

# 霍尔效应实验

## 一、实验简介

在磁场中的载流导体上出现横向电势差的现象是24岁的研究生霍尔（Edwin H. Hall）在1879年发现的，现在称之为霍尔效应。随着半导体物理学的迅猛发展，霍尔系数和电导率的测量已经称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、载流子浓度、载流子迁移率等主要参数。若能测得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。

在霍尔效应发现约100年后，德国物理学家克利青(Klaus von Klitzing)等研究半导体在极低温度和强磁场中发现了量子霍尔效应，它不仅可作为一种新型电阻标准，还可以改进一些基本产量的精确测定，是当代凝聚态物理学和磁学令人惊异的进展之一，克利青因此发现获得1985年诺贝尔物理学奖。其后美籍华裔物理学家崔琦(D. C. Tsui)和施特默在更强磁场下研究量子霍尔效应时发现了分数量子霍尔效应。它的发现使人们对宏观量子现象的认识更深入一步，他们因此发现获得了1998年诺贝尔物理学奖。

用霍尔效应制备的各种传感器，已广泛应用于工业自动化技术、检测技术和信息处理各个方面。本实验的目的是通过用霍尔元件测量磁场，判断霍尔元件载流子类型，计算载流子的浓度和迁移速度，以及了解霍尔效应测试中的各种负效应及消除方法。

## 二、实验原理

### 1. 通过霍尔效应测量磁场

霍尔效应装置如图1和图2所示。将一个半导体薄片放在垂直于它的磁场中(B的方向沿z轴方向)，当沿y方向的电极A、A'上施加电流I时，薄片内定向移动的载流子(设平均速率为u)受到洛伦兹力 $F_B$ 的作用。

$$F_B = q u B \quad (1)$$

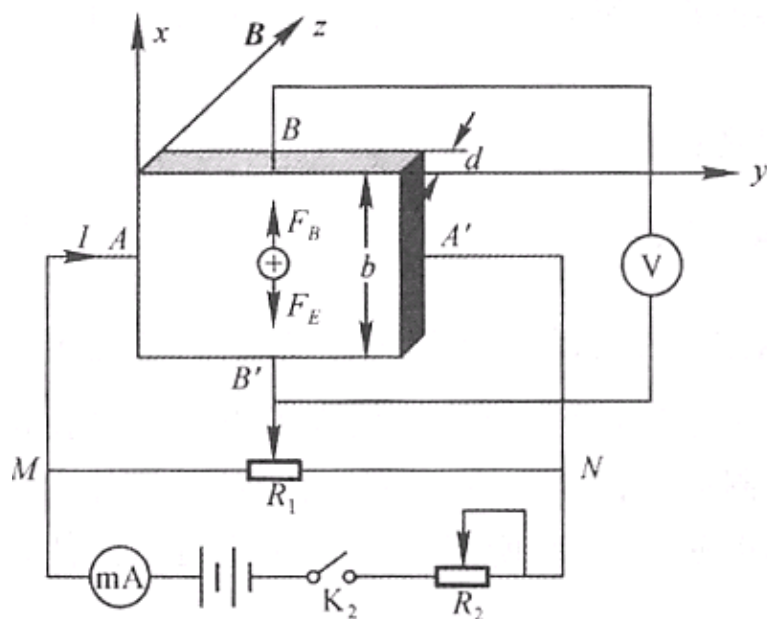


图1 实验装置图（霍尔元件部分）

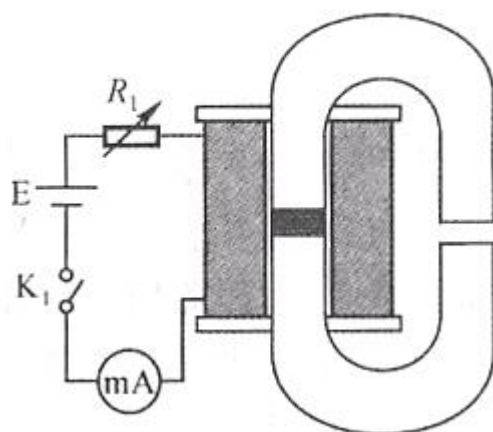


图2 电磁铁气隙中的磁场

无论载流子是负电荷还是正电荷， $F_B$ 的方向均沿着x方向，在洛伦兹力的作用下，载流子发生偏移，产生电荷积累，从而在薄片B、B'两侧产生一个电位差 $V_{BB'}$ ，形成一个电场E。电场使载流子又受到一个与 $F_B$ 方向相反的电场力 $F_E$ ，

