

Tianhuang

Teaching Apparatuses

天煌教仪

物理系列实验

TH-H 型

霍尔效应实验组合仪

(实验指导书、使用说明书)

Hall Effect Experiment Equipment

霍尔效应及其应用



天煌教仪

杭州天科技术实业有限公司

杭州天煌电器设备厂

霍尔效应及其应用

置于磁场中的载流体，如果电流方向与磁场垂直，则在垂直于电流和磁场的方向会产生一附加的横向电场，这个现象是霍普斯金大学研究生霍尔于 1879 年发现的，后被称为霍尔效应。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，而且利用该效应制成的霍尔器件已广泛用于非电量电测、自动控制 and 信息处理等方面。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。了解这一富有实用性的实验，对日后的工作将有益处。

一、实验目的

1. 了解霍尔效应实验原理以及有关霍尔器件对材料要求的知识。
2. 学习用“对称测量法”消除副效应的影响，测量试样的 V_H-I_s 和 V_H-I_b 曲线。
3. 确定试样的导电类型、载流子浓度以及迁移率。

二、实验原理

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。当带电粒子（电子或空穴）被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直电流和磁场的方向上产生正负电荷的聚积，从而形成附加的横向电场，即霍尔电场。对于图 1(a) 所示的 N 型半导体试样，若在 X 方向通以电流 I_s ，在 Z 方向加磁场 B，试样中载流子（电子）将受洛伦兹力

$$F_L = e \bar{v} B \quad (1)$$

则在 Y 方向即试样 A、A' 电极两侧就开始聚积异号电荷而产生相应的附加电场—霍尔电场。电场的指向取决于试样的导电类型。对 N 型试样，霍尔电场逆 Y 方向，P 型试样则沿 Y 方向，有

$$I_s(X)、B(Z) \quad \begin{array}{ll} E_H(Y) < 0 & (\text{N型}) \\ E_H(Y) > 0 & (\text{P型}) \end{array}$$

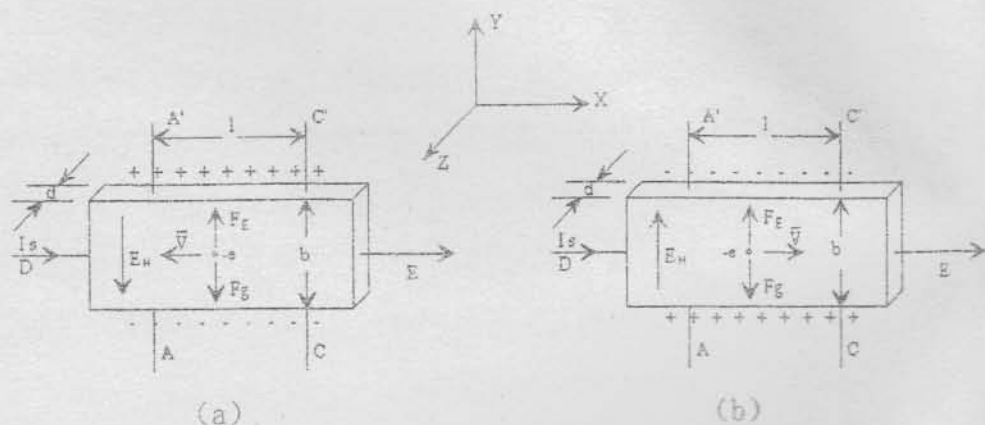


图 (1) 样品示意图

显然, 该电场是阻止载流子继续向侧面偏移, 当载流子所受的横向电场力 $e E_H$ 与洛伦兹力 $e \bar{v} B$ 相等时, 样品两侧电荷的积累就达到平衡, 故有

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

其中 E_H 为霍尔电场, $\bar{v}$ 是载流子在电流方向上的平均漂移速度。

设试样的宽为 b , 厚度为 d , 载流子浓度为 n , 则

$$I_s = n e \bar{v} b d \quad (3)$$

由 (2)、(3) 两式可得

$$V_h = E_H b = \frac{1}{n e} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (4)$$

