

# 北京邮电大学 物理实验报告

班号 2021211314 姓名 李永琰 学号 2021211353 实验日期 2022.03.22

## 实验名称 霍尔效应实验

### 实验目的:

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。

实验原理与操作步骤[基本物理思想、实验设计原理、物理公式及其意义、电路图(光路图)等; 主要操作步骤]

### 实验原理:

#### 1. 通过霍尔效应测量磁场

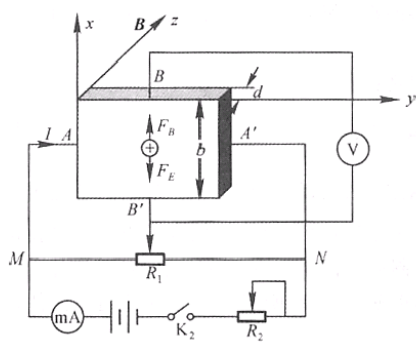


图1 实验装置图 (霍尔元件部分)

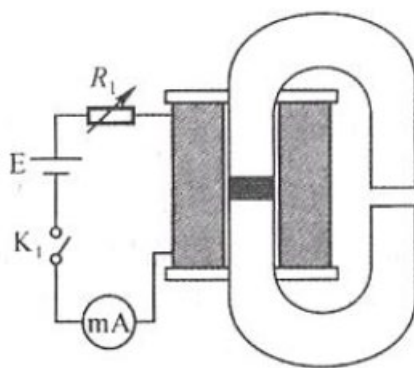


图2 电磁铁气隙中的磁场

霍尔效应装置如图1和图二所示。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。

$$F_B = q u B$$

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 $F_E$ ,

$$F_E = q E = q V_{BB'} / b$$

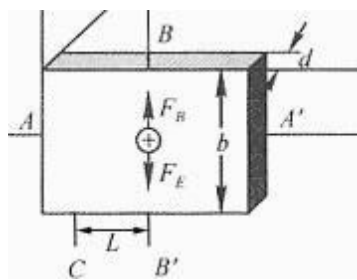
其中b为薄片宽度,  $F_E$ 随着电荷积累而增大, 当达到稳定状态时 $F_E = F_B$ , 即

$$q u B = q V_{BB'} / b$$

这时在B、B'两侧建立的电场成为霍尔电场, 相应大电压成为霍尔电压, 电极B、B'成为霍尔电极。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:

$$I = b d n q u$$

有上述各式得到		
$V_{BB'} = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} = R_H \frac{IB}{d}$		
$R_H$ 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成为霍尔元件。		
$K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{nqd}$		
$K_H$ 为霍尔元件灵敏度		
由此，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型半导体载流子多为电子，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（ $10^{-12} \sim 10^{-14}s$ ），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。		
<b>2. 霍尔效应实验中的负效应</b>		
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 $R_i$ ）。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>+B, +I</b>	$V_{BB'}=V_1$
	<b>-B, +I</b>	$V_{BB'}=-V_2$
	<b>-B, -I</b>	$V_{BB'}=V_3$
	<b>+B, -I</b>	$V_{BB'}=-V_4$
然后利用 $V_{BB'} = \frac{ V_1 + V_4 + V_3 + V_2 }{4}$ 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 $\sigma = (I_s L)/(V_{B'C} S)$ 。		



### 操作步骤：

0.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 $\sigma$  ( $1/\Omega \cdot cm$ )。

