

用霍尔效应测量磁场

张欣睿^{*}

北京大学化学与分子工程学院 学号：1600011783

摘 要：本次实验使用半导体霍尔片验证了霍尔效应中 $U_H - I_H$ 、 $U_H - B$ 的线性关系，并使用霍尔片测量了电磁铁的磁化曲线和磁场在水平方向上的分布，求算了霍尔片的灵敏度及讨论了相关问题。

关键词：霍尔效应；电磁铁；磁化曲线；磁场分布；霍尔元件灵敏度

^{*} e-mail: zhangxinrui16@pku.edu.cn; mobile number: 18801391162

1 数据处理

1.1 验证 I_H 和 U_H 的关系

实验开始时，连接好电路，调节得到励磁电流 $I_M = 0.601 \text{ A}$ 。控制霍尔电流 I_H 从 1、2 接口通入，并控制其大小一定，分别调节励磁电流和霍尔电流的方向，测定 3、4 接口方向的电压值，消除副效应，测定结果如表 1 所示。

$I_H \text{ (mA)}$	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000
$U_1 \text{ (mV)}$	-3.81	-7.61	-11.41	-15.21	-18.99
$U_2 \text{ (mV)}$	3.82	7.63	11.43	15.23	19.03
$U_3 \text{ (mV)}$	-3.59	-7.19	-10.79	-14.40	-18.02
$U_4 \text{ (mV)}$	3.57	7.20	10.81	14.43	18.06
$U_H = -\frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4} \text{ (mA)}$	3.698	7.408	11.11	14.82	18.53

表 1 用 1、2 接口验证 I_H 和 U_H 的关系测量结果

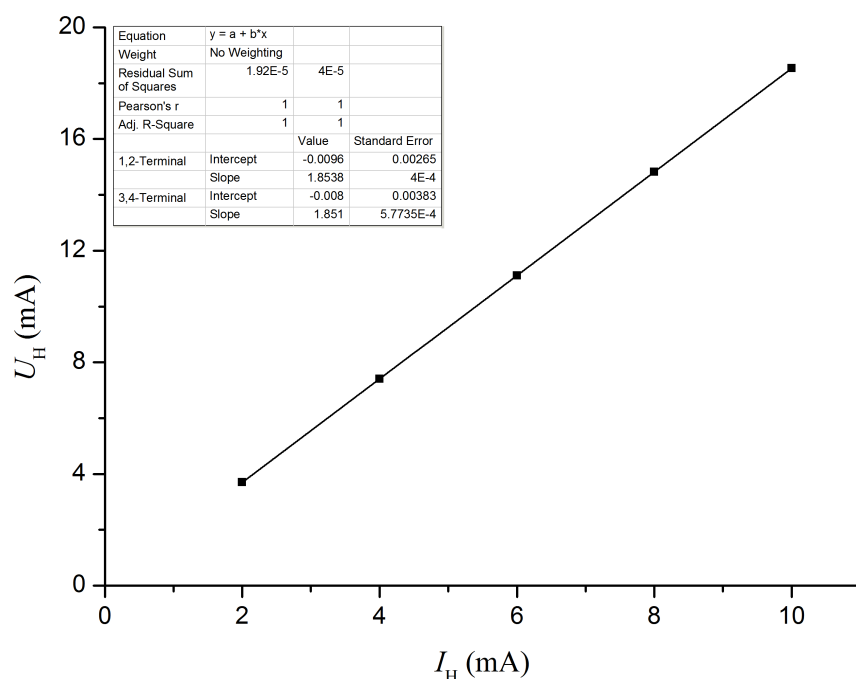
更换为 3、4 接口重复实验，结果如表 2 所示。

$I_H \text{ (mA)}$	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000
$U_1 \text{ (mV)}$	3.59	7.21	10.82	14.45	18.08
$U_2 \text{ (mV)}$	-3.58	-7.21	-10.82	-14.44	-18.07
$U_3 \text{ (mV)}$	3.80	7.59	11.38	15.16	18.93
$U_4 \text{ (mV)}$	-3.79	-7.59	-11.37	-15.15	-18.92
$U_H = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4} \text{ (mA)}$	3.690	7.400	11.10	14.80	18.50

表 2 用 3、4 接口验证 I_H 和 U_H 的关系测量结果

根据以上两表数据利用软件 Origin® 作 $U_H - I_H$ 图（两条直线重合程度很大，因而此处仅画出一条直线），可以验证 $U_H - I_H$ 的线性关系，如下页图 1 所示。由拟合直线及相关系数 $r_1 = r_2 = 1$ ，可验证两者成很强的线性关系。