即霍尔电压 V_h (A 、 A' 电极之间的电压) 与 $I_s B$ 乘积成正比与试样厚度成反比。比例系数 $R_H = \frac{1}{n e}$ 称为霍尔系数, 它是反映材料霍尔效应强弱的重要参数, 只要测出 V_h (伏) 以及知道 I_s (安)、 B (高斯) 和 d (厘米) 可按下式计算 R_H (厘米³/库伦)。

$$R_H = \frac{V_h d}{I_s B} \times 10^8 \quad (5)$$

上式中的 10^8 是由于磁感应强度 B 用电磁单位 (高斯) 而其它各量均采用 C、G、S 实用单位而引入。

根据 R_H 可进一步确定以下参数

1. 由 R_H 的符号（或霍尔电压的正、负）判断样品的导电类型

判断的方法是按图一所示的 I_s 和 B 的方向，若测得的 $V_H = V_{AA'} < 0$ ，（即点 A 的电位低于点 A' 的电位）则 R_H 为负，样品属 N 型，反之则为 P 型。

2. 由 R_H 求载流子浓度 n

即 $n = \frac{1}{|R_H| e}$ 。应该指出，这个关系式是假定所有的载流子都具有相同的漂移速度得到的，严格一点，考虑载流子的速度统计分布，需引入 $3\pi/8$ 的修正因子（可参阅黄昆、谢希德著半导体物理学）。

3. 结合电导率的测量，求载流子的迁移率 μ

电导率 σ 与载流子浓度 n 以及迁移率 μ 之间有如下关系

$$\sigma = n e \mu \quad (6)$$

即 $\mu = |R_H| \sigma$ ，通过实验测出 σ 值即可求出 μ 。

根据上述可知，要得到大的霍尔电压，关键是要选择霍尔系数大（即迁移率 μ 高、电阻率 ρ 亦较高）的材料。因 $|R_H| = \mu \rho$ ，就金属导体而言， μ 和 ρ 均很低，而不良导体 ρ 虽高，但 μ 极小，因而上述两种材料的霍尔系数都很小，不能用来制造霍尔器件。半导体 μ 高， ρ 适中，是制造霍尔器件较理想的材料，由于电子的迁移率比空穴的迁移率大，所以霍尔器件都采用 N 型材料，其次霍尔电压的大小与材料的厚度成反比，因此薄膜型的霍尔器件的输出电压较片状要高得多。就霍尔器件而言，其厚度是一定的，所以实用上采用

$$K_H = \frac{1}{n e d} \quad (7)$$

来表示器件的灵敏度， K_H 称为霍尔灵敏度，单位为 $mV/(mA \cdot T)$ 或 $mV/(mA \cdot KGS)$ 。

三、实验方法

1. 霍尔电压 V_H 的测量

应该说明，在产生霍尔效应的同时，因伴随着多种副效应，以致实验测得的 A 、 A' 两电极之间的电压并不等于真实的 V_H 值，而是包含着各种副效应引起的附加电压，因此必须设法消除。根据副效应产生的机理（参阅附录）可知，

采用电流和磁场换向的对称测量法，基本上能够把副效应的影响从测量的结果中消除，具体的做法是 I_s 和 B (即 I_H) 的大小不变，并在设定电流和磁场的正、反方向后，依次测量由下列四组不同方向的 I_s 和 B 组合的 A 、 A' 两点之间的电压 V_1 、 V_2 、 V_3 、和 V_4 ，即

