

# 各向异性磁电阻的测量实验

**摘要：**材料的磁电阻效应被应用的非常广泛，本文阐述了各向异性磁电阻的特性，介绍了室温磁电阻的测量方法，分别测量了电流方向与磁场方向平行和垂直两种情况下电阻随磁场的变化，并对数据进行讨论分析。

**关键字：**各向异性磁电阻，AMR曲线，四探针样品夹具，磁电阻的测量。

## 引言

一般所谓磁电阻是指在一定磁场下材料电阻率改变的现象。1988年，在分子束外延制备的Fe/Cr多层膜中发现MR可达50%。并且在薄膜平面上，磁电阻是各向同性的。人们把这称之为巨磁电阻（简记为GMR），90年代，人们又在Fe/Cu、Fe/Al、Fe/Ag、Fe/Au、Co/Cu、Co/Ag和Co/Au等纳米多层膜中观察到了显著的巨磁电阻效应。

1992年人们又发现在非互溶合金（如Fe、Co与Cu、Ag、Au等在平衡态不能形成合金）颗粒膜如Co-Ag、Co-Cu中存在巨磁电阻效应，在液氮温度可达55%，室温可达到20%，并且有各向同性的特点。1994年，人们又发现Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe隧道结在4.2K的MR为30%，室温达18%，之后在其他一些铁磁层/非铁磁层/铁磁层隧道结中亦观察到了大的磁电阻效应，人们将此称为隧道结磁电阻（简记为TMR）。目前MR室温达24%的TMR材料已制成，用TMR材料已制成计算机硬盘读出磁头，其灵敏度比普通MR磁头高10倍，比GMR磁头高数倍。

20世纪90年代后期，人们在掺碱土金属稀土锰氧化物中发现MR可达103%~106%，称之为庞磁电阻（简记为CMR）。目前锰氧化物CMR材料的磁电阻饱和磁场较高，降低其饱和场是将之推向应用的重要研究课题。

利用磁电阻效应可以制成计算机硬盘读出磁头；可以制成磁随机存储器（MRAM）；还可测量位移、角度、速度、转速等。

## 1. 实验目的

（1）初步了解磁性合金的AMR，多层膜的GMR，掺碱土金属稀土锰氧

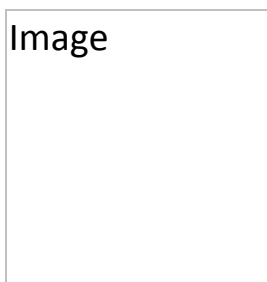
化物的CMR。

(2) 初步掌握室温磁电阻的测量方法。

## 2. 实验原理

### 2.1 各向异性磁电阻

一些磁性金属和合金的AMR与技术磁化相对应，即与从退磁状态到趋于磁饱和的过程相应的电阻变化。外加磁场方向与电流方向的夹角不同，饱和磁化时电阻率不一样，即有各向异性。通常取外磁场方向与电流方向平行和垂直两种情况测量AMR。即有 $\Delta\rho_{\parallel} = \rho_{\parallel} - \rho(0)$ 及 $\Delta\rho_{\perp} = \rho_{\perp} - \rho(0)$ 。若退磁状态下磁畴是各向同性分布的，畴壁散射变化对磁电阻的贡献较小，将之忽略，则 $\rho(0)$ 与平均值 $\rho_{\text{av}} = 1/3(\rho_{\parallel} + 2\rho_{\perp})$ 相等。大多数材料 $\rho_{\parallel} > \rho(0)$ ，故计算公式为



AMR常定义为



如果 $\rho_0 \neq \rho_{\text{av}}$ ，则说明该样品在退磁状态下有磁畴结构，即磁畴分布非完全各向同性。如下图一是曾用作磁盘读出磁头和磁场传感器材料的Ni81Fe19的磁电阻曲线，很明显 $\rho_{\parallel} > \rho(0)$ ， $\rho_{\perp} < \rho(0)$ ，各向异性明显。