$$F_E = qE = qV_{BB'}/b \quad (2)$$

其中b为薄片宽度， $F_E$ 随着电荷累积而增大，当达到稳定状态时 $F_E = F_B$ ，即

$$quB = qV_{BB'}/b \quad (3)$$

这时在B、B'两侧建立的电场称为霍尔电场，相应的电压称为霍尔电压，电极B、B'称为霍尔电极。

另一方面，设载流子浓度为n，薄片厚度为d，则电流强度I与u的关系为：

$$I = bdnqu \quad (4)$$

由(3)和(4)可得到

$$V_{BB'} = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} \quad (5)$$

令  $R_H = \frac{1}{nq}$  则

$$V_{BB'} = R_H \frac{IB}{d} \quad (6)$$

$R_H$ 称为霍尔系数，它体现了材料的霍尔效应大小。根据霍尔效应制作的元件称为霍尔元件。

在应用中，(6)常以如下形式出现：

$$V_{BB'} = K_H IB \quad (7)$$

式中  $K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{nqd}$  称为霍尔元件灵敏度， $I$ 称为控制电流。

由式(7)可见，若 $I$ 、 $K_H$ 已知，只要测出霍尔电压 $V_{BB'}$ ，即可算出磁场 $B$ 的大小；并且若知载流子类型(n型半导体多数载流子为电子，P型半导体多数载流子为空穴)，则由 $V_{BB'}$ 的正负可测出磁场方向，反之，若已知磁场方向，则可判断载流子类型。

由于霍尔效应建立所需时间很短( $10^{-12} \sim 10^{-14} \text{s}$ )，因此霍尔元件使用交流电或者直流电都可。使用交流电时，得到的霍尔电压也是交变的，(7)中的 $I$ 和 $V_{BB'}$ 应理解为有效值。

## 2. 霍尔效应实验中的负效应

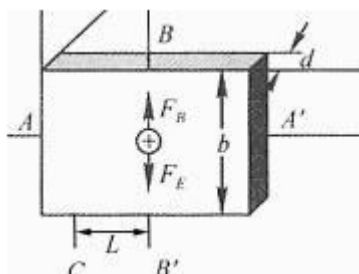
在实际应用中，伴随霍尔效应经常存在其他效应。例如实际中载流子迁移速率 $u$ 服从统计分布规律，速度小的载流子受到的洛伦兹力小于霍尔电场作用力，向霍尔电场作用力方向偏转，速度大的载流子受到磁场作用力大于霍尔电场作用力，向洛伦兹力方向偏转。这样使得一侧高速载流子较多，相当于温度较高，而另一侧低速载流子较多，相当于温度较低。这种横向温差就是温差电动势 $V_E$ ，这种现象称为爱廷豪森效应。这种效应建立需要一定时间，如果采用直流电测量时会给霍尔电压测量带来误差，如果采用交流电，则由于交流变化快使得爱廷豪森效应来不及建立，可以减小测量误差。

此外，在使用霍尔元件时还存在不等位电动势引起的误差，这是因为霍尔电极 $B$ 、 $B'$ 不可能绝对对称焊在霍尔片两侧产生的。由于目前生产工艺水平较高，不等位电动势很小，故一般可以忽略，也可以用一个电位器加以平衡(图-1中电位器 $R_1$ )。我们可以通过改变 $I_s$ 和磁场 $B$ 的方向消除大多数副效应。具体说在规定电流和磁场正反方向后，分别测量下列四组不同方向的 $I_s$ 和 $B$ 组合的 $V_{BB'}$ ，即

+B, +I	$V_{BB'}=V_1$
-B, +I	$V_{BB'}=-V_2$
-B, -I	$V_{BB'}=V_3$
+B, -I	$V_{BB'}=-V_4$

然后利用  $V_{BB'} = \frac{|V_1|+|V_2|+|V_3|+|V_4|}{4} = V_H$  得到霍尔电压平均值，这样虽然不能消除所有的负效应，但其引入的误差不大，可以忽略不计。

电导率测量方法如下图所示。设B'C间距离为L，样品横截面积为S=bd，流经样品电流为 $I_s$ ，在零磁场下，测得B'C间电压为 $V_{B'C}$ ，根据欧姆定律可以求出材料的电导率。电导率公式  $\sigma = (I_s \cdot L) / (V_{B'C} \cdot S)$ 。



### 三、实验内容

将测试仪上 $I_m$ 输出， $I_s$ 输出和 $V_H$ 输入三对接线柱分别与实验台上对应接线柱连接。打开测试仪电源开关，预热数分钟后开始实验。

1. 保持 $I_m$ 不变，取 $I_m=0.450A$ ， $I_s$ 取0.50, 1.00……, 4.50mA，测绘 $V_H-I_s$ 曲线，计算 $R_H$ 。
2. 保持 $I_s$ 不变，取 $I_s=4.50mA$ ， $I_m$ 取0.050, 0.100……, 0.450A，测绘 $V_H-I_m$ 曲线。
3. 在零磁场下，取 $I_s=0.1mA$ ，测 $V_{B'C}$ 。
4. 确定样品导电类型，并求载流子浓度n，迁移率 $\mu$ ，电导率 $\sigma(1/\Omega \cdot cm)$ 。