$+I_s$	$+B$	V_1
$+I_s$	$-B$	V_2
$-I_s$	$-B$	V_3
$-I_s$	$+B$	V_4

然后求上述四组数据 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 的代数平均值，可得

$$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$$

通过对称测量法求得的 V_H ，虽然还存在个别无法消除的副效应，但其引入的误差甚小，可以略而不计。

2、电导率 σ 的测量

σ 可以通过图 1 所示的 A 、 C (或 A' 、 C') 电极进行测量，设 A 、 C 间的距离为 l ，样品的横截面积为 $S = b \cdot d$ ，流经样品的电流为 I_s ，在零磁场下，若测得 A 、 C (A' 、 C') 间的电位差为 V_s (V_{AC})，可由下式求得 σ

$$\sigma = \frac{I_s l}{V_s S} \quad (8)$$

四、实验内容

仔细阅读本仪器使用说明书后，按图 2 连接测试仪和实验仪之间相应的 I_s 、 V_H 和 I_H 各组连线， I_s 及 I_H 换向开关投向上方，表明 I_s 及 I_H 均为正值 (即 I_s 沿 X 方向， B 沿 Z 方向)，反之为负值。 V_H 、 V_s 切换开关投向上方测 V_H ，投向下测 V_s 。(样品各电极及线包引线对应的双刀开关之间连线已由制造厂家连接好)。

注意：严禁将测试仪的励磁电源“ I_H 输出”误接到实验仪的“ I_s 输入”或“ V_H 、 V_s 输出”处，否则一旦通电，霍尔器件即遭损坏！

——为了准确测量，应先对测试仪进行调零，即将测试仪的“ I_s 调节”和“ I_H

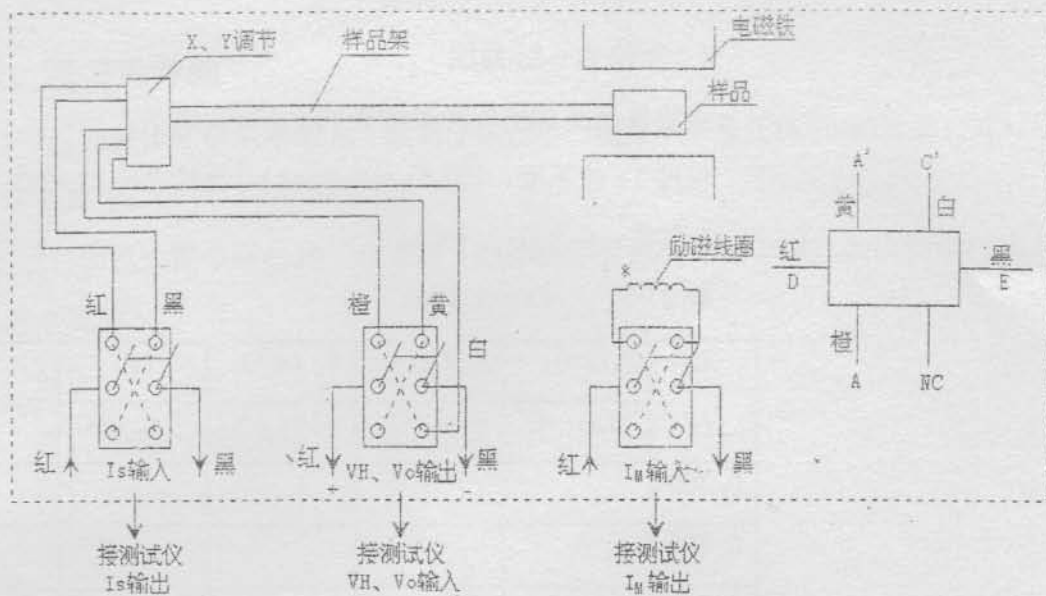


图 (2) 霍尔效应实验仪示意图

调节”旋钮均置零位，待开机数分钟后若 V_H 显示不为零，可通过面板左下方小孔的“调零”电位器实现调零，即“0.00”。

1. 测绘 $V_H - I_s$ 曲线

将实验仪的“ V_H 、 V_0 ”切换开关投向 V_H 侧，测试仪的“功能切换”置 V_H 。

保持 I_M 值不变（取 $I_M = 0.6A$ ），测绘 $V_H - I_s$ 曲线，记入表 1 中。

表 1 $I_M = 0.6A$ I_s 取值：1.00-4.00 mA。

I_s (mA)	V_1 (mV) + I_s 、+B	V_2 (mV) + I_s 、-B	V_3 (mV) - I_s 、-B	V_4 (mV) - I_s 、+B	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$ (mV)
1.00					
1.50					
2.00					
2.50					
3.00					
4.00					