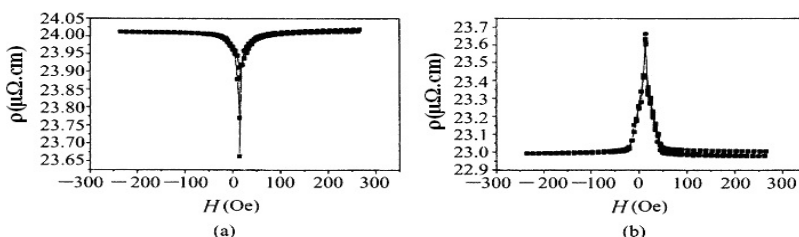


图 NiFe薄膜的磁电阻曲线

(a) 电流方向与磁场方向平行 (b) 电流方向与磁场方向垂直

如下图二一些铁磁金属与合金薄膜的各向异性磁

## 电阻曲线

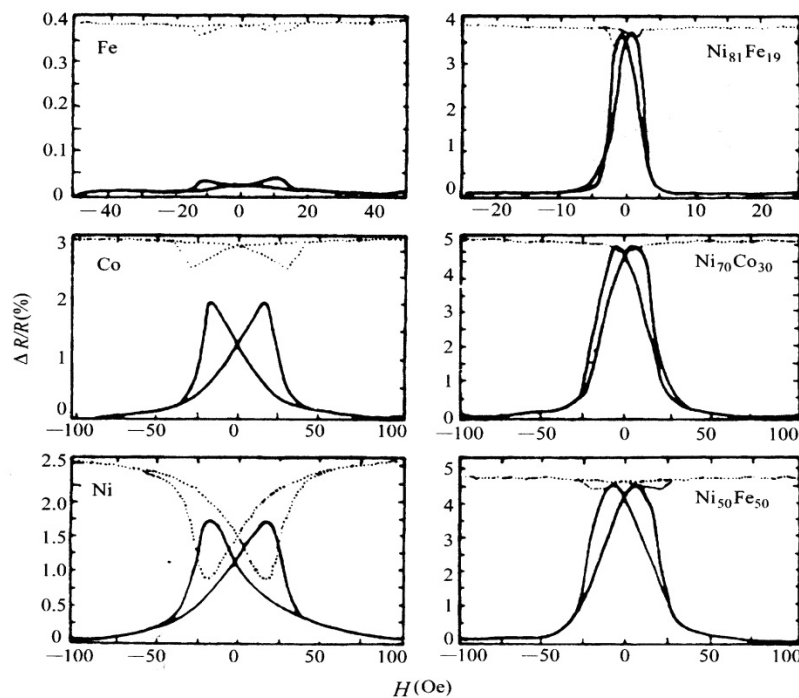


图 一些铁磁金属与合金薄膜的 AMR 曲线，  
实线和虚线分别表示横向和纵向的磁电阻

### 2.2 多层膜的巨磁电阻

巨磁电阻效应首次在 Fe / Cr 多层膜中发现。图12.1-5为这种多层膜的磁电阻曲线。由图四可见，Fe / Cr 多层膜室温下的MR约11.3%，4.2 K时约42.7%。Co / Cu多层膜室温MR可达60%~80%，远大于AMR，故称为巨磁电阻，这种巨磁电阻的特点是：

- (1) 数值比AMR大得多。
- (2) 基本上各向同性的。图六中高场部分的双线分别对应于  $(MR)_{//}$  和  $(MR)_{\perp}$ ，其差值为AMR的贡献。该多层膜在300 K和4.2 K下分别为0.35%和2.1%，约为其GMR的二十分之一。
- (3) 多层膜的磁电阻按传统定义  $MR = [\rho(H) - \rho(0) / \rho(0)] \times 100\%$  是负值，恒小于100%。常采用另一定义  $GMR = [\rho(0) - \rho(H) / \rho(H)] \times 100\%$ ，用此定义数值为正，且可大于100%。
- (4) 中子衍射直接证实，前述多层膜相邻铁磁层的磁化为反铁磁排列，来源于层间的反铁磁耦合。无外磁场时各层Ms反平行排列，电阻最大，加外磁场后，各层Ms平行排列，电阻最小。如图五所示。