### 以上为预习内容

### 实验仪器名称：

QS-H 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)、小磁针、测试仪

### 实验数据记录

#### 一、在零磁场下测量 $V_\sigma$ 的值：

在零磁场下，当  $I_s=0.1mA$  时，霍尔元件上 DE 之间的电势差 $V_\sigma$  (单位:mV) 15.07；

记录霍尔片参数： L(DE 之间距离)= 2.976mm，宽  $b=$  3.968mm，厚度  $d=$  0.4996mm。

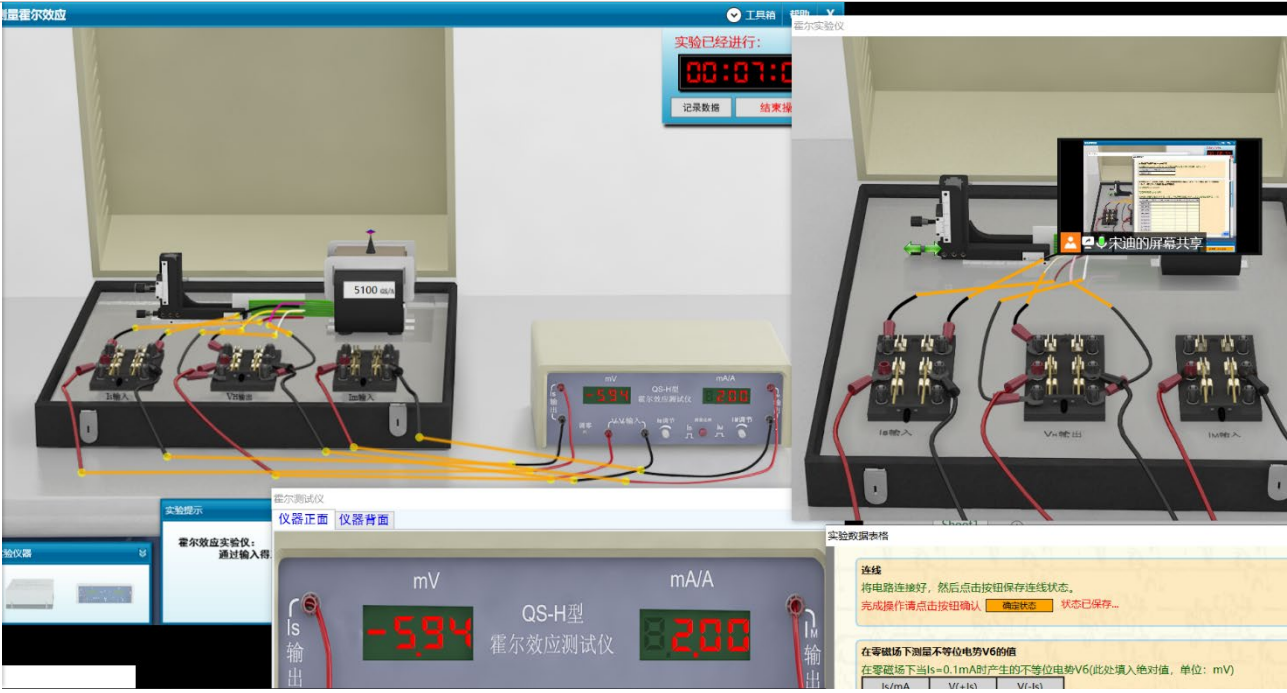
二、测量霍尔元件的 $V_H-I_s$  特性曲线：移动霍尔元件片使其处于磁场最大处。保持电路中的励磁电流  $I_m=0.45A$  不变，调节工作电流  $I_s$  从 0.5 mA 增加到 4.5mA，每隔 0.5mA 测量相应的霍尔电压值 $V_H$  (单位：mV)。

此时励磁电流大小  $I_m=$  0.45 (A)，励磁线圈的系数： $\mu_m \cdot n =$  5100 (Gs/A)，计算电磁线圈的磁场大小为  $B=\mu_m \cdot n \cdot I_m=$  0.2295 (T)。注：1T= $10^4$  Gs

$I_s/mA$	$V(+I_m, +I_s)$	$V(-I_m, +I_s)$	$V(+I_m, -I_s)$	$V(-I_m, -I_s)$	$V_H$
$I_s=0.5mA$	<u>-1.50</u>	<u>1.49</u>	<u>1.48</u>	<u>-1.47</u>	<u>1.485</u>
$I_s=1.0mA$	<u>-2.99</u>	<u>2.98</u>	<u>2.97</u>	<u>-2.96</u>	<u>2.975</u>
$I_s=1.5mA$	<u>-4.48</u>	<u>4.47</u>	<u>4.46</u>	<u>-4.45</u>	<u>4.465</u>
$I_s=2.0mA$	<u>-5.97</u>	<u>5.96</u>	<u>5.95</u>	<u>-5.94</u>	<u>5.955</u>