2. 测绘 $V_H - I_S$ 曲线

实验仪及测试仪各开关位置同上。

保持 I_S 值不变, (取 $I_S = 3.00\text{mA}$), 测绘 $V_H - I_S$ 曲线, 记入表 2 中。

I_V 取值: 0.300-0.800A。

表 2 $I_S = 3.00\text{mA}$

I_V (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	
0.300					
0.400					
0.500					
0.600					
0.700					
0.800					

3. 测量 V_o 值

将“ V_H 、 V_o ”切换开关投向 V_o 侧“功能切换”置 V_o 。

在零磁场下, 取 $I_S = 2.00\text{mA}$, 测量 V_o 。

注意: I_S 取值不要过大, 以免 V_o 太大, 毫伏表超量程。(此时首位数码显示为 1, 后三位数码熄灭)。

4. 确定样品的导电类型

将实验仪三组双刀开关均投向上方, 即 I_S 沿 X 方向, B 沿 Z 方向, 毫伏表测量电压为 V_M 。

取 $I_S = 2\text{mA}$, $I_V = 0.6\text{A}$, 测量 V_H 大小及极性, 判断样品导电类型。

5. 求样品的 R_H 、 n 、 σ 和 μ 值。

五、预习思考题

1. 列出计算霍尔系数 R_H 、载流子浓度 n 、电导率 σ 及迁移率 μ 的计算公式，并注明单位。

2. 如已知霍尔样品的工作电流 I_s 及磁感应强度 B 的方向，如何判断样品的导电类型。

附录

霍尔器件中的副效应及其消除方法

(1) 不等势电压 V_o

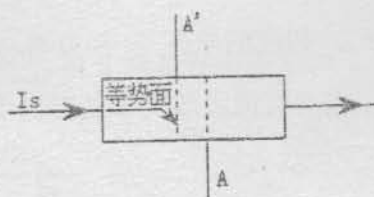


图 (3)

如图 3 这是由于器件的 A 、 A' 两电极的位置不在一个理想的等势面上，因此，即使不加磁场，只要有电流 I_s 通过，就有电压 $V_o = I_s r$ 产生， r 为 A 、 A' 所在的两个等势面之间的电阻，结果在测量 V_H 时，就叠加了 V_o ，使得 V_H 值偏大，（当 V_o 与 V_H 同号）或偏小（当 V_o 与 V_H 异号），显然， V_H 的符号取决于 I_s 和 B 两者的方向，而 V_o 只与 I_s 的方向有关，因此可以通过改变 I_s 的方向予以消除。

(2) 温差电效应引起的附加电压 V_e

如图 4 所示，由于构成电流的载流子速度不同，若速度为 v 的载流子所受的洛伦兹力与霍尔电场的作用力刚好抵消，则速度大于或小于 v 的载流子在电场和磁场作用下，将各自朝对立面偏转，从而在 Y 方向引起温差 $T_A - T_A'$ ，由此产生的温差电效应，在 A 、 A' 电极上引入附加电压 V_e ，且 $V_e \propto I_s B$ ，其符号与 I_s 和 B 的方向的关系跟 V_H 是相同的，因此不能用改变 I_s 和 B 方向的方法予以消除，但其引入的误差很小，可以忽略。