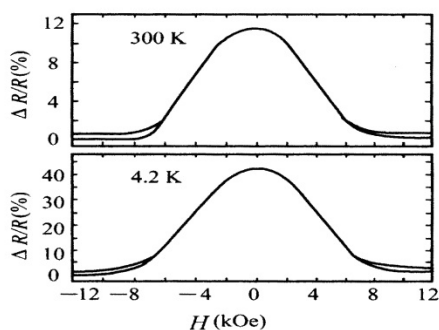


图 5 Fe/Cr 多层膜的 GMR 曲线

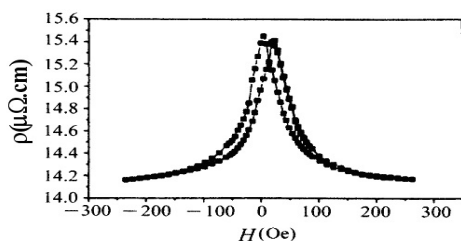


图 6 NiFe/Cu/Co/Cu 多层膜的室温磁电阻曲线

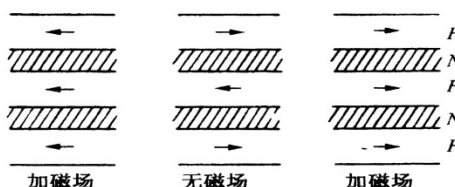


图 7 多层膜中有无外磁场磁化分布与电阻变化的示意图

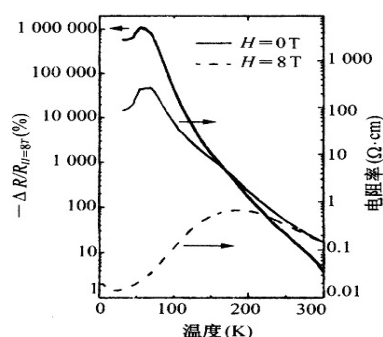


图 8  $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  薄膜样品的电阻率和磁电阻随温度变化关系,其中  $\text{MR} > 10^6\%$

(5) 除  $\text{Fe/Cr}$  多层膜外,人们已在许多系统如  $\text{Fe/Cu}$ 、 $\text{Fe/Al}$ 、 $\text{Fe/Ag}$ 、 $\text{Fe/Au}$ 、 $\text{Fe/Mo}$ 、 $\text{Co/Cu}$ 、 $\text{Co/Al}$ 、 $\text{Co/Ag}$ 、 $\text{Co/Au}$ 、 $\text{Co/Ru}$ 、

$\text{FeNi/Cu}$  等中观察到不同大小的 GMR, 但并不是所有多层膜都有大的磁电阻, 有的很小, 甚至只观察到 AMR, 如  $\text{Fe/V}$  多层膜。图六是  $\text{NiFe/Cu/Co/Cu}$  多层膜的室温磁电阻曲线。

## 2.3 掺碱土金属稀土锰氧化物的庞磁电阻

图七是  $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  薄膜样品的电阻率、磁电阻随温度变化关系。该样品的  $\text{MR} > 10^6\%$ 。

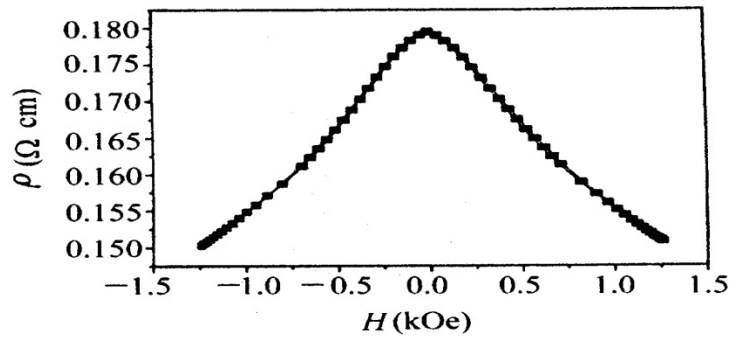


图 一种掺银 La-Ca-Mn-O  
样品的室温磁电阻曲线

到目前为止，对  $RE_{1-x}T_xMnO_3$  ( $RE = La, Pr, Nd, Sm; T = Ca, Sr, Ba, Pb$ )，在  $x=0.2\sim 0.5$  范围都观测到 CMR 和铁磁性。这种 CMR 的特点是：