结论：通过控制励磁电流一定（磁场一定），调节霍尔元件一个方向上的霍尔电流 I_H ，测量另一个方向上的霍尔电压 U_H ，可以验证 $U_H - I_H$ 成线性关系。这一关系对于与磁场垂直的两个方向上的接口都成立。

图 1 验证 $U_H - I_H$ 的线性关系拟合直线

1.2 验证 $U_H - B$ 线性关系与霍尔元件灵敏度的计算

控制电磁铁的励磁电流 I_M 从 0 A 改变到 1 A。分别用特斯拉计测出磁感应强度 B ，并用相同的方法测定控制 I_H 为通过 1、2 接口、强度为定值 10.000 mA 的电流时，相应的霍尔电压。测量结果如表 3 所示。

I_M (A)	B (mT)	U_1 (mV)	U_2 (mV)	U_3 (mV)	U_4 (mV)	U_H (mV)
0	1.0	-0.34	0.37	0.36	-0.33	(0.005)*
0.100	35.9	-3.51	3.55	-2.60	2.64	3.075
0.200	71.6	-6.56	6.54	-5.71	5.74	6.138
0.300	108.0	-9.56	9.60	-8.77	8.81	9.185
0.400	145.1	-12.71	12.75	-11.87	11.85	12.295
0.500	181.9	-15.79	15.84	-14.89	14.93	15.363
0.600	217.6	-18.90	18.87	-18.07	18.11	18.488
0.700	254.3	-21.90	21.93	-21.16	21.20	21.548
0.800	291.4	-25.05	25.09	-24.24	24.21	24.648
0.900	326.5	-28.07	28.11	-27.20	27.23	27.653
1.000	361.5	-31.02	30.97	-30.29	30.33	30.653

表 3 验证 $U_H - B$ 关系测量结果

* 此处应未发生霍尔效应，各次测得电压来自于各类副效应。

使用最小二乘法处理数据，作出 $U_H - B$ 拟合直线，如图 2 所示。

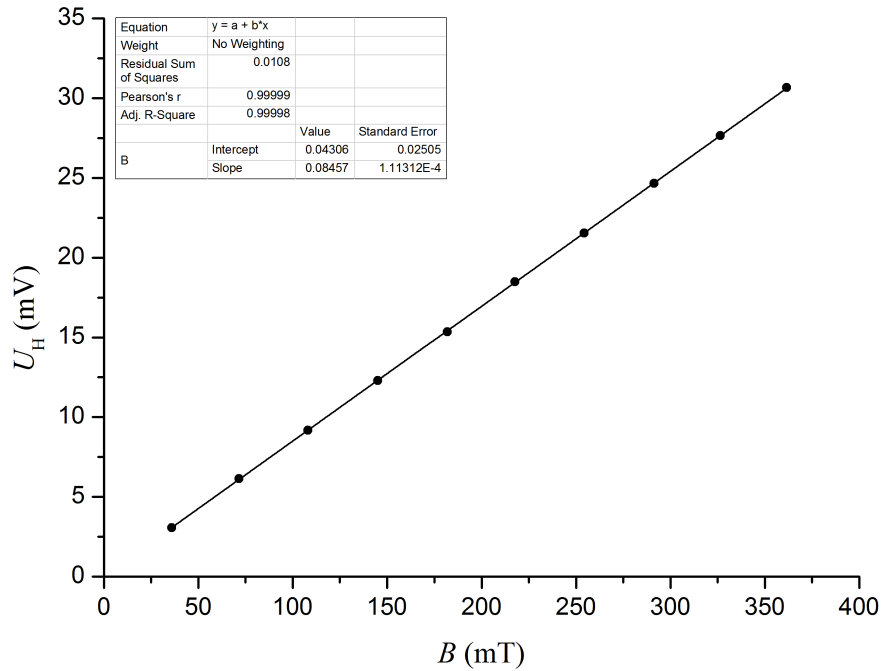


图 2 验证 $U_H - B$ 的线性关系拟合直线

由霍尔元件的灵敏度计算式可求得该霍尔元件的灵敏度：

$$K_H = \frac{U_H}{I_H B} = \frac{k}{I_H} = \frac{0.08457 \text{ V} \cdot \text{T}^{-1}}{10.000 \text{ mA}} = 8.457 \text{ } \Omega \cdot \text{T}^{-1}$$