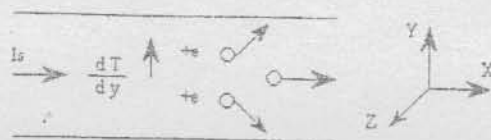


图 (4)

(3) 热磁效应直接引起的附加电压 V_N

如图 5 因器件两端电流引线的接触电阻不等, 通电后在接点两处将产生不同的焦耳热, 导致在 X 方向有温度梯度, 引起载流子沿梯度方向扩散而产生热扩散电流, 热流 Q 在 z 方向磁场作用下, 类似于霍尔效应在 Y 方向上产生一附加电场 ϵ_N , 相应的电压 $V_N \propto Q B$, 而 V_N 的符号只与 B 的方向有关, 与 I_s 的方向无关, 因此可通过改变 B 的方向予以消除。



图 (5)

(4) 热磁效应产生的温差引起的附加电压 V_{RL}

如 (3) 所述的 X 方向热扩散电流, 因载流子的速度统计分布, 在 Z 的方向的磁场 B 作用下, 和 (2) 中所述的同一道理将在 Y 方向产生温度梯度 $T_A - T_{A'}$, 由此引入的附加电压 $V_{RL} \propto Q B$, V_{RL} 的符号只与 B 的方向有关, 亦能消除。

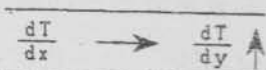


图 (6)

综上所述, 实验中测得的 A 、 A' 之间的电压除 V_H 外还包含 V_0 、 V_N 、 V_{RL} 和 V_E 各电压的代数和, 其中 V_0 、 V_N 和 V_{RL} 均通过 I_s 和 B 换向对称测量法予以消除。

设 I_s 和 B 的方向均为正向时, 测得 A 、 A' 之间电压记为 V_1 , 即

$$\text{当 } +I_s, +B \text{ 时} \quad V_1 = V_H + V_0 + V_N + V_{RL} + V_E$$

将 B 换向, 而 I_s 的方向不变, 测得的电压记为 V_2 , 此时 V_H 、 V_N 、 V_{RL} 、 V_E 均改号而

V_H 符号不变, 即

$$\text{当 } +I_s, -B \text{ 时} \quad V_1 = -V_H + V_D - V_N - V_{RL} - V_E$$

同理, 按照上述分析

$$\text{当 } -I_s, -B \text{ 时} \quad V_2 = V_H - V_D - V_N - V_{RL} + V_E$$

$$\text{当 } -I_s, +B \text{ 时} \quad V_3 = -V_H - V_D + V_N + V_{RL} - V_E$$

求以上四组数据 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 的代数平均值, 可得

$$V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$$

由于 V_E 符号与 I_s 和 B 两者方向关系和 V_H 是相同的, 故无法消除, 但在非大电流, 非强磁场下, $V_H \gg V_E$, 因此 V_E 可略而不计, 所以霍尔电压为

$$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$$

TH-H 型霍尔效应实验组合仪

使用说明书

霍尔效应发现于 1879 年,随着电子技术的进展,利用霍尔效应制成的电子器件(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、已广泛用于非电量电测、自动化控制和信息处理等方面。

霍尔效应实验既结合教学内容又富有实用性,是一个能深化课堂教学、培养学生实验技能以及启发学生创造思维和应用设想的典型实验。为此,热忱向各院校推荐我企业生产的 TH-H 型霍尔效应实验组合仪。

TH-H 型霍尔效应实验组合仪可测定霍尔系数和载流子浓度,此外,结合电导率测量可确定试样的载流子迁移率。

TH-H 型霍尔效应实验组合仪设计合理,性能稳定,各项技术指标完全符合实验要求。此外,其测试单元还具有多用功能,如用于电阻-温度实验,也可单独作为直流恒流源或直流数字毫伏表使用。