- (1) 数值远大于多层膜的 GMR。
- (2) 各向同性。
- (3) 负磁电阻性，即磁场增大，电阻率降低。
- (4) CMR 总是出现在居里温度附近 ( $T < T_c$ )，随温度升高或降低，都会很快降低。这一特性与金属多层膜的磁电阻有本质的差别。
- (5) 到目前为止，只有少部分材料的居里点高于室温。
- (6) 观察这类材料 CMR 的外加磁场比较高，一般需 Tesla 量级。

图12.1-9是一种掺银的 La-Ca-Mn-O 样品的室温磁电阻曲线。

### 3. 实验仪器

亥姆霍兹线圈、电磁铁、特斯拉计、毫特斯拉计、大功率恒流电源、大功率扫描电源、精密恒流源、数字微伏表、双路 ADC 数据采集卡及软件，计算机，四探针样品夹具。

### 4. 实验方法

1.将样品切成窄条，这在测AMR时是必需的。  
对磁性合金薄膜，饱和磁化时，样品电阻率有如下关系：

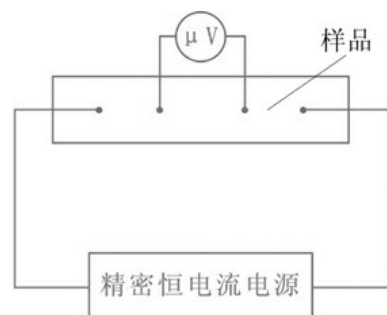
$$\rho(\theta) = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2 \theta$$

其中 $\theta$ 是磁场方向与电流方向的夹角。

为保证电流有一确定方向，常用的方法是：

(1) 将样品刻成细线，使薄膜样品的宽度远远小于长度。(2) 用平行电极，当电极间距远小于电极长度时，忽略电极端效应，认为两电极间的电流线是平行的。

2.用非共线四探针法测电阻值，如图八所示。这种方法当数字微伏表内阻很大时，可以忽略探针接触电阻的影响，已在半导体、铁氧体、超导体等的电测量中广泛使用。



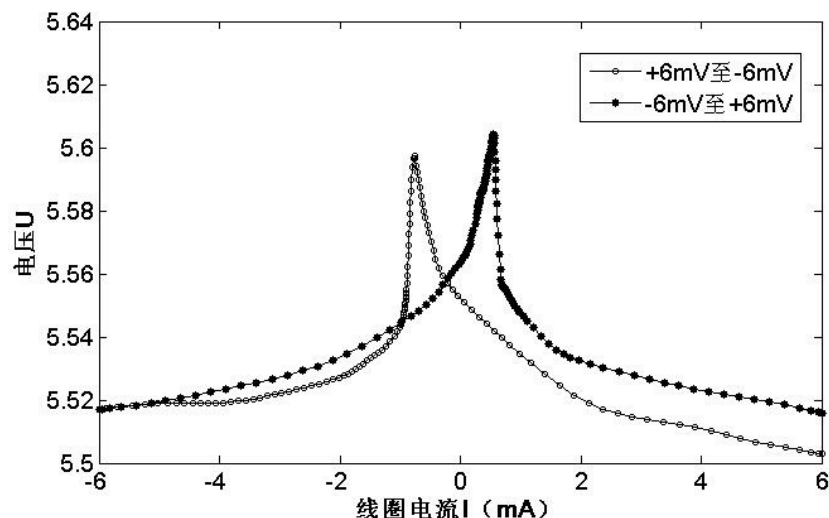
## 测量 A M R 实验过程

- 1.将大功率恒流源与亥姆霍兹线圈连接。
- 2.将样品装上四探针夹具，并作如图八所示连接。
- 3.将装好样品的夹具固定在亥姆霍兹线圈中心，并确保电流方向与磁场方向平行。
- 4.将毫特斯拉计探头固定在样品附近。
- 5.确保所有仪器调整旋钮均在输出为零位置，启动所有测量仪器，预热 5 ~ 15 分钟，并作校准。
- 6.调整精密恒流源输出，使测量电流（流过样品的电流）为 1 ~ 100 mA 范围内的某个确定电流，本实验中将电流调整为 6mA。
- 7.调节大功率恒流源输出电流，从 -6A 开始，逐点增大，以改变磁场大小，逐点记录数字微伏表显示的电压值。
- 8.当电流调节 6A 时停止记录，在调节大功率恒流源输出电流逐点减小至 -6A，仍作上述记录。
- 9.将样品夹具转 90° 固定好，确保电流方向与磁场方向垂直，再重复 6—8 步测量、记录。

