

# 光栅衍射实验报告

江灿 2019011325

清华大学 物理系, 北京 100084

**【摘要】** 霍尔效应是电磁效应的一种, 这一现象是美国物理学家霍尔 (E.H.Hall, 1855—1938) 于 1879 年在研究金属的导电机理时发现的。当电流垂直于外磁场通过半导体时, 载流子发生偏转, 垂直于电流和磁场的方向会产生一附加电场, 从而在半导体的两端产生电势差, 这一现象就是霍尔效应, 这个电势差也被称为霍尔电势差。霍尔效应在应用技术中特别重要。根据霍尔效应做成的霍尔器件, 就是以磁场为工作媒体, 将物体的运动参量转变为数字电压的形式输出, 使之具备传感和开关的功能。

**【关键词】** 霍尔效应, 副效应, 磁阻测量

## 1 实验目的

略

## 2 实验仪器

略

## 3 实验原理

略

## 4 实验步骤

略

## 5 实验数据

### 5.1 $U_H$ 与 $I$ 关系及 $K_H, R_H, n$ 的计算

由实验室提供的表格查得  $I_M=500\text{mA}$  时,  $B_0=123.7\text{mT}$  由实验所测得数据制作的  $U_H - I$  关系曲线如图

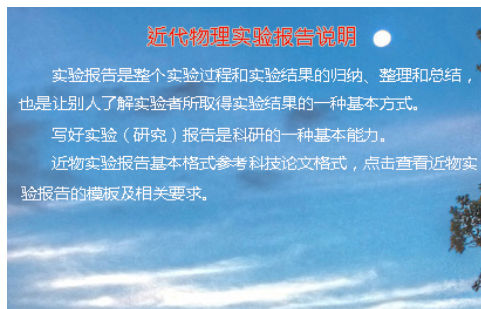


图 1  $U_H=I$

可见,  $U_H, I$  成线性关系.

直线斜率  $k=23.30714275$ , 相关系数  $r=0.9999901842$

由  $U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$ , 故  $k = \frac{R_H B}{d} = K_H$ , 所以有

$$R_H = \frac{kd}{B} = \frac{23.30714275 \times 3 \times 10^{-6}}{123.7 \times 10^{-3}} \approx 5.65239 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m} / T$$

$$K_H = \frac{k}{B} = 188.4156 \Omega / T$$

$$\delta k = S_K = k \sqrt{\frac{1}{n-2}} \approx 0.04607 \Omega$$

$$\delta R_H = \frac{d}{B} \delta k \approx 1.1 \times 10^{-6} \Omega \cdot m / T$$

$$\delta K_H = \frac{1}{B} \delta K \approx 0.4 \Omega / T$$

故

$$R_H = (5.653 \pm 0.011) \times 10^{-4} \Omega \cdot m / T$$

$$K_H = (188.4 \pm 0.4) \Omega / T$$

又  $R_H = \frac{1}{ne}$ , 故

$$n = \frac{1}{R_H e} = 1.1031 \times 10^{22} m^{-3}$$

$$\delta n = \frac{\delta R_H}{R_H^2 e} \approx 2.1 \times 10^{19} m^{-3}$$

故

$$n = (1.1031 \pm 0.0021) \times 10^{22} m^{-3}$$

不等位效应  $U_0$  的确定: 由实验原理  $U = f(U_H, U_E, U_N, U_R, U_O, U_S)$ ,  $f$  表示求和, 式中  $U_E$  很小可略去, 故  $U = f(U_H, U_E, U_N, U_R, U_O, U_S) = U_H + U_N + U_R + U_P + U_S$

不妨设  $+B, +I$  的条件下参与求和的各电压均取正值

由于  $U_H$  正负与  $I, B$  方向有关,  $U_N, U_R$  正负只与  $B$  方向有关,  $U_O$  方向只与  $I$  方向有关,  $U_S$  与  $I, B$  无关, 故

$$U_1(+B, +I_H) = f(U_H, U_N, U_R, U_O, U_S)$$

$$U_2(+B, +I_H) = f(-U_H, U_N, U_R, -U_O, U_S)$$

$$U_3(+B, +I_H) = f(U_H, -U_N, -U_R, -U_O, U_S)$$

$$U_4(+B, +I_H) = f(-U_H, -U_N, -U_R, U_O, U_S)$$

所以

$$\frac{1}{4}(U_1 + U_3 - U_2 - U_4) = U_H$$

$$\frac{1}{4}[(U_1 - U_2) - (U_3 - U_4)] = U_O$$

故

$$U_O = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 - U_3 + U_4)$$

现将实验 1 中各结果整理如下

$$R_H = (5.653 \pm 0.011) \times 10^{-4} \Omega \cdot m / T, K_H = (188.4 \pm 0.4) \Omega / T$$

$$n = (1.1031 \pm 0.0021) \times 10^{22} m^{-3}, U_O = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 - U_3 + U_4)$$

