



Huazhong University of Science & Technology

华中科技大学

Department of Physics

霍尔效应与应用设计

华中科技大学物理实验中心

【实验目的】

- 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；
- 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；
- 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。
- 利用霍尔效应测量电磁铁磁场的空间分布

【实验内容】

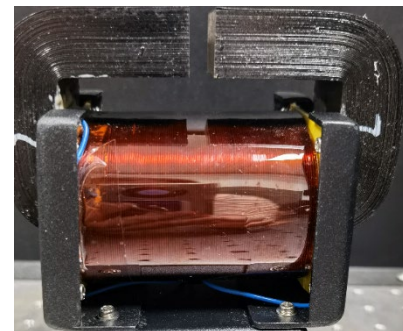
一、基础实验

1. 恒定磁场，测量 V_H — I_s 关系，计算霍尔系数及载流子浓度
2. 恒定工作电流，测量 V_H — I_M 关系，计算霍尔系数及载流子浓度
3. 零磁场下，测量 V_o — I_s 关系，计算电导率及载流子迁移率

二、拓展实验

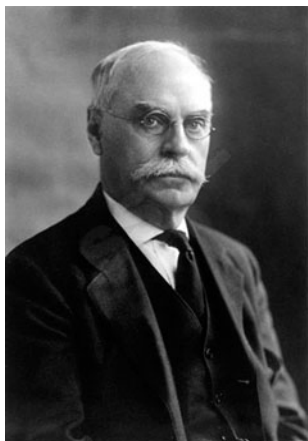
利用霍尔传感器测量磁场（至少选1个，自由发挥）

1. C型电磁铁X方向磁场分布（如气隙中，不限）
2. C型电磁铁Y方向磁场分布（如气隙中，不限）

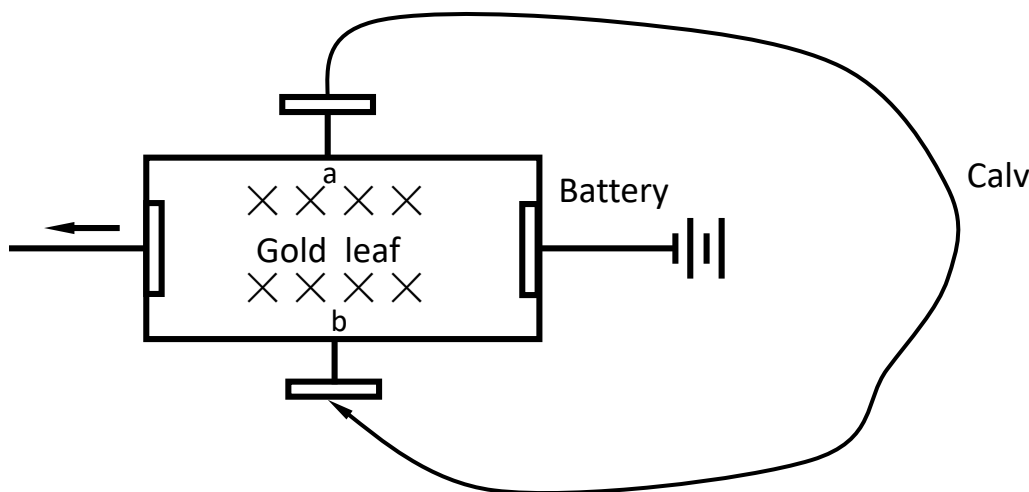


【背景介绍】

1879, 24岁的霍尔在美国霍普金斯大学读研究生期间, 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” -----霍尔效应



Edwin Hall
(1855~1938)



新闻界: “过去50年中电学方面最重要的发现”