$$\sigma = \frac{I_s}{V_{B'C}} \cdot \frac{L}{b \cdot d}$$

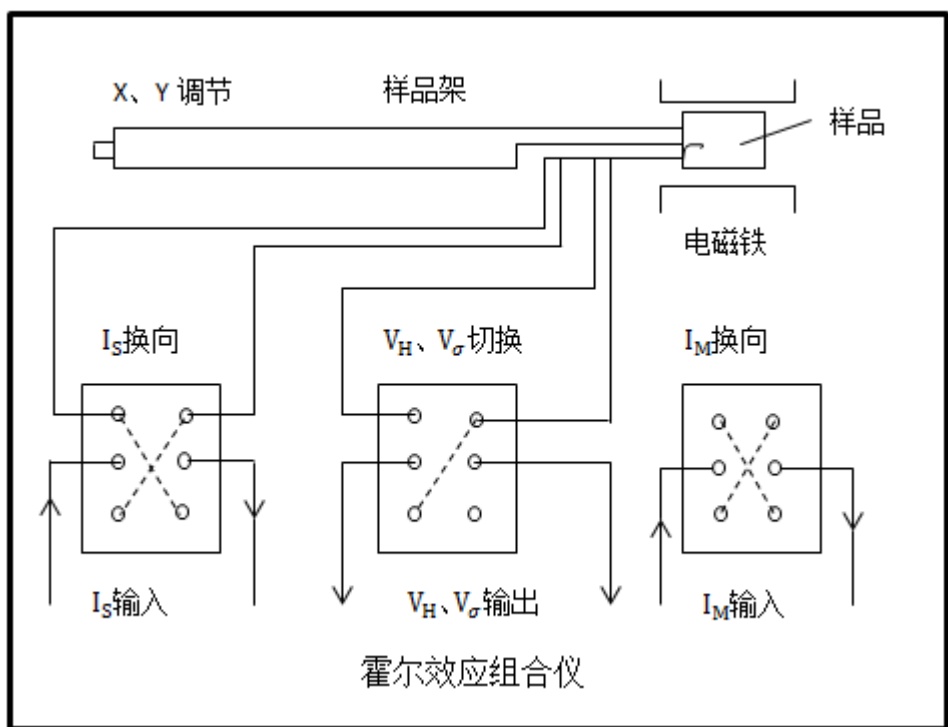
$$\mu = \frac{\sigma}{nq}$$

电子的迁移率，表示每秒钟每伏特电压下电子的运动范围大小。用来描述载流子在电场下运动的难易程度，其定义是：在弱电场作用下，载流子平均漂移速率与电场强度的比值。它的量纲是速度除以电场强度，常用的单位是 $cm^2/(V \cdot s)$ 。

### 四、实验仪器

QS-H霍尔效应组合仪，小磁针，测试仪。

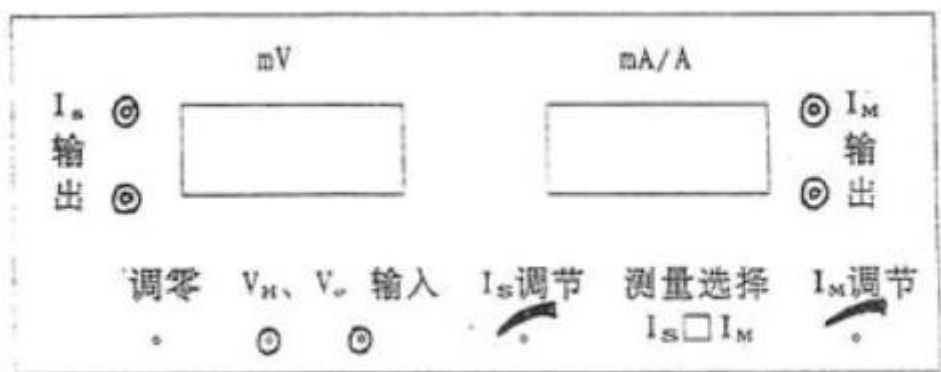
霍尔效应组合仪包括电磁铁，霍尔样品和样品架，换向开关和接线柱，如下图所示。



霍尔效应组合仪原理图

测量不等位电势和霍尔电压的双刀开关(上图中间的双刀开关), 左下和右上对角接线柱在仪器内部已连接好。

测试仪由励磁恒流源 $I_M$ , 样品工作恒流源 $I_S$ , 数字电流表, 数字毫伏表等组成, 仪器面板如下图:

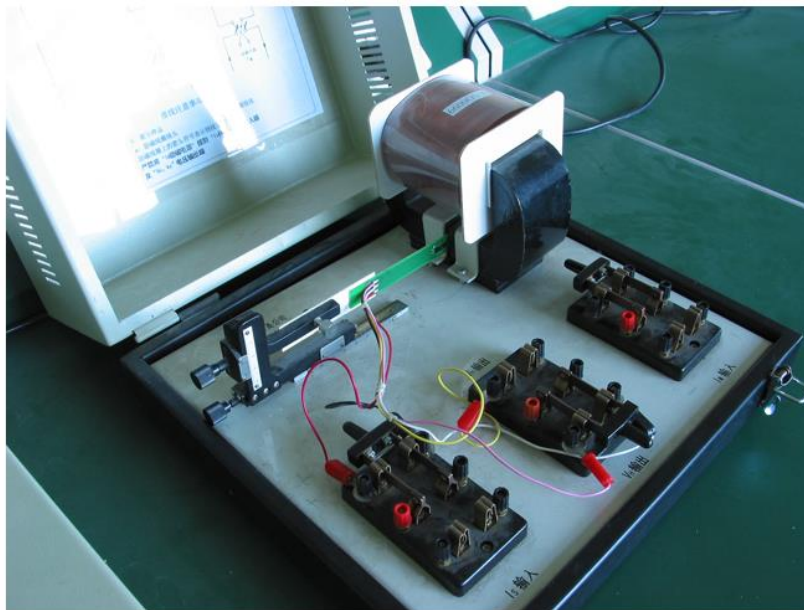


测试仪

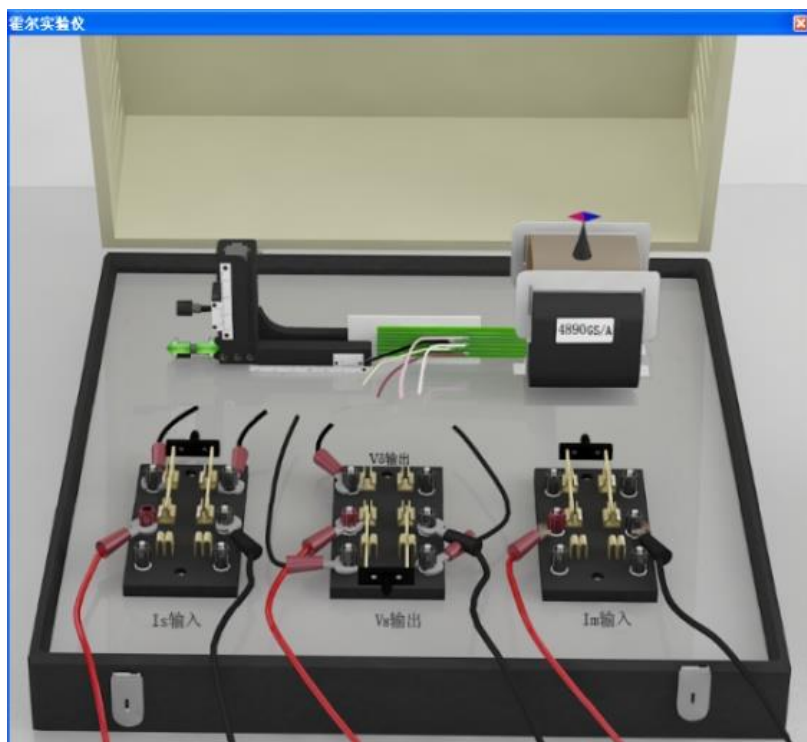
霍尔效应测试仪面板



本实验装置由QS-H型霍尔效应实验仪和QS-H型霍尔效应测试仪两大部分组成

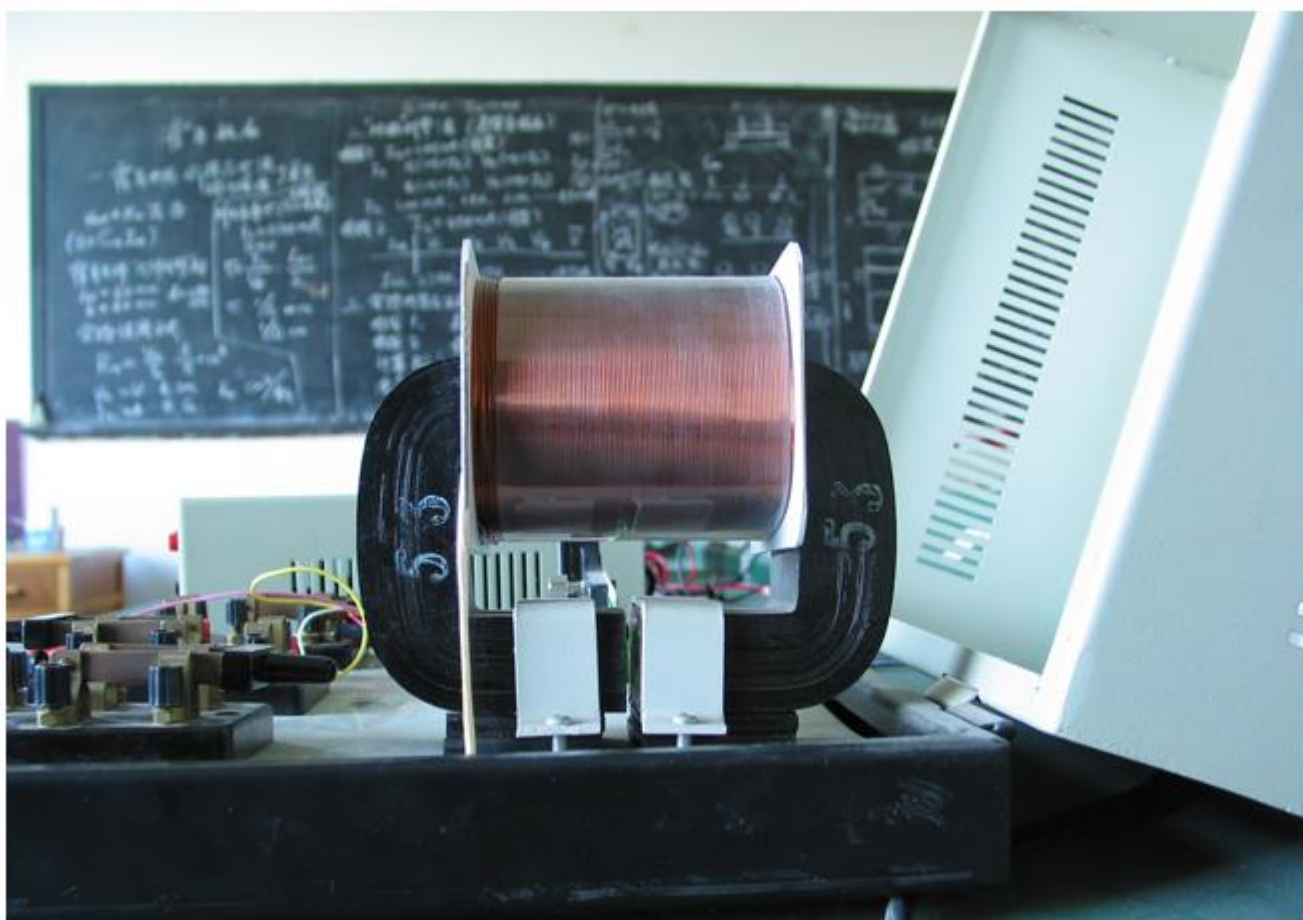


霍尔效应实验仪



霍尔效应实验仪仿真仪器

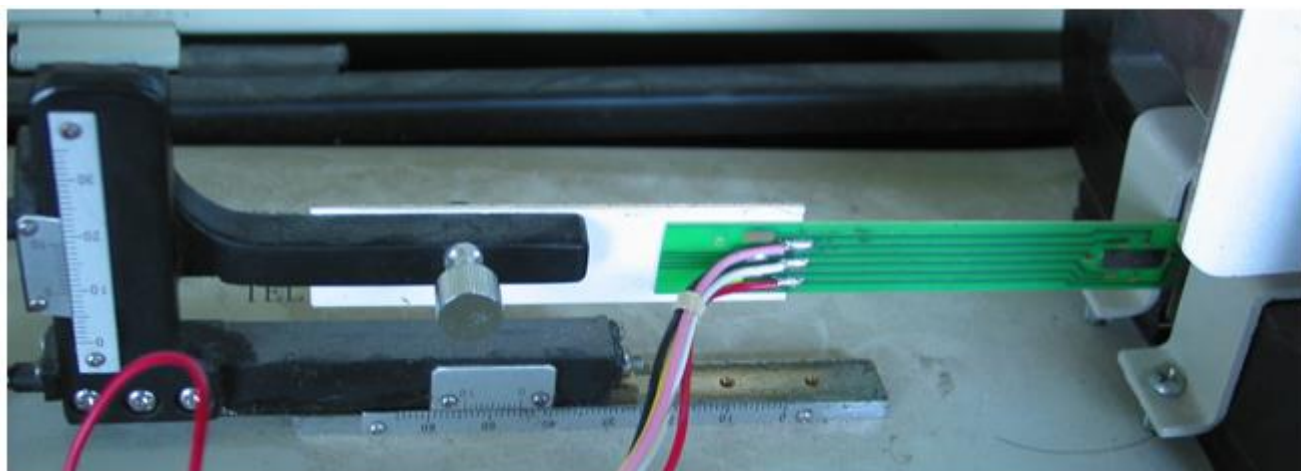
此实验仪为一组合仪器。由电磁铁、霍尔样品及调节架、双刀双掷开关构成。



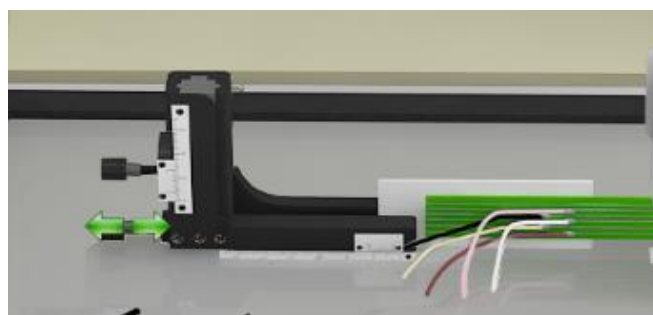
霍尔效应实验仪的部件之一：电磁铁



产生一个用霍尔效应来待测的磁场，实验者要保证霍尔样品要放入磁场的中心位置。



调节架实际仪器



调节架仿真仪器

