑块的高度可调,移动座可前后左右调节,配合导轨使用。

I_s 与 I_s -端用于提供工作电流, $V_H/V_{\sigma+}$ 与 V_H -同时接入电压表可用于测量霍尔电压, $V_H/V_{\sigma+}$ 与 $V_{\sigma-}$ 同时接入电压表可用于测量霍尔片两点间的电压。

【实验内容】

一、基础实验

1.恒定磁场, 测量 $V_H—I_s$ 关系

保持励磁电流 $I_M=0.500A$ 不变, 在 $1.000mA-10.000mA$ 范围内改变 I_s (间隔 $1.00mA$), 测量电压 V_i , 记入表格。

参考表 1 测量 $V_H—I_s$ 关系

I_s (mA)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	V_3 (mV)	V_4 (mV)	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$ (mV)
	+ I_s 、+ B	+ I_s 、- B	- I_s 、- B	- I_s 、+ B	
1.000	一组实验				
2.000					
...					
10.000					

说明: I_s 及 B 方向不变为一组实验, 全部测完一组 V_i 后, 将 I_M 调为 0, “ I_s 调节” 旋钮逆时针旋到底, 切换开关后再测 V_2 , 依次类推, 不得带电直接切换方向

2. 恒定工作电流, 测量 $V_H—I_M$ 关系

参考表 2 测量 $V_H—I_M$ 关系

I_M (A)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	V_3 (mV)	V_4 (mV)	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$ (mV)
	+ I_s 、+ B	+ I_s 、- B	- I_s 、- B	- I_s 、+ B	
0.100	一组实验				
0.200					
...					
1.000					

保持工作电流 $I_s=5.00mA$ 不变, 在 $0.100A-1.000A$ 范围内改变 I_M (间隔 $0.100A$), 测量电压 V_i , 记入表格。

说明: I_s 及 B 方向不变为一组实验, 全部测完一组 V_i 后, 将 I_M 调为 0, “ I_s 调节” 旋钮逆时针旋到底, 切换开关后再测 V_2 , 依次类推, 不得带电直接切换方向

3、在零磁场下, 测量 $V_{\sigma}—I_s$ 关系

不加磁场下, 在 $0.10-1.00mA$ 范围内改变 I_s (间隔 $0.10mA$), 测量霍尔元件两点间的电压 V_{σ} 。

参考表 3 测量 V_o — I_s 关系

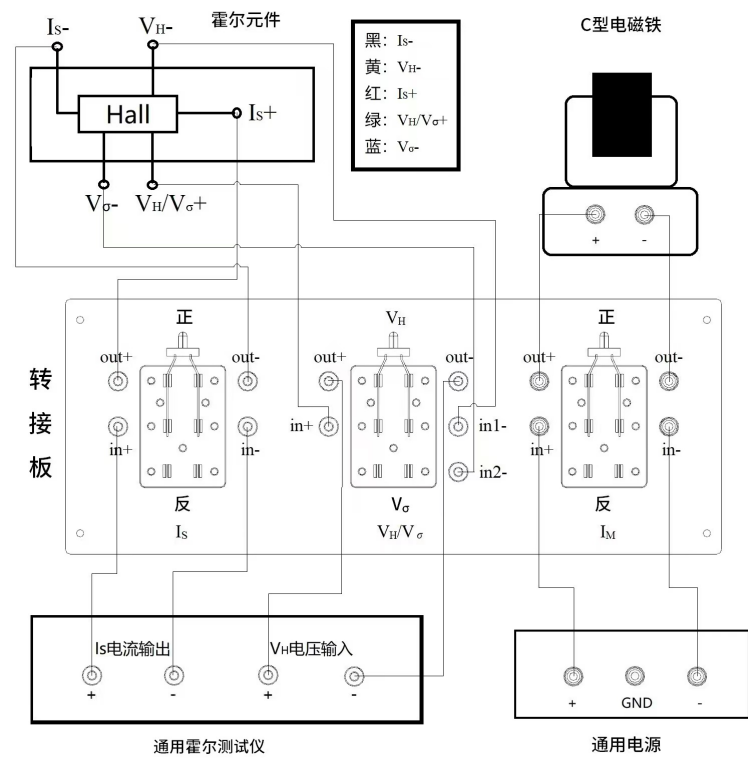
$I_s(\text{mA})$	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
$V_o(\text{mV})$										