【霍尔效应解释】

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。

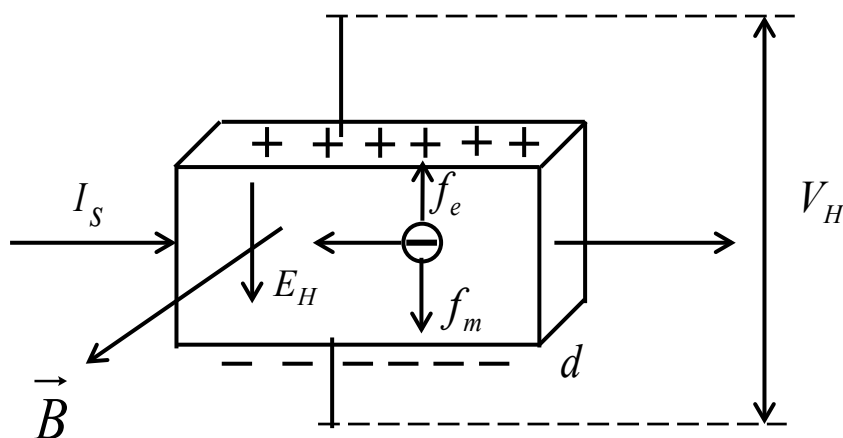
工作电流 I_s 及磁场 B 下电子（N型）受到洛伦兹力

$f_m = e\bar{v}B \longrightarrow$ 电子偏转 \longrightarrow 两侧面正负电荷积累

\longrightarrow 产生附加横向电场 E , 电子受到横向电场力 $f_e = eE$

直至两力平衡时, 两侧电荷的积累达到平衡, 有

$$eE_H = e\bar{v}B$$



样品尺寸：长 L 、宽 d 、高 b

$$L=12.00 \pm 0.02 \text{ mm} \quad b=3.00 \pm 0.02$$

$$d=0.350 \pm 0.004 \text{ mm}$$

工作电流 I_s

$$I_s = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{nL \cdot b \cdot d \cdot e}{\Delta t} = ne\bar{v}bd$$

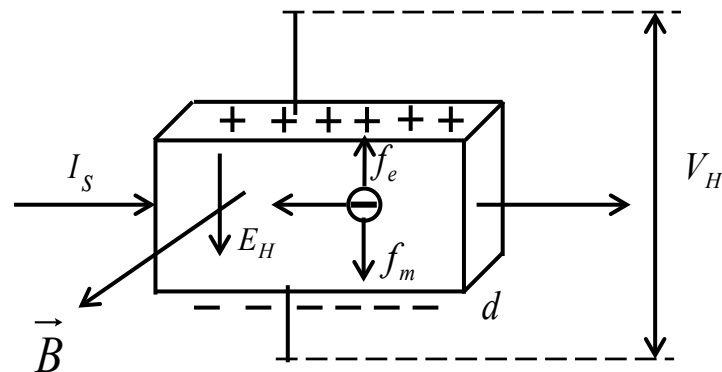
霍尔电压 V_H

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

霍尔系数

$$R_H = \frac{1}{ne} \quad \text{m}^3/\text{C}$$

$$\sigma = \frac{I_s}{V_\sigma} \cdot \frac{L}{S} = k \cdot \frac{L}{b \cdot d} \quad \text{S/m} \quad \mu = R_H \cdot \sigma$$
$$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$$



e ：电子电量

n ：载流子浓度

\bar{v} ：电子平均运动速率

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

【霍尔效应应用】

➤ 研究和测量半导体材料的参数的重要手段

测量半导体材料的霍尔系数、载流子浓度、电导率、迁移率、判别半导体材料的导电类型。

测量半导体材料的霍尔系数和电导率随温度的变化关系，求半导体材料的杂质电离能和材料的禁带宽度。

➤ 霍尔元件

(特点：结构简单、频率响应宽、寿命长、可靠性高)