样品通过调节架一定要使之处在磁场的中心位置上，否则会影响数据的准确性。霍尔片的水平和垂直位置有刻度可读。



QS-H型霍尔效应测试仪实际仪器





霍尔效应测试仪仿真仪器

用它来测量霍尔效应中霍尔电压、样品的不等位电势等参数。它由励磁恒流源、数字电流表、数字毫伏表、样品工作恒流源等构成。由于测试仪上的励磁电流、样品工作电流调节器为两个多圈电位器，容易损坏，在实验过程中调节时应不要太快，旋到尽头时忌继续用力，否则会造成仪器的损坏。

## 五、实验指导

### 实验重点、难点

1. 了解霍尔效应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”消除副效应影响；
3. 根据霍尔电压判断霍尔元件载流子类型，计算载流子的浓度和迁移速度。

### 辅助功能介绍

界面的右上角的功能显示框:当在普通实验状态下，显示实验实际用时、记录数据按钮、结束操作按钮；在考试状态下，显示考试所剩时间的倒计时、记录数据按钮、结束操作按钮、显示试卷按钮（考试状态下显示）。

右上角工具箱:各种使用工具，如计算器等。

右上角help和关闭按钮：**help**可以打开帮助文件，关闭按钮功能就是关闭实验。

实验仪器栏:存放实验所需的仪器，可以点击其中的仪器拖放至桌面，鼠标触及到仪器，实验信息提示栏会显示仪器的相关信息；仪器使用完后，则不允许拖动仪器栏中的仪器了。

提示信息栏:显示实验过程中的仪器信息，实验内容信息，仪器功能按钮信息等相关信息，按F1键可以获得更多帮助信息。

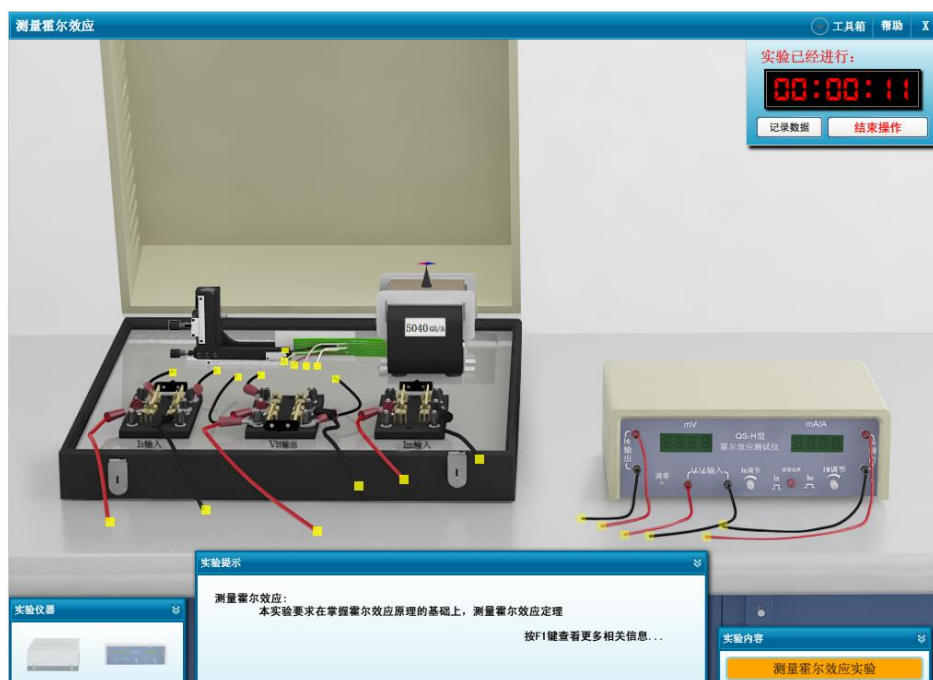
实验内容栏:显示实验名称和实验内容信息(多个实验内容依次列出)，当前实验内容显示为黄色，其他实验内容为蓝色；可以通过单击实验内容进行实验内容之间的切换。切换至新的实验内容后，实验桌上的仪器会重新按照当前实验内容进行初始化。