一、实验装置简介

TH-H 型霍尔效应实验组合仪由实验仪和测试仪两大部份组成。

A. 实验仪(图 1 所示)

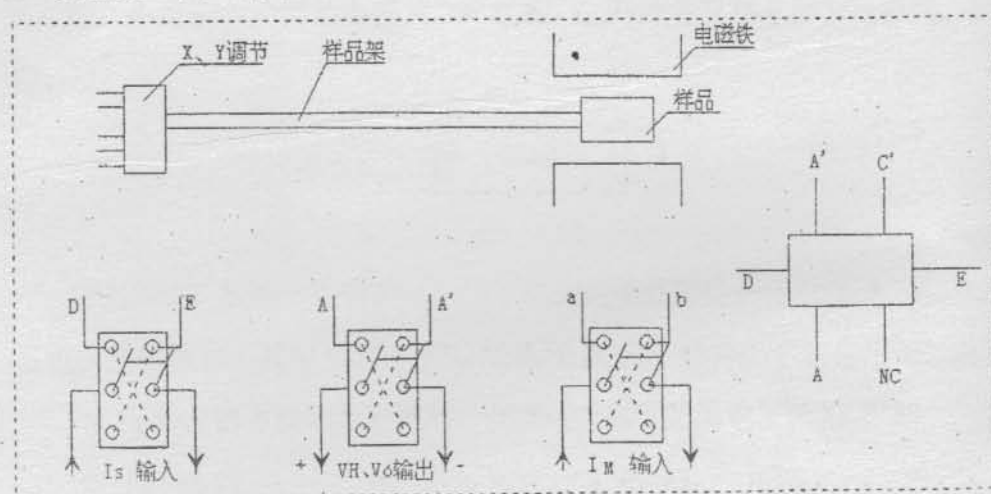


图 (1) 霍尔效应实验仪示意图

1. 电磁铁

规格为 $>3.00 \text{ KGS/A}$ ，磁铁线包的引线有星标者为头（见实验仪上图示），线包绕向为顺时针（操作者面对实验仪）根据线包绕向及励磁电流 I_M 流向，可确定磁感应强度 B 的方向，而 B 的大小与 I_M 的关系由厂家给定并标明在线包上。

2. 样品和样品架

样品材料为N型半导体硅单晶片，根据空脚的位置不同，样品分两种形式，即图2(a)和(b)，样品的几何尺寸为：

厚度 $d=0.5\text{mm}$ ，宽度 $b=4.0\text{mm}$ ，A、C 电极间距 $l=3.0\text{mm}$ 。

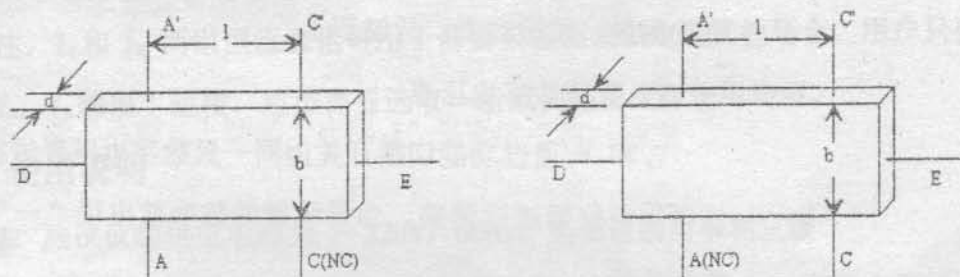


图 (2) 样品示意图

样品共有三对电极，其中 A、A' 或 C、C' 用于测量霍尔电压 V_H ，A、C 或 A'、C' 用于测量电导；D、E 为样品工作电流电极。各电极与双刀换接开关的接线见实验仪上图示说明。