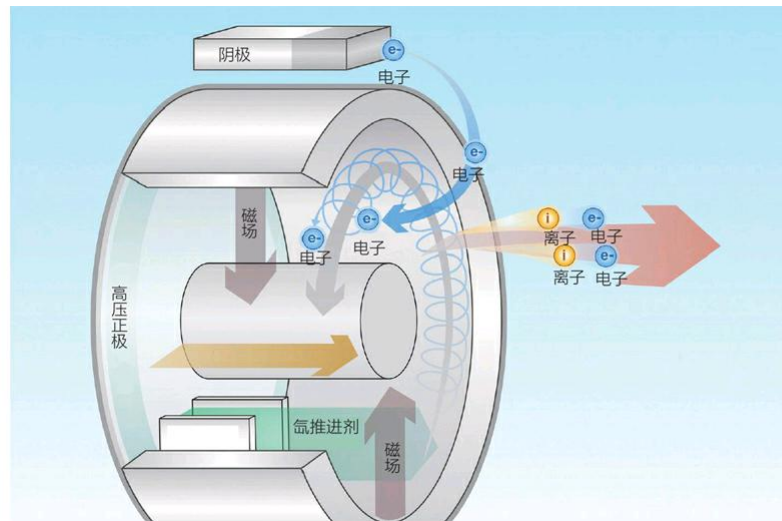
非电学量测量 自动控制 信息处理

【霍尔效应应用】

星际航行的动力——霍尔推进器



天宫空间站



霍尔推进器原理图

霍尔推进器的主要燃料是氙气，天宫空间站上装有四台这样的推进器，每台推进器的推力只有0.32牛，已经足够维持空间站的稳定运行

【霍尔效应的发展】

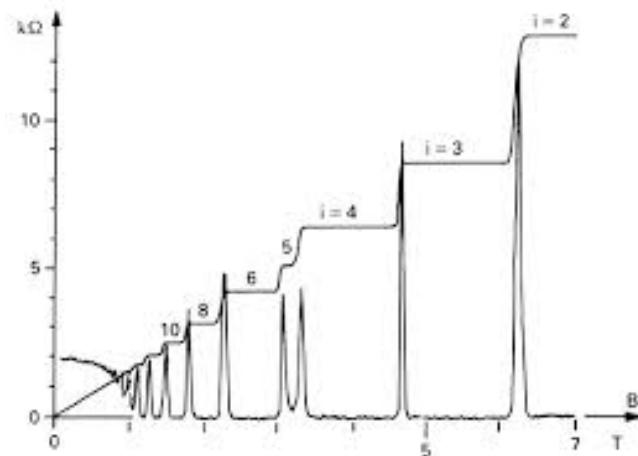
1、量子霍尔效应(Quantum Hall Effect) (1985年诺贝尔物理学奖)

1980年，德国物理学家冯·克利青观察到在超强磁场（18T）和极低温（1.5K）条件下，霍尔电压 V_H 与磁场 B 之间的关系不再是线性的，出现一系列量子化平台。



量子霍尔电阻

$$R_H = \frac{V_H}{I_H} = \frac{h}{e^2} \cdot \frac{1}{i} \quad i = 1, 2, 3$$



【霍尔效应的发展】

2、分数量子霍尔效应(1998年诺贝尔物理学奖)



劳克林

施特默

崔琦

- 1、1982年，美国AT&T贝尔实验室的崔琦和斯特默发现：“极纯的半导体材料在超低温(0.5K)和超强磁场(25T)下，一种以分数形态出现的量子电阻平台”。
- 2、1983年，同实验室的劳克林提出准粒子理论模型，解释这一现象。

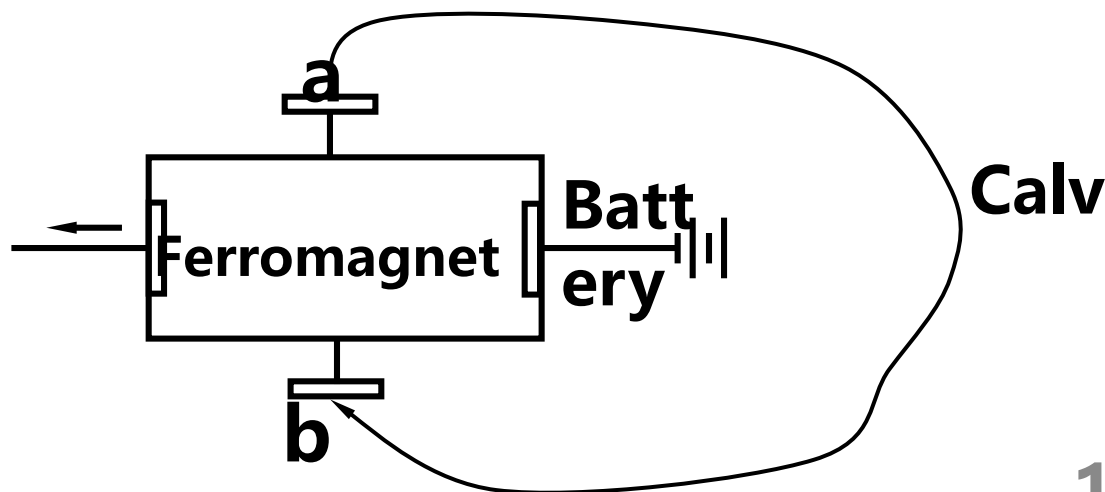
【霍尔效应的发展】

3、反常霍尔效应

1880年，Edwin Hall在一个铁磁性的金属平板中发现，即使是在没有外加磁场的情况下（或弱外场），也可以观测到霍尔效应。这种铁磁性材料中的霍尔效应后来被称之为反常霍尔效应。