## 1. 主窗口

打开霍尔效应的仿真实验。

## 2. 正式开始实验

开始实验后，从实验仪器栏中点击拖拽仪器至实验台上。由于是电路仪器，所以无法移动。开始时实验仪器已经摆好在实验桌上。



实验主场景图

将实验仪器栏，实验提示栏和实验内容栏展开，将鼠标移至仪器各部分均会显示说明信息。双击其左上部系统菜单图标关闭仪器图片窗口，在实验仪器列表窗口双击其左上部系统菜单图标关闭之。



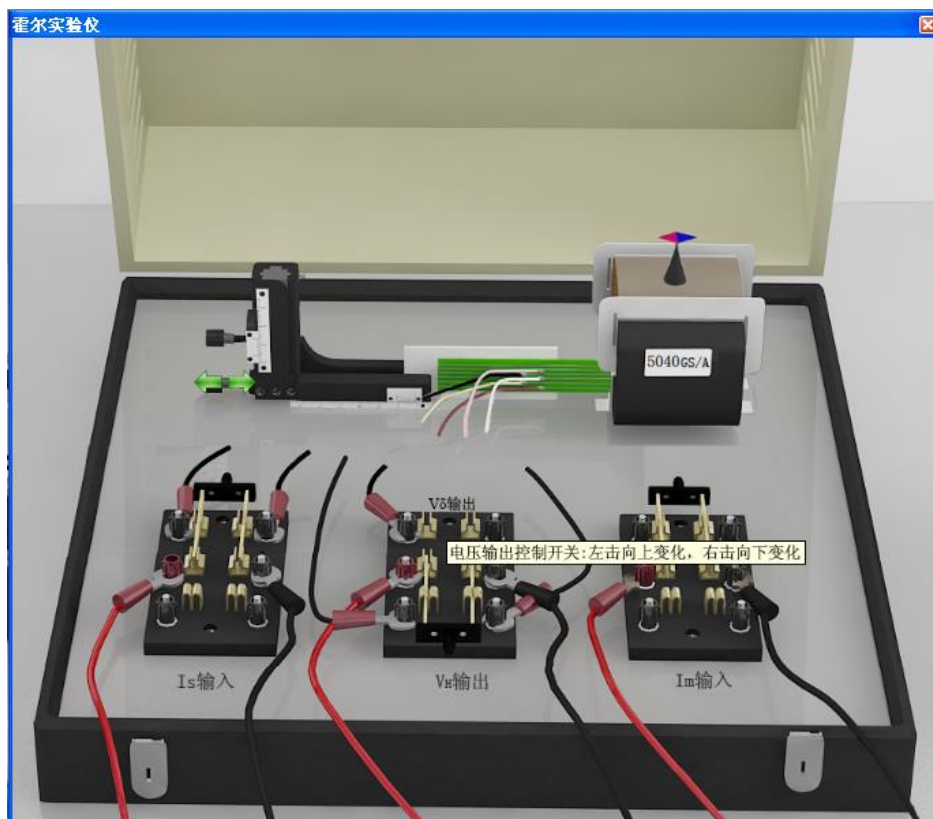
(1)霍尔效应测试仪

双击桌面上霍尔效应测试仪小图标，弹出霍尔效应测试仪的调节窗体；主要有两个显示的图面，一个为背景图主要是控制该仪器的电源的开关。正面图主要控制控制电流和励磁电流的输出大小，并测量返回的电压大小。该仪器每次开启电源时会产生误差，需要手动去校准。



## (2) 霍尔效应测试仪显示

双击桌面上霍尔效应测试仪图标，弹出霍尔效应测试仪的调节窗体。初始化时霍尔效应测试仪上的开关位置是按照标准形式放置的，3个开关能随意拨动，也能改变霍尔元件片在磁场中的位置。



$I_s$ 控制电流的最大量程为20mA，最小测量单位为0.01mA。可以通过点击调节控制电流旋钮来逆时针或顺时针旋转改变控制电流大小。当鼠标按住选择不放，则会不停的改变控制电流的大小(当达到显示最大值时显示值不变)，直到鼠标松开（励磁电流同控制电流相同）。打开开关之后一定要校准，并调节 $I_s$ 调节和 $I_m$ 调节使显示电流值随着调节变化而变化。



### (3)连接电路

关闭电源，将霍尔效应测试仪和霍尔效应测试仪按照正确的连接方式连接到同一电路中，并对霍尔测试仪和霍尔效应测试仪均做调零处理，如果不处理，则可能使其测试结果不正确。

### (4)调零并测试

打开测试仪的电源开关。点击调零旋钮。将左侧显示的电压值调节到0.00；并按照实验的要求连接好电路，在电路的连接过程中需要注意的是电路之间接点的连接问题，连接正确后才会显示正常的电路，否则会提示放置错误。连接好线路图后按照实验要求做实验，直到实验结束。