## 5.2 标定 $I_M$ 与 $B$ 的关系

有实验数据可得

$$B = \frac{U_H}{K_H I}, I = 4.00 mA, K_H = 188.4 \Omega / T$$

由此可作出  $B-I_M$  曲线,

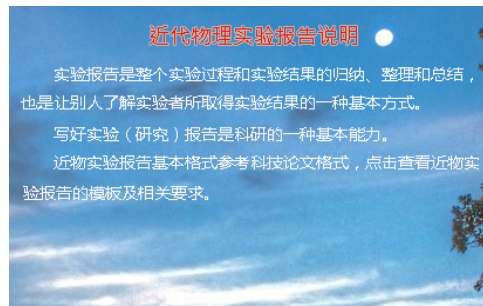


图 2  $B-I_M$

由曲线可以看出  $B$  与  $I_M$  成线性 (基本为正比) 关系, 这与理论相符. 用计算器可求得拟合直线的方程:

$$B = 0.4065 + 0.2472 I_M$$

$I_M$  的单位为  $mA$ ,  $B$  单位为  $mT$ . 相关系数  $r = 0.99999243$

## 5.3 铽化镧磁阻器件的磁电阻效应

由实验数据整理得

$$R(B) = \frac{U_{CD}}{I}, I = 1.50 mA,$$

$$\delta R = R(B) - R(O), B = 0.4065 + 2472 I_M (mT)$$

由此可绘出  $\delta R/R(O)$   $B$  的关系曲线

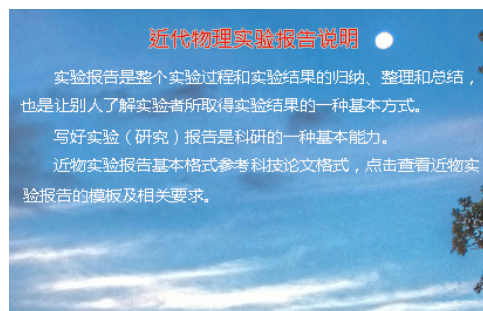


图 3  $\delta R/R(O)$   $B$

由曲线走势进行如下回归分析:

取前六点进行二次回归, 有

$$\delta R/R(O) = 0.0803 B^2 + 1.2452 B - 5.0797, r^2 = 0.9991$$

$$n = (1.1031 \pm 0.0021) \times 10^{22} m^{-3}, U_O = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 - U_3 + U_4)$$

取后六点进行线性回归, 有

$$\delta R/R(O) = 2.9426B + 414.32, r^2 = 0.9989$$

相关程度较高

于是在磁场较弱时,  $\delta R/R(O)$  与  $B$  有着二次函数的关系, 曲线为抛物线. 磁场较强时,  $\delta R/R(O)$  存在线性关系, 曲线为直线.

抛物线与直线间光滑过渡. 与原理中部分内容符合较好

#### 5.4 磁极间隙水平方向磁场的分布曲线

由实验数据整理得:

$$B = \frac{U_H}{K_H I}, I = 4.00mA, K_H = 1.884\Omega/T$$

实验时的励磁电流  $I_M = 500mA$  由此可作出实验曲线

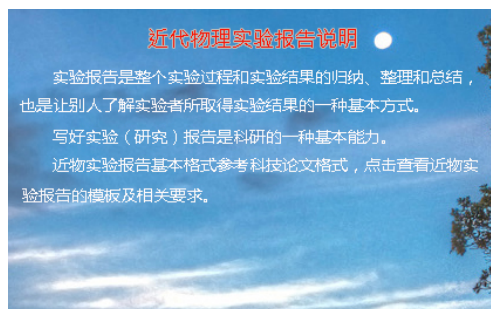


图 4 B X

曲线有对称性, 对称轴大致在气隙中心位置. 从曲线中可以看出, 随着  $x$  的增大,  $B$  先是逐渐增大到某个值, 在一定范围内保持恒定, 然后又逐渐减小. 增加的速度先慢后快, 后由快变慢. 下降的速度亦然.

从曲线中可以看出, 电磁铁气隙中心的磁场为均匀磁场, 且磁感应强度最大.

#### 5.5 判断载流子类型

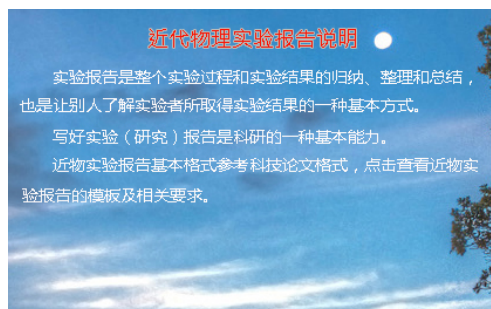


图 5 载流子

电流方向如图中标示. 由左手定则, 不管载流子是电子和空穴, 均会发生向下的偏转. 有由于 3 端的电势低, 故发生偏转的是电子. 也即载流子为电子

#### 5.6 霍尔片中载流子的迁移率 $\mu$

$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{v}{J/\sigma} = \sigma \frac{v}{nevbd/(bd)} = \frac{\sigma}{ne} = \sigma R_H$$

故欲测  $\mu$  即是要测霍尔片的电导率  $\sigma$

$$\text{又因为电阻 } R = \frac{U_{cd}}{I} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{bd}$$