【实验步骤与要求】

1、仪器的连接

- 1) 将 **COC-HL-C** 通用霍尔测试仪 “ I_s 电流输出” 正负端接入霍尔转接板 “ I_s 电流输入”，红黑端各自对应；
- 2) 将 **COC-HL-C** 通用霍尔测试仪 “ V_H 电压输入” 正负端接入霍尔转接板 “ V_H 电压输出”，红黑端各自对应；
- 3) 将 **COC-PS** 通用电源正负端接入霍尔转接板 “ I_M 电压输入”，红黑端各自对应；
- 4) 将通用电源的正负端接线柱与转接板励磁电路 “ I_M ” 区的 $\text{in}+$ 与 $\text{in}-$ 分别相连，电磁铁正负端接线柱与转接板励磁电路 “ I_M ” 区的 $\text{out}+$ 与 $\text{out}-$ 分别相连，可通过双刀双掷开关切换励磁电流 I_M 的正反向。
- 5) 通用霍尔测试仪 “ I_s 电流输出” 正负插孔与转接板工作电流 “ I_s ” 区的 $\text{in}+$ 与 $\text{in}-$ 分别相连，测试仪 “ V_H 电压输入” 插孔与转接板 “ V_H/V_o ” 区的 $\text{out}+$ 与 $\text{out}-$ 分别相连。可通过双刀双掷开关切换电流 I_s 的正反向。
- 6) 霍尔片 I_{s+} 与 I_{s-} 端与转接板工作电流 “ I_s ” 区的 $\text{out}+$ 与 $\text{out}-$ 分别相连， V_H/V_o+ 与转接板 “ V_H/V_o ” 区的 $\text{in}+$ 分别相连， V_H- 与转接板 “ V_H/V_o ” 区的 $\text{in}1-$ 相连， V_o- 与转接板 “ V_H/V_o ” 区的 $\text{in}2-$ 分别相连，可通过双刀双掷开关切换测量 V_H 或者 V_o 。

总接线图如下：



- 7) 将霍尔转接板的两个方向切换开关均切至正向;
- 8) 确认通用霍尔测试仪“电流调节”旋钮逆时针旋转至底, 打开电源; 同时开启打开通用电源, 调节励磁电流 I_M , 方法如下:
 - 1、打开通用电源背面的总开关, 再按下面板上的“ON/OFF”键;
 - 2、观察屏幕最上端显示电压设置是否为 32V, 如是, 则按下电流设置“A/I”键, 开始调节电流。注意: 电压设置“V/I”及数据设置“SET”开关勿动。
 - 3、在电流设置状态下, 调节电流, 其中按下编码电位器, 移动屏幕最上端光标指示位置, 改变电流变化的步进及精度, 而旋转电位器可改变电流大小(顺时针为增)。
 说明: 屏幕具有自锁功能, 需要再次调节时, 要重新按下“A/I”键, 再旋转电位器。编码电位器可使输入电流按照步进 ΔI 变化, 而非连续变化。

2、调节霍尔传感器

- 1) 移动二维移动尺, 调整高度使霍尔片高度与电磁铁气隙中心位置基本一致, 再调整传感器模块水平位置, 使霍尔片大致位于电磁铁气隙中心。
- 2) 给定一参考励磁电流 I_M ($\sim 0.5A$) 及工作电流 I_S ($\sim 5mA$), 调整霍尔片高度及模块前后左右位置, 观察电压 V_H 值的变化, 每个方向当 V_H 均为最大时, 霍尔片正好位于电磁铁气隙中心(有一个磁场不变区域。可在任一位置), 该处记为原点($x=0$, $y=0$)。

3、分别测量 V_H-I_S 、 V_H-I_M 系及 V_o-I_S 关系

- 1) 固定励磁电流 I_M ($=500mA$), 调节工作电流 I_S , 测量电压 V_i 值。为消除副效应对测量结果的影响, 对每一测量点都要通过面板上的换向开关改变 I_M 及 I_S 的方向, 将测得的电压值填入表 1。
- 2) 霍尔元件仍位于电磁铁气隙中心, 固定 $I_S=5.00mA$, 调节 I_M , 测量电压 V_i 值。同(1), 改变 I_M 及 I_S 的方向, 将测得的电压值填入表 2。
- 3) 霍尔元件仍位于电磁铁气隙中心, 零磁场下, 在 $0.10-1.00mA$ 范围, 调节工作电流 I_S , 测量电压值 V_o 填入表 3。

二、拓展实验 (要求至少完成一个, 自由发挥)

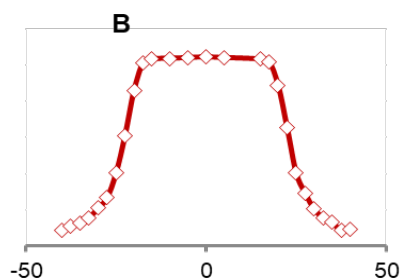
1、测量电磁铁磁感应强度 B 在 X 轴向上的分布(如气隙中, 不限)

参考表 4 电磁铁气隙中磁感应强度 B 在 X 轴向上的分布

$x(mm)$	$V_1(mV)$	$V_2(mV)$	$V_3(mV)$	$V_4(mV)$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (mV)$
	$+I_M, +I_S$	$-I_M, +I_S$	$-I_M, -I_S$	$+I_M, -I_S$	
...					
x_1					
0					
$-x_1$					
...					