根据最小二乘法拟合结果，斜率 k 的不确定度为 $\sigma_k = 1.1 \times 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{T}^{-1}$ 。对于霍尔电流 I_H ，其测定使用 VC9806+ 型数字电表的直流 20 mA 档，此量程的准确度为 $\pm (0.5\% + 4 \text{ 个字})$ 。测定电流的不确定度即为仪器允差：

$$\sigma_{I_H} = e = 10.000 \text{ mA} \cdot 0.5\% + 0.004 \text{ mA} = 0.054 \text{ mA}$$

根据不确定度合成公式，霍尔元件灵敏度的不确定度为：

$$\begin{aligned} \sigma_{K_H} &= K_H \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_H}}{I_H}\right)^2} \\ &= 8.457 \text{ } \Omega \cdot \text{T}^{-1} \cdot \sqrt{\left(\frac{1.1 \times 10^{-4}}{0.08457}\right)^2 + \left(\frac{0.054}{10.000}\right)^2} = 0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{T}^{-1} \end{aligned}$$

故这一霍尔元件的灵敏度为 $(K_H \pm \Delta K_H) = 8.46 \pm 0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{T}^{-1}$ 。

结论：通过控制霍尔电流 I_H 一定，改变励磁电流 I_M （磁感应强度 B ）可以验证 $U_H - B$ 的线性关系。同时可利用线性拟合结果计算实验所用的霍尔元件灵敏度为 $(K_H \pm \Delta K_H) = 8.46 \pm 0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{T}^{-1}$ 。

1.3 用霍尔效应测量电磁铁的磁化曲线

利用 1.2 部分中的表 3 数据，结合所得灵敏度分别求得每一励磁电流磁感应强度 B 的计算值，结果如表 4 所示。

I_M (A)	U_H (mV)	$B = \frac{U_H}{I_H K_H}$ (mT)
0	0.005	0.06
0.100	3.075	36.3
0.200	6.138	72.6
0.300	9.185	108.6
0.400	12.295	145.3
0.500	15.363	181.6
0.600	18.488	218.5
0.700	21.548	254.7
0.800	24.648	291.3
0.900	27.653	326.9
1.000	30.653	362.3

表 4 测量电磁铁的磁化曲线

利用表 4 数据，可拟合所用电磁铁的磁化曲线 ($B-I_M$ 曲线)。如图 3 所示。

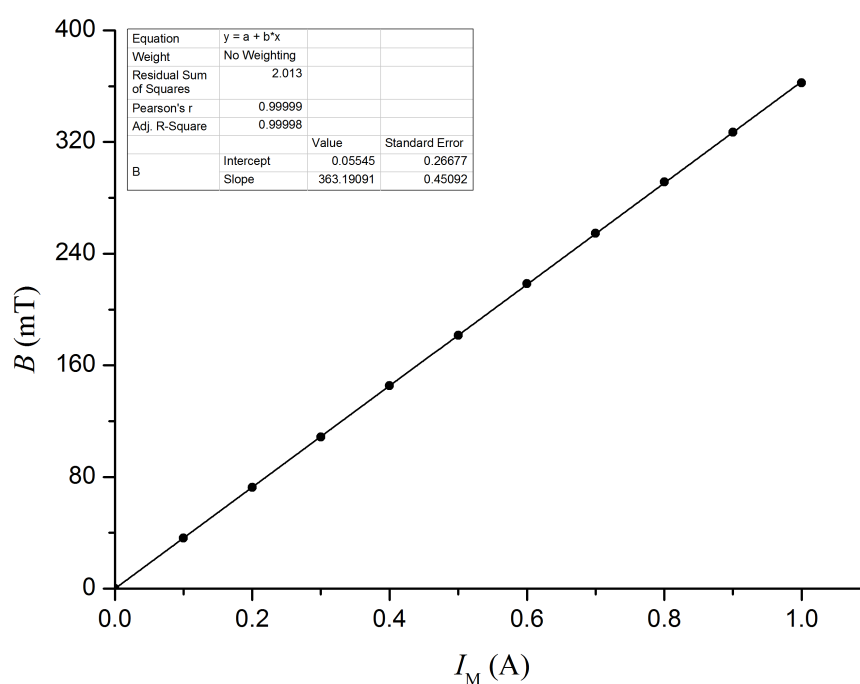


图 3 电磁铁的磁化曲线

结论：使用求得的灵敏度和各霍尔电压，可以计算出各励磁电流下电磁铁中心部分的磁感应强度，据此可作出电磁铁的磁化曲线。磁化曲线呈直线，证明电磁铁的励磁电流和产生的磁感应强度也呈线性关系。