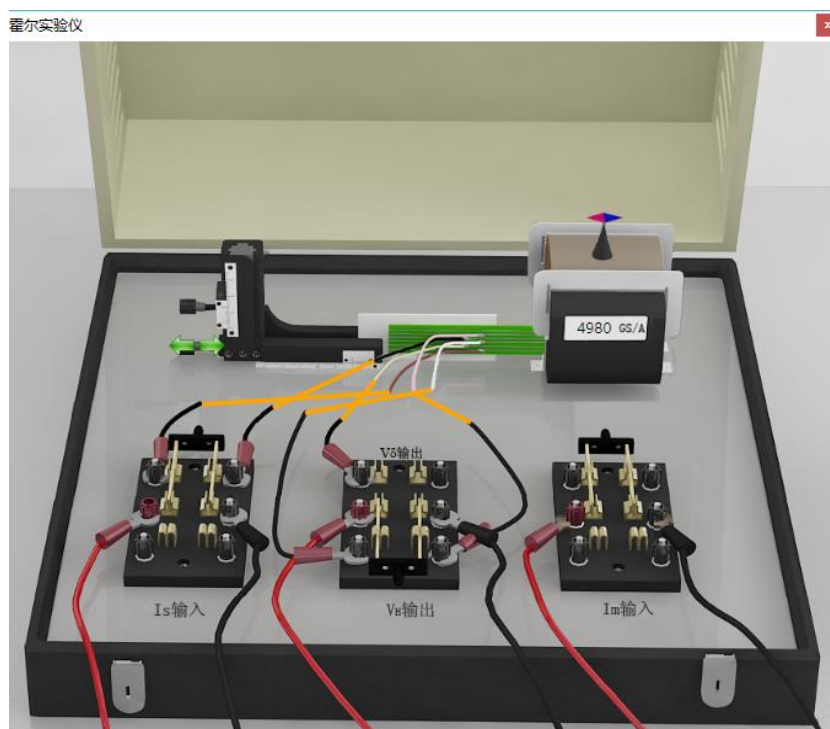


(5)完成实验。按照实验内容中的要求完成实验。多做几次测量，并得到最终的平均结果值。

电导率是通过测量不等位电动势后根据公式计算得到。

其他的相关参数也是根据上面的公式计算得到的。

样品的导电类型是根据小磁针的偏转来判断的，蓝色为S极，红色为N极。



(6)测试完成后，保存数据，单击记录数据按钮弹出记录数据页面。

在记录数据页面的相应地方填写实验中的测量数据，点击关闭按钮，则暂时关闭记录数据页面；再次点击记录数据按钮会显示记录数据页面。



实验数据表格

(1) 按霍尔效应实验原理图, 正确连线

(2) 调节霍尔元件片使其置于磁场最大处

(3) 在零磁场下, 测量霍尔元件片的不等位电势

(4) 保持励磁电流的值不变, 改变工作电流的值, 测量霍尔电压值

(5) 保持工作电流的值不变, 改变励磁电流的值, 测量霍尔电压值

(6) 计算霍尔效应系数 $R_H$ , 霍尔元件的载流子浓度 $n$ , 霍尔元件的电导率 $\sigma$ , 霍尔元件的载流子迁移率 $\mu$

连线

将电路连接好, 然后点击按钮保存连线状态。

完成操作请点击按钮确认

确定状态

在零磁场下测量感应电动势 $V_0$ 的值

在零磁场下当 $I_s=0.1\text{mA}$ 时产生的感应电动势 $V_0$

$I_s/\text{mA}$	$V(+I_s)$	$V(-I_s)$
$I_s=0.1\text{mA}$		

测量霍尔电压: 电路连接成功后, 保持电路中的励磁电流 $I_m=0.45\text{A}$ , 令控制电流 $I_s$ 从 $0.5\text{mA}$ 增加到 $4.5\text{mA}$ , 每隔 $0.5\text{mA}$ 测量相应的霍尔电压值。

保持此时励磁电流的大小不变, 调节控制电流每次变化 $0.5\text{mA}$ , 记录显示的电压值

$I_s/\text{mA}$	$V(+I_m, +I_s)$	$V(-I_m, +I_s)$	$V(+I_m, -I_s)$	$V(-I_m, -I_s)$
$I_s=0.5\text{mA}$				

关闭

## 六、思考题

1. 若磁场不恰好与霍尔元件片的法线一致, 对测量结果有何影响, 如何用实验方法判断 $B$ 与元件法线是否一致?
2. 能否用霍尔元件片测量交变磁场?

## 七、参考资料

1. 《大学物理实验》第二册, 谢行恕, 霍剑青, 康士秀主编, 高等教育出版社, 2001