1) 调节 $I_M=500\text{mA}$, $I_S=5.000\text{mA}$, 通过上述实验步骤 2 的方法, 使霍尔元件处于电磁铁气隙的中心位置, 将此时的相对位置记为 $x=0$, $y=0$ 。

2) 以气隙中心为例 (对应 $y=0$), 沿 x 方向移动霍尔传感器滑块位置, 大致观察电压变化情况, 并根据变化趋势确定数据点, 选定正负方向。



提示: 每个区域不少于 3 个数据点

3) 移动二维移动座到, 如向左移动 30mm, 记此时的位置为 $x=-30\text{mm}$, 按照上述方法测量相应的 V_H 。(实验中根据具体的情况选择 x 或 y)。

4) 测量各个位置的 V_i , 记入表 4。

5) 计算磁场 B , 分析磁场分布情况

注意: 霍尔片在气隙中向右移动会有受阻点, 不得用力移动

思考: 霍尔片气隙中向右移动受阻, 如何测右测的磁场?

2、测量电磁铁磁感应强度 B 在 Y 轴向上的分布(如气隙中, 不限)

方法同上, 以气隙中为例, 移动滑块使传感器位于 C 型电磁铁 Y 轴中心位置, 调节滑块高度, 测量不同高度的 V_H , 填入表 5; 计算磁场 B , 分析磁场分布情况

注意: 霍尔片在气隙中向下移动会受阻点, 不得用力移动

参考表 5 电磁铁气隙中磁感应强度 B 在 Y 轴向上的分布

$y(\text{mm})$	$V_1(\text{mV})$	$V_2(\text{mV})$	$V_3(\text{mV})$	$V_4(\text{mV})$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}(\text{mV})$
	$+I_M, +I_S$	$-I_M, +I_S$	$-I_M, -I_S$	$+I_M, -I_S$	
.....					
y_1					
0					
$-y_1$					
.....					

【数据处理】

霍尔片尺寸: 长 $L=12.00 \pm 0.02 \text{ mm}$ 宽 $b=3.00 \pm 0.02 \text{ mm}$ 高 $d=0.350 \pm 0.004 \text{ mm}$

1、根据测量数据绘制规范的 V_H-I_S 特征曲线 ;

2、用最小二乘法计算 V_H-I_S 直线斜率 k , 由此计算霍尔系数 R_H 和载流子浓度 n 。计算公式:

$$\bar{R}_H = \frac{V_H \cdot d}{I_S \cdot B} = k \cdot \frac{d}{I_M C} \quad \bar{n} = \frac{1}{R_H \cdot e}$$

其中 $C = \frac{B}{I_M}$ 为电磁铁的线圈常数，见电磁铁标示牌，取 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。注意单位换算。

3、根据误差传递公式计算 R_H 的相对不确定度 $U_r(R_H)$ 、不确定度 U_{RH} 及 n 的不确定度 U_n

$$U_r(R_H) = \sqrt{\left(\frac{1}{k} \cdot U_k\right)^2 + \left(\frac{1}{d} \cdot U_d\right)^2 + \left(\frac{1}{I_M} \cdot U_{I_M}\right)^2} \approx \sqrt{\left(\frac{1}{d} \cdot U_d\right)^2 + \left(\frac{1}{I_M} \cdot U_{I_M}\right)^2}$$

$$U_{R_H} = U_r(R_H) \cdot \bar{R}_H \quad U_n = \left(\frac{U_{R_H}}{\bar{R}_H}\right) \cdot \bar{n}$$

4、根据测量数据绘制规范的 V_H-I_M 特征曲线，用最小二乘法计算直线斜率 k ，由此计算霍尔系数 R_H 和载流子浓度 n 。计算公式：

$$\bar{R}_H = \frac{V_H \cdot d}{I_S \cdot B} = \frac{V_H}{I_M} \cdot \frac{d}{I_S C} = \frac{kd}{I_S C} \quad \bar{n} = \frac{1}{\bar{R}_H \cdot e}$$

5.根据测量数据绘制规范的 I_S-V_{CD} 特征曲线,用最小二乘法计算 I_S-V_{CD} 直线斜率，由此计算电导率 σ 和载流子的迁移率 μ 。

$$\bar{\sigma} = \frac{I_S}{V_{CD}} \cdot \frac{L}{S} = \frac{1}{k} \cdot \frac{L}{b \cdot d} \quad \bar{\mu} = \bar{R}_H \cdot \bar{\sigma}$$