Edwin Hall
(1855 ~ 1938)



【霍尔效应的发展】

4、量子反常霍尔效应

Quantized Anomalous Hall Effect in Magnetic Topological Insulators

Rui Yu,¹ Wei Zhang,¹ Hai-Jun Zhang,^{1,2} Shou-Cheng Zhang,^{2,3} Xi Dai,^{1*} Zhong Fang^{1*}

The anomalous Hall effect is a fundamental transport process in solids arising from the spin-orbit coupling. In a quantum anomalous Hall insulator, spontaneous magnetic moments and spin-orbit coupling combine to give rise to a topologically nontrivial electronic structure, leading to the quantized Hall effect without an external magnetic field. Based on first-principles calculations, we predict that the tetradymite semiconductors Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , and Sb_2Te_3 form magnetically ordered insulators when doped with transition metal elements (Cr or Fe), in contrast to conventional dilute magnetic semiconductors where free carriers are necessary to mediate the magnetic coupling. In two-dimensional thin films, this magnetic order gives rise to a topological electronic structure characterized by a finite Chern number, with the Hall conductance quantized in units of e^2/h (where e is the charge of an electron and h is Planck's constant).



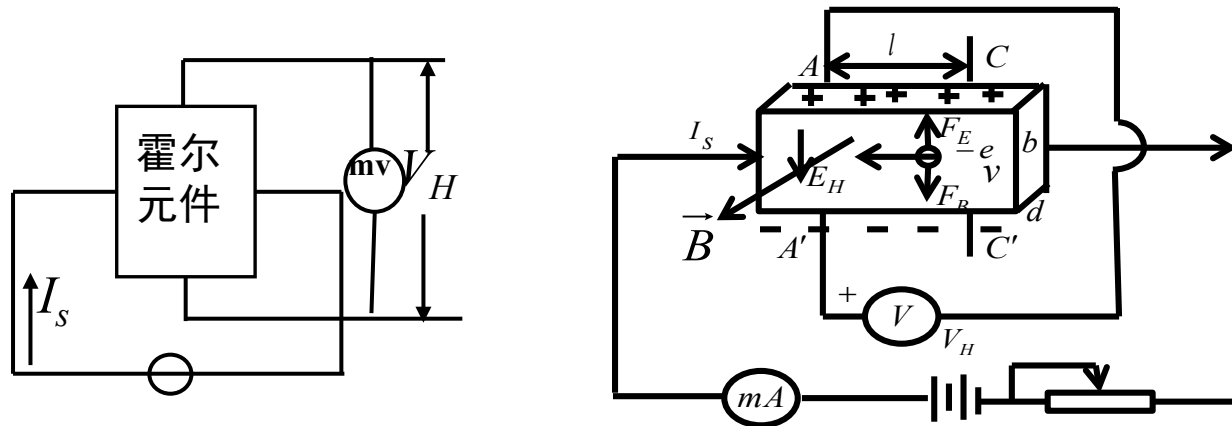
由清华大学**薛其坤**院士领衔，清华大学、中科院物理所和斯坦福大学联合组成的团队从实验中首次观测到量子反常霍尔效应，这是中国科学家从实验中独立观测到的一个重要物理现象，也是物理学领域基础研究的一项重要科学发现。

SCIENCE 329, 61-64 (2010)

SCIENCE 340, 167-170 (2013)