$I_s=2.5\text{mA}$	<u>-7.46</u>	<u>7.45</u>	<u>7.44</u>	<u>-7.46</u>	<u>7.445</u>
$I_s=3.0\text{mA}$	<u>-8.94</u>	<u>8.94</u>	<u>8.93</u>	<u>-8.92</u>	<u>8.932</u>
$I_s=3.5\text{mA}$	<u>-10.44</u>	<u>10.43</u>	<u>10.42</u>	<u>-10.41</u>	<u>10.42</u>
$I_s=4.0\text{mA}$	<u>-11.92</u>	<u>11.91</u>	<u>11.91</u>	<u>-11.90</u>	<u>11.91</u>
$I_s=4.5\text{mA}$	<u>-13.41</u>	<u>13.40</u>	<u>13.40</u>	<u>-13.39</u>	<u>13.40</u>

实验过程截图贴至此处（包括实验装置连线图，实验时间，电流表、电压表对应上表中任意1次的测量值）



三、测量霍尔元件的 $V_H$ —  $I_m$  曲线：移动霍尔片使其处于磁场最大处。保持电路中的工作电流  $I_s=4.5\text{mA}$  不变, 调节励磁电流  $I_m$  从 0.05 A 增加到 0.45A, 每隔 0.05A 测量相应的霍尔电压值（单位：mV）。

此时工作电流大小  $I_s=$  4.5 (mA)。

	$V(+I_m, +I_s)$	$V(-I_m, +I_s)$	$V(+I_m, -I_s)$	$V(-I_m, -I_s)$	$V_H$
$I_m = 0.05\text{A}$	<u>-1.37</u>	<u>1.36</u>	<u>1.37</u>	<u>-1.36</u>	<u>1.365</u>
$I_m = 0.10\text{A}$	<u>-2.88</u>	<u>2.87</u>	<u>2.88</u>	<u>-2.87</u>	<u>2.875</u>
$I_m = 0.15\text{A}$	<u>-4.38</u>	<u>4.37</u>	<u>4.38</u>	<u>-4.37</u>	<u>4.375</u>
$I_m = 0.20\text{A}$	<u>-5.89</u>	<u>5.88</u>	<u>5.88</u>	<u>-5.87</u>	<u>5.880</u>
$I_m = 0.25\text{A}$	<u>-7.39</u>	<u>7.38</u>	<u>7.38</u>	<u>-7.37</u>	<u>7.380</u>
$I_m = 0.30\text{A}$	<u>-8.90</u>	<u>8.89</u>	<u>8.89</u>	<u>-8.88</u>	<u>8.890</u>
$I_m = 0.35\text{A}$	<u>-10.40</u>	<u>10.39</u>	<u>10.39</u>	<u>-10.38</u>	<u>10.39</u>
$I_m = 0.40\text{A}$	<u>-11.91</u>	<u>11.90</u>	<u>11.89</u>	<u>-11.88</u>	<u>11.89</u>
$I_m = 0.45\text{A}$	<u>-13.41</u>	<u>13.40</u>	<u>13.40</u>	<u>-13.39</u>	<u>13.40</u>

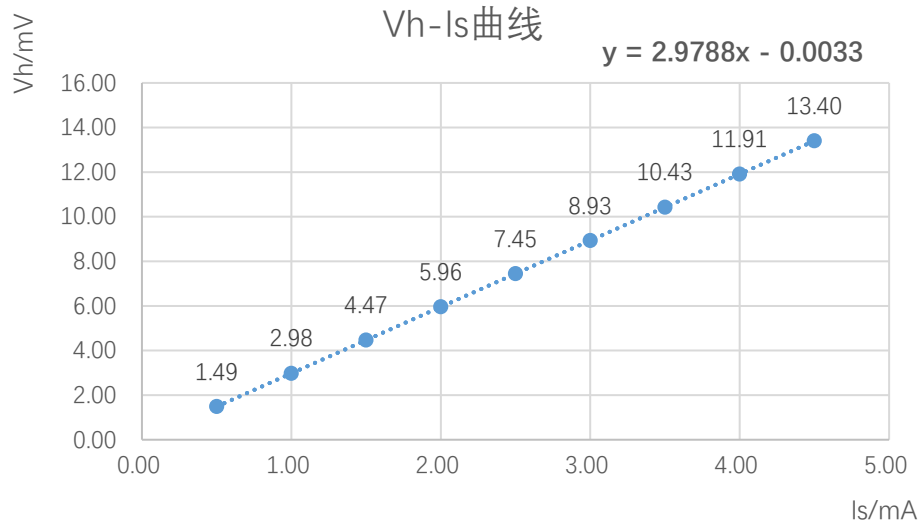
四、判断霍尔元件的载流子类型（请填 P 或 N） N 型（选做，自行设计实验步骤）