1.4 测量电磁铁磁场沿水平方向分布

控制霍尔电流 $I_H = 10 \text{ mA}$ ，励磁电流 $I_M = 0.6 \text{ A}$ 。转动支架旋钮使霍尔片从电磁铁边缘水平移动入电磁铁中心部分。由左到右，测量不同位置 x 处的霍尔电压，从而得出不同位置处的磁场分布。测量结果如表 5 所示。

$x \text{ (mm)}$	$U_H \text{ (mV)}$	$B = \frac{U_H}{I_H K_H} \text{ (mT)}$	$x \text{ (mm)}$	$U_H \text{ (mV)}$	$B = \frac{U_H}{I_H K_H} \text{ (mT)}$
96.0	1.95	23.1	74.2	12.42	146.8
93.0	2.20	26.0	73.6	13.73	162.3
90.3	2.48	29.3	73.2	14.29	168.9
87.9	2.80	33.1	72.8	15.12	178.7
86.0	3.11	36.8	72.2	16.22	191.7
84.1	3.52	41.6	71.5	17.10	202.1
82.6	3.96	46.8	71.0	17.71	209.3
81.9	4.20	49.6	69.6	18.43	217.8
80.3	4.90	57.9	68.0	18.78	222.0
79.0	5.75	68.0	64.2	18.85	222.8
78.1	6.46	76.4	57.6	18.85	222.8
77.1	7.57	89.5	54.9	18.85	222.8
76.3	8.76	103.5	51.3	18.86	222.9
75.2	10.48	123.9	46.3	18.87	223.0
74.8	11.46	135.5	41.0	18.89	223.3

表 5 电磁铁磁场沿水平方向分布测量结果

根据不同位移处的磁感应强度，可以作出水平方向上的 $B - x$ 分布图。如下页图 4 所示。

结论：控制励磁电流和霍尔电流相同，水平移动霍尔片，测量不同水平位移处的霍尔电压，可以测定出不同水平位置的磁场分布，并作出 $B - x$ 曲线。曲线表示随 x 的减小（霍尔片逐渐深入磁场中），探测到的磁感应强度增大。在磁场边缘处增加较快，直至磁场中央的磁感应强度基本保持不变。

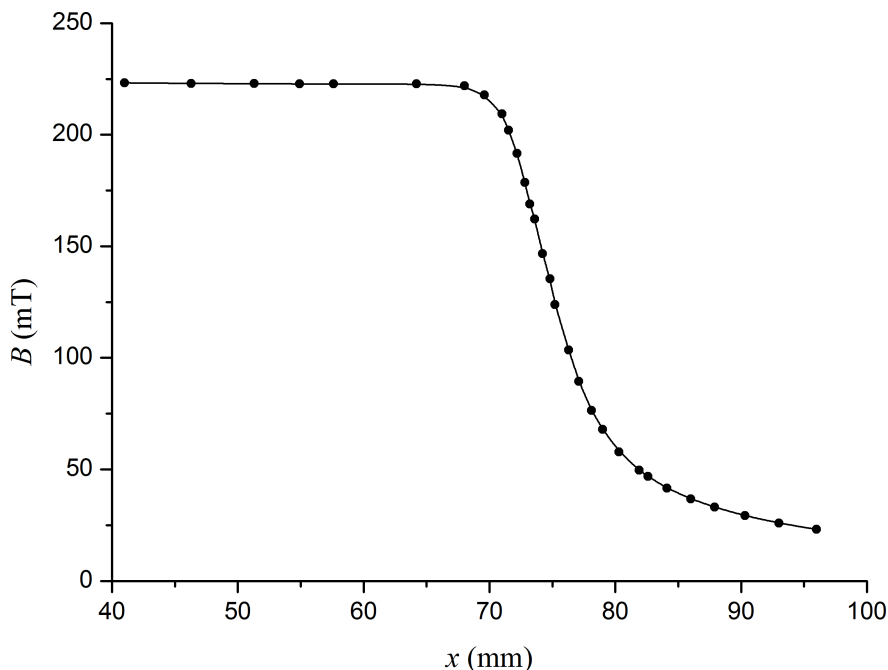


图 4 电磁铁磁场水平方向分布图

2 思考题

(3) 在测量 $B - I_M$ 曲线中, $I_M = 0$ 时 U_H 测量端仍有较小的电压, 这是为什么?