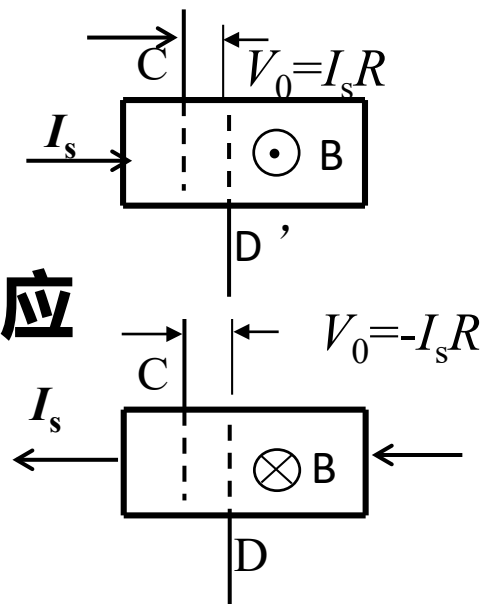


【霍尔效应测量的副效应及消除方法】



●副效应 霍尔元件测量电路示意图

- 1、不等位电势 V_0
- 2、爱廷豪森 (Etinghausen) 效应
- 3、伦斯脱 (Nernst) 效应
- 4、里纪-勒杜克 (Righi-Leduc) 效应



●消除方法 对称（交换）测量法

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

通过改变工作电流及外加磁场方向（即励磁电流），
可消除除爱廷豪森效应外的其他副效应

当 $+I_{M'}, +I_s$ 时 $V_{CD1} = +V_H + V_0 + V_E + V_N + V_R$

当 $+I_{M'}, -I_s$ 时 $V_{CD2} = -V_H - V_0 - V_E + V_N + V_R$

当 $-I_{M'}, -I_s$ 时 $V_{CD3} = +V_H - V_0 + V_E - V_N - V_R$

当 $-I_{M'}, +I_s$ 时 $V_{CD4} = -V_H + V_0 - V_E - V_N - V_R$

由于 $V_H \gg V_E$ $V_H \approx \frac{1}{4} (V_{CD1} - V_{CD2} + V_{CD3} - V_{CD4})$