五、数据处理要求：

1. 计算材料的电导率  $\sigma = \frac{I_s \times L}{V_\sigma \times b \times d}$ ;

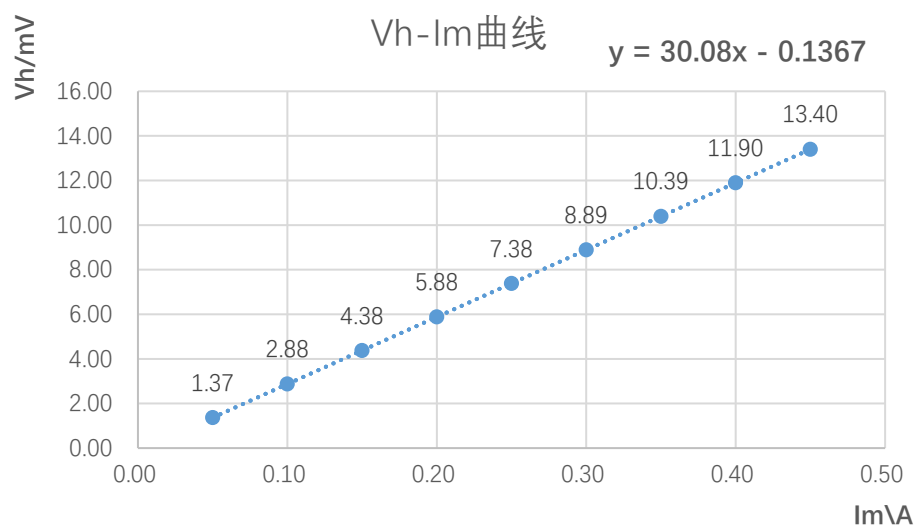
$$\sigma = \frac{I_s \times L}{V_\sigma \times b \times d} = \frac{0.1 \times 0.002976}{15.07 \times 0.003968 \times 0.0004996} = 9.9615(1/\Omega \cdot m)$$

2. 绘制霍尔元件的  $V_H$ — $I_s$  曲线，图解法求出斜率，计算霍尔元件灵敏度  $K_H = \frac{V_H}{I_s \times B}$ ;



$$K_H = \frac{V_H}{I_s \times B} = k \times \frac{1}{B} = 2.9788 \times \frac{1}{0.2295} = 12.98(V/(A \times T))$$

3. 绘制霍尔元件的  $V_H$ — $I_m$  曲线，并讨论；



由上述两图可知， $V_H$ 与 $I_s$ 成正比关系， $V_H$ 与 $I_m$ 成正比关系，且 $I_m$ 和B成正比，因此我们能够推出 $V_H = k \cdot IB$  (其中k为比例系数)

4. 计算霍尔元件的载流子浓度  $n = \frac{1}{K_H d q}$ 。(选做)

$$n = \frac{1}{K_H dq} = \frac{1}{12.98 \times 0.0004996 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 0.9735(\times 10^{21}/m^3)$$

回答问题：

1. 为什么霍尔元件要选用半导体材料制作？为什么霍尔元件通常做成薄片状？

霍尔效应是磁敏效应。霍尔系数的大小也决定霍尔效应的明显程度。已知霍尔灵敏度  $K_H = \frac{1}{nqd}$ ，若载流子密度  $n$  较大时，霍尔灵敏度  $K_H$  比较小，则发生霍尔效应不明显。由于金属材料的载流子密度较大，而半导体的载流子密度比金属要小得多，为了让霍尔效应更明显所以选择半导体材料制作霍尔元件。同样根据上述公式，当霍尔元件的厚度  $d$  越小，则霍尔灵敏度  $K_H$  越大，霍尔效应越明显。故霍尔元件通常做成薄片状。

2. 如何判断实验中所用的霍尔元件是 N 型还是 P 型半导体材料？

(1) 当  $I_S$  和  $I_m$  都为正值时，霍尔电压为正则为 P 型，反之为 N 型；

(2) N 型半导体材料的载流子迁移率比 P 型半导体材料高的多。