答: 这一电压可能来自于励磁电流为 0 时电磁铁的剩磁产生的霍尔效应, 也可能来自于霍尔片表面的不等位电势差。根据测量数据, 当 $I_M = 0$ 时, 仅当 I_H 反向时 U_H 测量值反号, 因而不等位电势差是主要原因。

3 分析与讨论

在实验 1.1 中, 接 1、2 接口和接 3、4 接口所求得的 U_H 差别不大, 大约都仅有 0.01 mV 的差别。这是由于霍尔效应发生时:

$$U_H = \frac{I_H B}{pqd}$$

所用霍尔片厚度均匀时, 则 U_H 理论上不会发生变化。

另外, 在更换磁场方向时, 引起的电压测量值的变化比更换霍尔电流方向时引起的电压测量值变化大很多。这说明在副效应中主要是由于能斯特效应、里吉-勒迪克效应等热磁副效应的影响, 导致测得的电压不准。

在实验 1.3 中, 磁化曲线使用的是使用 K_H 、 U_H 得出的计算值, 未使用直接的测量值。其原因是特斯拉计直接测量时误差可能较大, 而先使用 B 和 U_H 得出的回归直线的斜率本身经过了某种意义上的平均, 在绘制磁化曲线时可以得到较

为精准的磁化曲线。不妨将 B 测量值和计算值共同绘制对比，如图 5 所示：

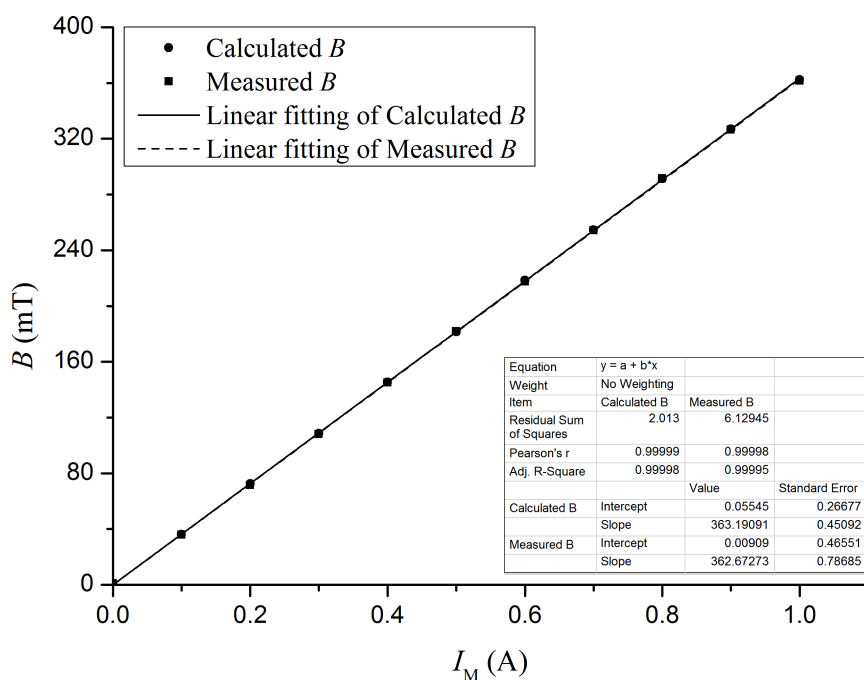


图 5 对比使用 B 的计算值和测量值绘制曲线

在拟合结果中可以看出，计算值的相关系数 $r_c = 0.99999$ ，大于测量值 $r_m = 0.99998$ ；拟合直线斜率和截距的标准差均为测量值大于计算值。意味着计算出的 B 值有更好的线性性，故使用计算值是更为合理的。

实验中测得的 $U_H - I_H$ 曲线、 $U_H - B$ 曲线是线性的，证明了霍尔效应发生时电压电流关系 $K_H I_H B = U_H$ 的正确性；测得的 $B - I_M$ 曲线（电磁铁的磁化曲线）为线性，说明电磁铁在同一位置处产生的磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 成正比；测得的 $B - x$ 曲线（电磁铁磁场的水平分布）表明磁场在电磁铁边缘处增强较快，在电磁铁中心磁感应强度趋于稳定。

4 收获与感想

本次实验使用霍尔效应测定了电磁铁的磁化曲线和磁场水平分布，使我更好地理解霍尔效应中各个量的理论关系，并且探究得到了电磁铁磁感应强度和励磁电流、探测位置的关系。了解了各仪器的使用，增强了我的电学实验能力，并且加强了电现象和磁现象互通的观念。

5 致谢

感谢李智老师对实验和仪器的指导。