【实验仪器】



电源

电压设置

数据设置

电流设置



液晶显示屏

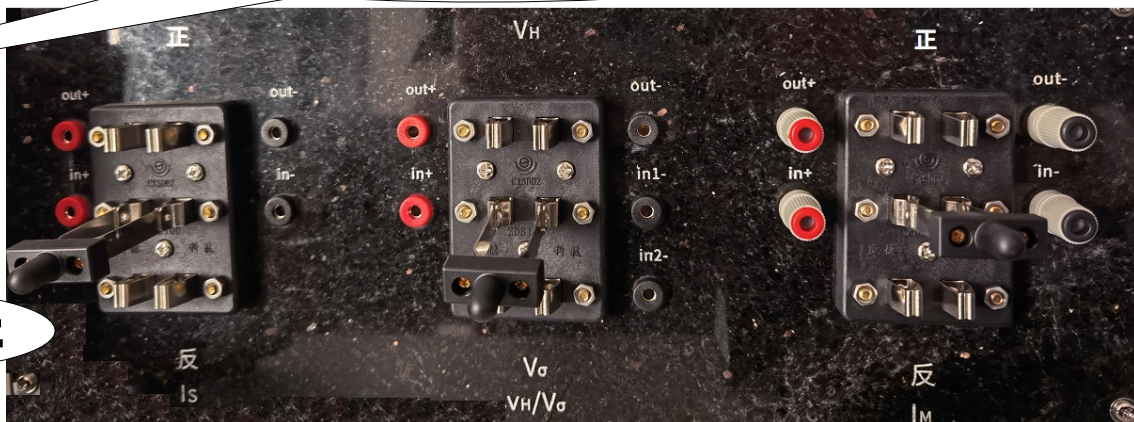
编码电位器

输出开关

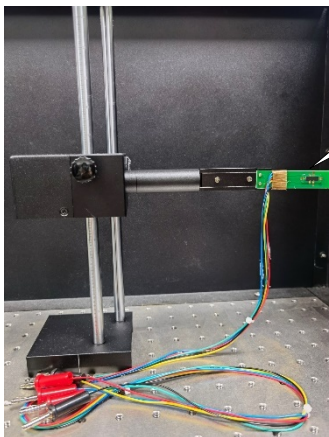
说明：通用电源的电压设置、数据设置勿改

调节电流方法：屏幕锁住后，按电流设置键，旋转旋钮即可调节
调节位数方法：视频

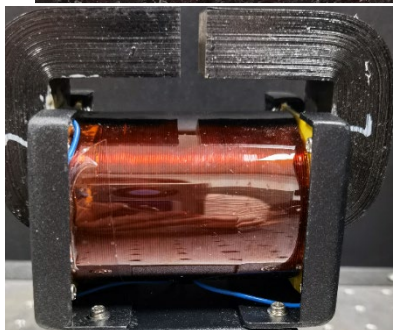
霍尔效应测试仪



霍尔元件



霍尔片模块



C型电磁铁

霍尔转接盒

$$B = I_M \cdot C$$

C: 电磁铁气隙中间处
霍尔片位置调节见讲义P8

【实验内容】


实验步骤见讲义P7

1. 恒定磁场，测量 V_H — I_s 关系

励磁电流 $I_M = 0.500\text{A}$ ， 1.00mA - 10.00mA 范围内改变 I_s (间隔 1.00mA)，测量电压 V_{ij} ，记入表1。

参考表1 测量 V_H — I_s 关系

★ 不得带电切换转接板开关

I_s (mA)	$V_1(\text{mV})$	$V_2(\text{mV})$	$V_3(\text{mV})$	$V_4(\text{mV})$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (\text{mV})$
	$+I_s, +B$	$+I_s, -B$	$-I_s, -B$	$-I_s, +B$	
1.000					
2.000					
3.000					
..					
10.000					

注意： I_s 、 I_M 方向不变为一组，全部测完一组 V_1 ，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 16/26


2. 恒定工作电流，测量 $V_H—I_M$ 关系

工作电流 $I_s = 5.00\text{mA}$ 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。

参考表2 测量 $V_H—I_M$ 关系

★ 不得带电切换转接板开关

I_M (A)	$V_1(\text{mV})$	$V_2(\text{mV})$	$V_3(\text{mV})$	$V_4(\text{mV})$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (\text{mV})$
	$+I_s, +B$	$+I_s, -B$	$-I_s, -B$	$-I_s, +B$	
0.100					
0.200					
0.300					
..					
1.000					

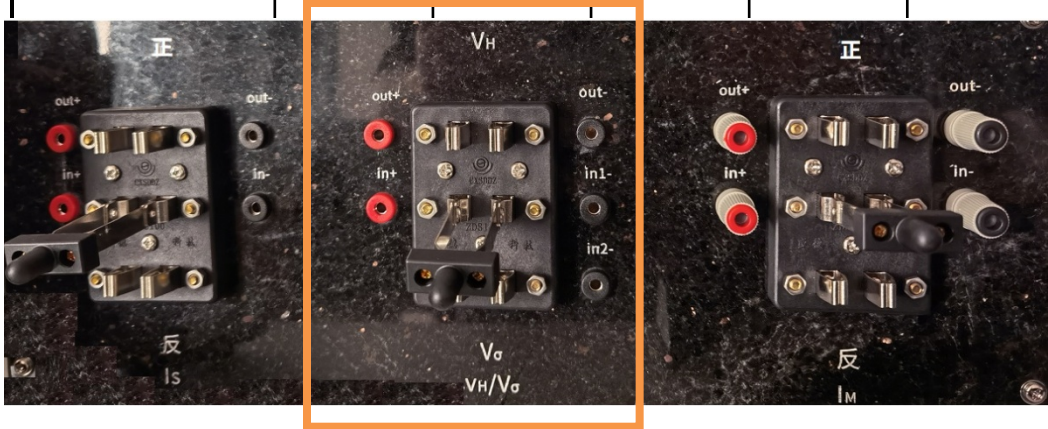
注意： I_s 、 I_M 方向不变为一组，全部测完一组 V_1 ，将 I_M 调为0，
“ I_s 调节” 旋钮逆时针旋到底，切换开关后再 V_2 ，依次类推；

3、在零磁场下，测量 V_{σ} — I_s 关系

不加磁场下，在0.100-1.000mA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_{σ} — I_s 关系