样品架具有 X、Y 调节功能及读数装置，样品放置的方位（操作者面对实验仪）如图 2 所示。

3. I_S 和 I_M 换向开关及 V_H 、 V_o 切换开关。

I_S 及 I_M 换向开关投向上方，则 I_S 及 I_M 均为正值，反之为负值；“ V_H 、 V_o ”切换开关投向上方测 V_H ，投向下测 V_o 。

B. 测试仪（图 3 所示）

1. “ I_S 输出”为 $0\sim 10\text{mA}$ 样品工作电流源，“ I_M 输出”为 $0\sim 1\text{A}$ 励磁电流源，

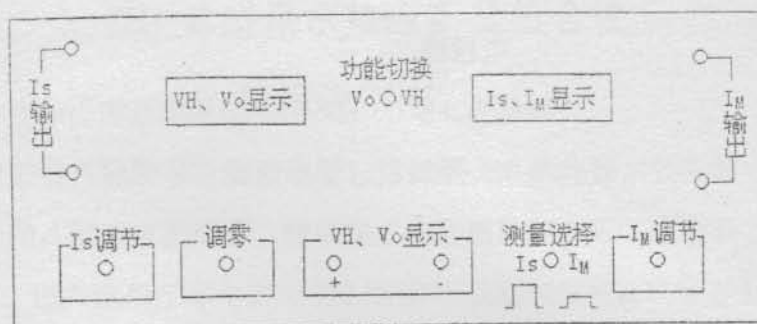


图 (3) 测试仪面板图

两组电流源彼此独立，两路输出电流大小通过 I_s 调节旋钮及 I_m 调节旋钮进行调节，二者均连续可调。其值可通过“测量选择”按键由同一只数字电流表进行测量，按键测 I_m ，放键测 I_s 。

2. 直流数字电压表

V_H 和 V_o 通过功能切换开关由同一只数字电压表进行测量。电压表零位可通过调零电位器进行调整。当显示器的数字前出现“—”号时，表示被测电压极性为负值。

二、技术指标

1. 励磁恒流源 I_m

输出电流：0~1A，连续可调，调节精度可达 1mA。

最大输出负载电压：25V。

电流稳定度：优于 10^{-3} （交流输入电压变化 $\pm 10\%$ ）。

电流温度系数： $< 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ 。

负载稳定度：优于 10^{-3} （负载由额定值变为零）。

电流指示： $3\frac{1}{2}$ 位发光管数字显示，精度不低于 0.5%。

2. 样品工作恒流源 I_s

输出电流: $0 \sim 10\text{mA}$, 连续可调, 调节精度可达 $10\mu\text{A}$ 。

最大输出负载电压: 12V 。

电流稳定度: 优于 10^{-3} (交流输入电压变化 $\pm 10\%$)。

电流温度系数: $< 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。

负载稳定度: 优于 10^{-3} (负载由额定值变为零)。

电流指示: $3\frac{1}{2}$ 位发光管数字显示, 精度不低于 0.5% 。

3. 直流数字毫伏表

测量范围 $\pm 20\text{mV}$; $\pm 200\text{mV}$ 。

位发光管数字显示, 精度不低于 0.5% 。

注: I_s 和 I_m 两组恒流源也可用于需要直流恒流供电的其他场合, 用户只要将 “ V_H 、 V_o 输出” 短接, 可按需要选取一组或两组恒流源使用均可。

三、使用说明

1. 测试仪的供电电源为 $\sim 220\text{V}$, 50Hz , 电源进线为单相三线。
2. 电源插座和电源开关均安装在机箱背面, 保险丝为 0.5A , 置于电源插座内。
3. 样品各电极及线包引线 with 对应的双刀换接开关之间连线 (已由厂家连接好) 见实验仪上图示说明。
4. 测试仪面板上的 “ I_s 输出”、“ I_m 输出” 和 “ V_H 、 V_o 输入” 三对接线柱应分别与实验仪上的三对相应的接线柱正确连接。
5. 仪器开机前应将 I_s 、 I_m 调节旋钮逆时针方向旋到底, 使其输出电流趋于最小状态, 然后再开机。
6. “ V_H 、 V_o 切换开关” 应始终保持闭合状态。
7. 仪器接通电源后, 预热数分钟即可进行实验。
8. “ I_s 调节” 和 “ I_m 调节” 分别用来控制样品工作电流和励磁电流的大小, 其电流随旋钮顺时针方向转动而增加, 细心操作, 调节的精度分别可达 $10\mu\text{A}$ 。