这里取 V_H-I_S 法得到的霍尔系数及不确定度，后面也是。

6、根据误差传递公式计算 σ 的相对不确定度 $U_r(\sigma)$ 、不确定度 U_{σ} 及 μ 的相对不确定度 $U_r(\mu)$ 、不确定度 U_{μ}

$$U_r(\sigma) = \sqrt{\left(\frac{1}{k} \cdot U_k\right)^2 + \left(\frac{1}{L} \cdot U_L\right)^2 + \left(\frac{1}{d} \cdot U_d\right)^2 + \left(\frac{1}{b} \cdot U_b\right)^2} \approx \sqrt{\left(\frac{1}{d} \cdot U_d\right)^2 + \left(\frac{1}{L} \cdot U_L\right)^2 + \left(\frac{1}{b} \cdot U_b\right)^2}$$

$$U_r(\mu) = \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{R}_H}\right)^2 \cdot U_{R_H}^2 + \left(\frac{1}{\bar{\sigma}}\right)^2 \cdot U_{\sigma}^2}$$

$$U_{\sigma} = U_r(\sigma) \cdot \bar{\sigma} \quad U_{\mu} = U_r(\mu) \cdot \bar{\mu}$$

最后结果表达为： $R_H = \left(\bar{R}_H \pm U_{R_H}\right) \quad n = (\bar{n} \pm U_n) \quad \sigma = (\bar{\sigma} \pm U_{\sigma}) \quad \mu = (\bar{\mu} \pm U_{\mu})$

7、利用 1、2 测得的霍尔系数计算电磁铁的磁场，画出磁场分布曲线，并进行分析。

【注意事项】

1. 严格按电路图连接线路，经检查后方可打开试验仪电源开关。
2. 开机和关机前，将 IM 调为 0，“Is 调节”旋钮逆时针旋到底；关机后再取下电源线（8 根），切断转接板的开关。
3. 改变 Is 或 IM 方向时，将 IM 调为 0，“Is 调节”旋钮逆时针旋到底。
4. 切换开关，注意握住绝缘手柄。
5. 接头处不能虚接。

- 6、检查线路时要关掉电源。
- 7、实验完毕，整理仪器和实验桌保持整洁。

【思考题】

1. 数据处理的有效数位的选取
2. 为什么要将电流旋钮逆时针调到头？
3. 仪器示数不稳定的原因是什么？

【拓展思考】

1. 地磁场会对结果有影响吗？
2. 样品未完全放置好，对数据有影响吗？

【重点难点】

- 1、数据变化不正常。

指导建议：检查接头及转换开关

- 2、数据偏小

指导建议：检查霍尔元件是否位于电磁铁气隙中心

【参考文献】

- [1] 熊永红等. 大学物理实验(第一册). 科学出版社, 2007 年 8 月.
- [2] 任忠明等. 大学物理实验(第二册). 科学出版社, 2007 年 8 月.

【附录】

- 1、霍尔系数 R_H 相对不确定度公式推导

$$R_H = \frac{V_H}{I_S} \cdot \frac{d}{I_M \cdot K_H} = \frac{kd}{I_M \cdot K_H}$$

$$\ln R_H = \ln k + \ln d - \ln I_M - \ln K_H$$

$$U_r(R_H) = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln R_H}{\partial d}\right)^2 \cdot U_d^2 + \left(\frac{\partial \ln R_H}{\partial I_M}\right)^2 \cdot U_{I_M}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{d}\right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{1}{I_M}\right)^2 \cdot U_{I_M}^2}$$

- 2、电导率 σ 相对不确定度公式推导

$$\sigma = \frac{I_S L}{V_\sigma \cdot S} = \frac{L}{k \cdot b d}$$

$$\begin{aligned}
U_r(\sigma) &= \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial k}\right)^2 \cdot U_k^2 + \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial L}\right)^2 \cdot U_L^2 + \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial d}\right)^2 \cdot U_d^2 + \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial b}\right)^2 \cdot U_b^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{1}{k}\right)^2 \cdot U_k^2 + \left(\frac{1}{L}\right)^2 \cdot U_L^2 + \left(\frac{1}{d}\right)^2 \cdot U_d^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 \cdot U_b^2} \approx \sqrt{\left(\frac{1}{L}\right)^2 \cdot U_L^2 + \left(\frac{1}{d}\right)^2 \cdot U_d^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 \cdot U_b^2}
\end{aligned}$$

3、载流子迁移率 μ 相对不确定度公式推导

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

$$U_r(\mu) = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \mu}{\partial R_H}\right)^2 \cdot U_{R_H}^2 + \left(\frac{\partial \ln \mu}{\partial \sigma}\right)^2 \cdot U_\sigma^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R_H}\right)^2 \cdot U_{R_H}^2 + \left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 \cdot U_\sigma^2}$$

4、最小二乘法见 PPT 课件