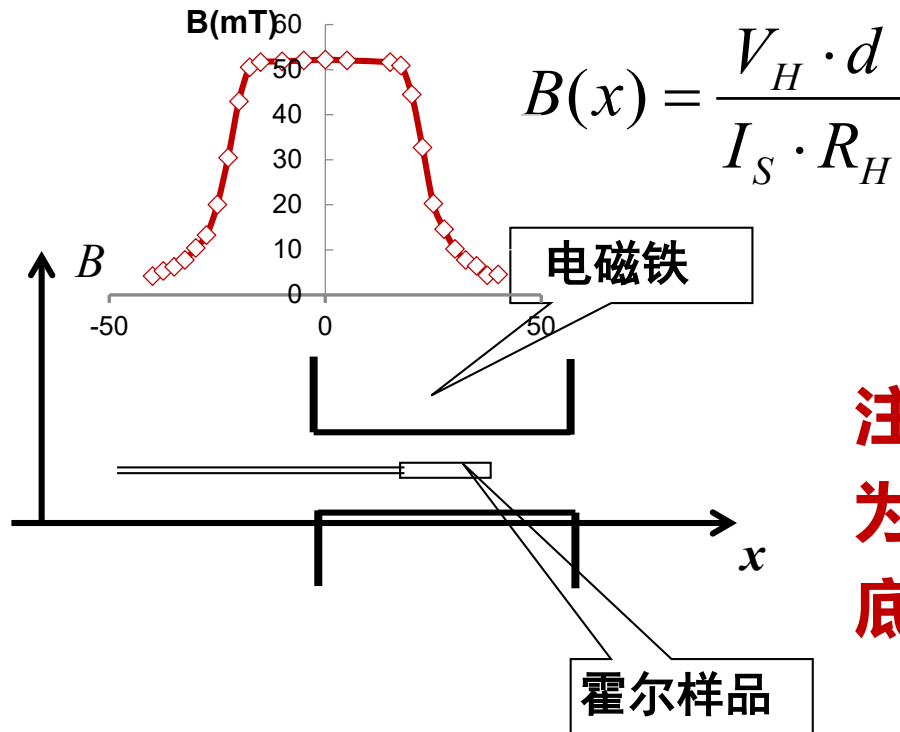
$I_s(\text{mA})$	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
$V_{\sigma}(\text{mV})$										



注意：切换开关到 V_{σ}

【拓展实验】要求至少选1个

1、C型电磁铁磁场横向分布曲线 ($B-x$) (如气隙中, 不限)



要求

1. 简述测量原理;
2. 设计表格测量并记录实验数据;
3. 作出 $B-x$ 曲线。
4. 分析实验结果

注意: 全部测完一组 V_1 , 将 I_M 调为0, “ I_S 调节” 旋钮逆时针旋到底, 切换开关再测 V_2 , 依次类推

思考: 霍尔片气隙中向右移动受阻, 如何测右测的磁场?

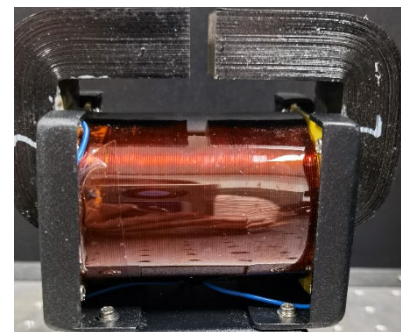
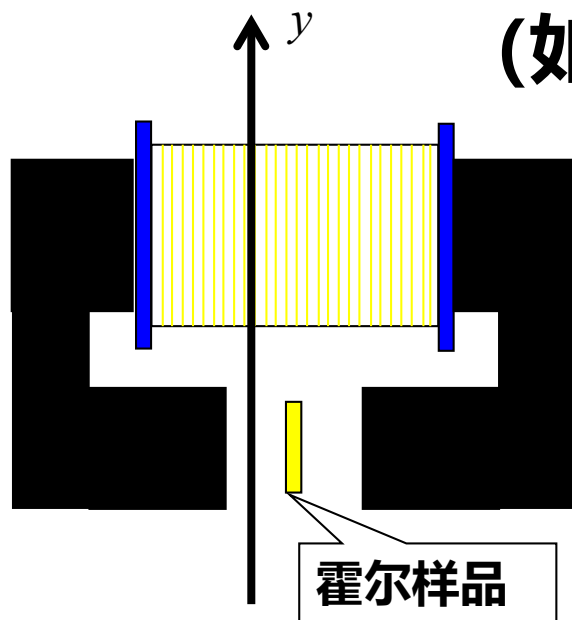
注意: 霍尔片在气隙中向右移动有受阻点, 不得用力移动