故

$$\sigma = \frac{L}{bd} \frac{I}{U_{cd}}, I = \frac{\sigma bd}{l} U_{cd}$$

可见由  $I - U_{cd}$  的曲线的斜率可求出  $\sigma$

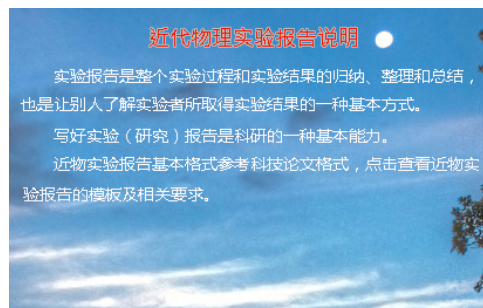


图 6 载流子

所做图像如图, 回归直线方程:  $I = -0.1041 + 1.0935U_{cd}$   $r = 0.99965$  故斜率  $k = 1.0935mA/V$

$$\delta k \approx S_K = k \sqrt{\frac{1/r^2 - 1}{n - 2}} \approx 0.010935mA/V$$

$$k = \frac{\sigma bd}{l}$$

$$\sigma = \frac{kl}{bd} \approx 1093.5S/m$$

$$\delta \sigma = \frac{l}{bd} \delta k \approx 11S/m$$

$$\sigma = (1094 \pm 11)S/m$$

$$\mu = \sigma R_H = 0.618438T^{-1}$$

$$\ln \mu = \ln \sigma + \ln R_H$$

$$\frac{\partial \ln \mu}{\partial \sigma} = \frac{1}{\sigma}, \frac{\partial \ln \mu}{\partial R_H} = \frac{1}{R_H}$$

$$\frac{\delta \mu}{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\delta \sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\delta R_H}{R_H}\right)^2} = 1.0241 \times 10^{-2}$$

$$\delta \mu = \mu \frac{\delta \mu}{\mu} \approx 6 \times 10^{-3} T^{-1}$$

$$\mu = (0.618 \pm 0.006) T^{-1}$$

- (1) 变量符号、变动附标及函数。
- (2) 用字母表示的数及代表点、线、面、体和图形的字母。
- (3) 特征数符号, 如 **Re** (雷诺数)、**Fo** (傅里叶数)、**Al** (阿尔芬数) 等。

(4) 在特定场合中视为常数的参数。

5.12.2 正体外文字母用于表示名称及与其有关的代号, 主要用于下列场合

- (1) 有定义的已知函数 (例如  $\sin$ ,  $\exp$ ,  $\ln$  等)。
- (2) 其值不变的数学常数 (例如  $e = 2.7182818\cdots$ ) 及已定义的算子。
- (3) 法定计量单位、词头和量纲符号。
- (4) 数学符号。
- (5) 化学元素符号。
- (6) 机具、仪器、设备和产品等的型号、代号及材料牌号。
- (7) 硬度符号。
- (8) 不表示量的外文缩写字。
- (9) 表示序号的拉丁字母。
- (10) 量符号中为区别其他量而加的具有特定含义的非量符号下角标。

出  $(+B, +I_H), (+B, -I_H), (-B, I_H), (-B, -I_H)$  下的电势差  $U_1, U_2, U_3, U_4$ , 并按式  $U_H = \frac{1}{4}U_1 - U_2 + U_3 - U_4$  计算即可消除不等位效应, 理由在数据处理部分已经给出。

### 6.3 如何利用霍尔效应测量磁场?

给霍尔片通以电流  $I$ , 测出片上的霍尔电压  $U_H$ , 即可通过式  $B = \frac{U_H}{K_H I}$  计算出磁场,  $K_H$  课用实验的方法确定。

## 7 实验总结

通过这次实验, 我对于霍尔效应有了更加直观, 深入的认识. 学会了消除霍尔副效应的方法. 本次实验内容丰富, 各个小实验之间联系密切, 前面实验的结构直接影响到了后面的实验. 这让我对物理实验的方法有了更深刻的认识, 对物理现象内在的联系有了进一步的体会。

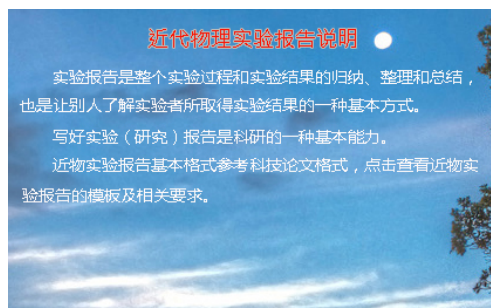


图 7 图片示例

## 6 思考题

### 6.1 如何计算实验中霍尔片载流子迁移率

由“实验数据处理”,  $\mu = \Omega R_H$ , 其中  $\Omega$  为霍尔片的电导率,  $R_H$  为霍尔系数. 具体计算过程将数据处理部分。

### 6.2 如何观察不等位效应? 如何消除不等位效应对测量带来的影响?

将电磁铁的激励电流切断,  $B=0$ , 此时霍尔片两侧面间仍有电位差. 改变电流  $I_H$  的方向, 此电位差正负改变, 这就是观察不等位效应的方法. 测量