和 1mA 。 I_s 和 I_M 读数可通过“测量选择”按键来实现。按键测 I_M ，放键测 I_s 。

9. 关机前，应将“ I_s 调节”和“ I_M 调节”旋钮逆时针方向旋到底，使其输出电流趋于零，然后才可切断电源。

五、仪器检验步骤

1. 仪器出厂前，霍尔片已调至电磁铁中心位置。霍尔片性脆易碎、电极甚细易断，严防撞击，或用手去触摸，否则，即遭损坏！在需要调节霍尔片位置时，必须谨慎，切勿随意改变 y 轴方向的高度，以免霍尔片与磁极面磨擦而受损。

2. 测试仪的“ I_s 调节”和“ I_M 调节”旋钮均置零位（即逆时针旋到底）。

3. 测试仪的“ I_s 输出”接实验仪的“ I_s 输入”，“ I_M 输出”接“ I_M 输入”，并将 I_s 及 I_M 换向开关掷向任一侧。

注意：决不允许将“ I_M 输出”接到“ I_s 输入”或“ V_H 、 V_o 输出”处，否则，一旦通电，霍尔样品即遭损坏。

4. 实验仪的“ V_H 、 V_o 输出”接测试仪的“ V_H 、 V_o 输入”，“ V_H 、 V_o 输出”切换开关倒向 V_H 一侧。

5. 接通电源，预热数分钟后，电流表显示“0.000”（当按下“测量选择”键时）或“0.00”（放开“测量选择”键时）[注]，电压表显示为“0.00”（若不为零，可通过面板左下方小孔内的电位器来调整）。

6. 置“测量选择”于 I_s 档（放键），电流表所示的 I_s 值即随“ I_s 调节”旋钮顺时针转动而增大，其变化范围为 $0-10\text{mA}$ ，此时电压表所示 V_H 读数为“不等势”电压值，它随 I_s 增大而增大， I_s 换向， V_H 极性改号（此乃副效应所致，可通过“对称测量法”予以消除），说明“ I_s 输出”和“ I_s 输入”正常。取 $I_s \approx 2\text{mA}$ 。

7. 置“测量选择”于 I_M 档（按键），顺时针转动“ I_M 调节”旋钮，查看变化范围应为 $0-1\text{A}$ 。此时 V_H 值亦随 I_M 增大而增大，当 I_M 换向时， V_H 亦改号（其绝对值随 I_M 流向不同而异，此乃副效应所致，可通过“对称测量法”予以消除），说明“ I_M 输出”和“ I_M 输入”正常。至此，应将“ I_M 调节”旋钮复零。

8. 放开测量选择键, 再测 I_s , 调节 $I_s = 2 \text{ mA}$, 然后将“ V_H 、 V_s 输出”切换开关倒向 V_s 一侧, 测量 V_s (A、C 电极间电压), I_s 换向, V_s 亦改号, 至此, 说明霍尔样品的各个电极均为正常。将“ V_H 、 V_s 输出”切换开关恢复 V_H 一侧。

注意: 查看 V_s 时, I_s 不宜过大, 以免数字电压表超量程, 通常取 I_s 为 2 mA 左右。

9. 本仪器数码显示稳定可靠, 但若电源线不接地则可能会出现数字跳动现象。

“ V_H 、 V_s 输入”开路或输入电压超量程, 则电压表出现溢出现象。

注: 有时, I_s 调节电位器或 I_M 调节电位器起点不为零, 将出现电流表指示末位不为零, 亦属正常。