提示: 以电磁铁气隙中心位置标定为坐标原点

2、C型电磁铁磁场纵向分布曲线($B-y$)

(如气隙中, 不限) 要求同1

自由
发挥



电磁铁

注意：霍尔片在气隙中向下移动有受阻点，不得用力移动

思考：如何测量 y 方向对称的磁场分布？

参考表4/5 测量 V_H-x (or y) 关系

x/y (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)
	$+I_s, +B$	$+I_s, -B$	$-I_s, -B$	$-I_s, +B$	
..					
..					
0					
..					
..					

【注意事项】

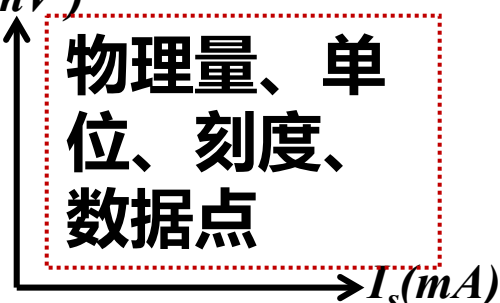
- 1、严格按电路图连接线路，经检查后方可打开试验仪电源开关
- 2、**开机和关机前，将 I_M 调为0，“ I_s 调节”旋钮逆时针旋到底；关机后再取下电源线（8根），切断开关**
- 3、**改变 I_s 或 I_M 方向时，将 I_M 调为0，“ I_s 调节”旋钮逆时针旋到底**
- 4、切换开关，注意握住绝缘手柄。
- 5、接头处不能虚接。
- 6、检查线路时要关掉电源。
- 7、实验完毕，整理仪器和实验桌保持整洁
1-3号做卫生

【数据处理】

1、绘制规范的 $V_H - I_S$ 特征曲线，用最小二乘法计算各曲线直线斜率，由此计算霍尔系数 R_H 和载流子浓度 n 。

$$R_H = \frac{V_H d}{C \cdot I_s \cdot I_M} \quad n = \frac{1}{R_H e}$$

C : 电磁铁的线圈常数 单位: mT/A
数据见电磁铁



2、绘制规范的 $V_H - I_M$ 特征曲线，用最小二乘法计算各曲线直线斜率，由此计算霍尔系数 R_H 和载流子浓度 n 。
(计算公式同上)

3、绘制规范的 $I_s - V_\sigma$ 特征曲线，用最小二乘法计算 $I_s - V_\sigma$ 直线斜率 k ，由此计算电导率 σ 和载流子的迁移率 μ 。

【数据处理】

$$\sigma = \frac{I_s}{V_\sigma} \cdot \frac{L}{S} = k \cdot \frac{L}{b \cdot d} \quad \mu = R_H \cdot \sigma$$

4、计算各间接测量量不确定度，进行结果表述

$$R_H = \left(\bar{R}_H \pm U_{R_H} \right) \quad n = \left(\bar{n} \pm U_n \right) \quad \sigma = \left(\bar{\sigma} \pm U_\sigma \right) \quad u = \left(\bar{u} \pm U_u \right)$$

5、分析误差，实验结果及预备问题

6、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

霍尔片尺寸：

$$L=12.00 \pm 0.02 \text{ mm} \quad b=3.00 \pm 0.02 \text{ mm} \quad d=0.350 \pm 0.004 \text{ mm}$$

工作电流方向 霍尔电压方向 磁场方向

【附1】最小二乘法

$$y = kx + b$$

中 k, b 如何求得?

$$b = \bar{y} - k\bar{x}$$

$$k = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

【附2】

几个间接测量量相对不确定度公式推导

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

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

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

霍尔片尺寸:

$$L = 12.00 \pm 0.02 \text{ mm} \quad b = 3.00 \pm \underline{0.02} \text{ mm} \quad d = 0.350 \pm \underline{0.004} \text{ mm}$$
$$\quad \quad \quad U_L \quad \quad \quad U_b \quad \quad \quad U_d$$