## 5. 实验数据及讨论

### 5.1 磁场与电流方向垂直

测量电压的变化随磁场的变化如下图



由上图可以看出，两条曲线分别对应着电流增大和减小两种情况下的测得的电压随着电流的变化值。由实验可知水平方向电流正比于磁场，而竖直方向电压正比于电阻率，所以上图可以看作是磁场与电流方向垂直时待测样品的AMR曲线。

当薄膜的面积大于探针间的距离时，金属薄膜的电阻率  $\rho$  可以用下式给出：

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} d$$

其中  $d$  是薄膜的厚度， $I$  是流经薄膜的电流， $V$  是薄膜两探针之间的距离。在本实验中， $I$  是恒定值  $I=6\text{mA}$ 。而电压是实验中测得的值，因而只要知道了薄膜的厚度，就能准确测到对应磁场下金属薄膜的电阻率。

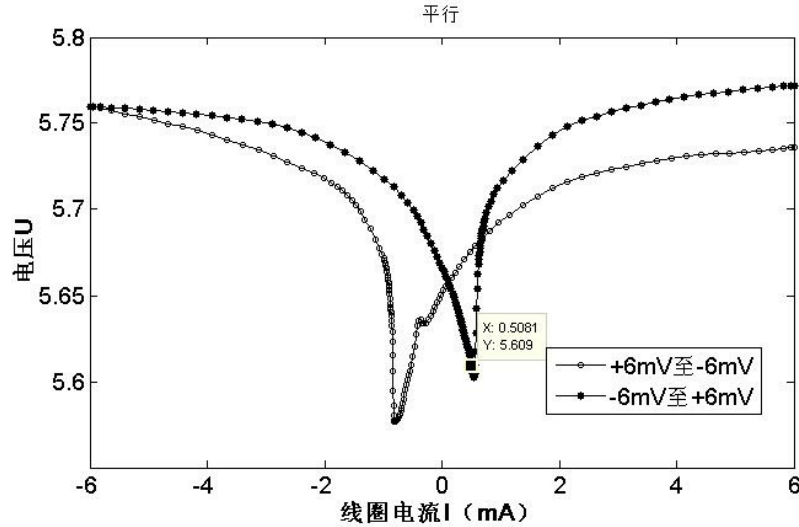
由上图可以看出，两条峰并没有重合，而且峰值并没有在零点，说明所测得的样品波某磁畴等非完全各向同性，也就是说，薄膜是各向异性的，出现双峰是由于磁滞现象引起的。

由公式  $\rho(\theta) = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2 \theta$  可以得出

$$\rho_{\perp} = \rho_0$$

## 5.2 磁场与电流方向平行

测量电压的变化随磁场的变化如下图



水平情况下同样出现双峰，且峰值没有与零点重合，原因与垂直情况下相同，上面已经分析，同样由公式  $\rho(\theta) = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2 \theta$  可以计算出

$$\rho_{//} = \rho_0 + \Delta\rho_{//}$$

再由实验数据可以得出垂直时  $\rho_{\perp}$  的电压为 5.603mv，

平行时  $\rho_{//}$  的电压为 5.589mv，

对于平均值 由公式  $\rho_{av} = (\rho_{//} + 2\rho_{\perp})/3$  可以算出

$\rho_{av}$  的电压值为 5.598mv

在通过公式  $AMR = \frac{\Delta\rho}{\rho_{av}} = \frac{\rho_{//} - \rho_{\perp}}{\rho_{av}}$  可以算出

所测磁电阻的  $AMR = 0.014/5.598 = 0.25\%$

由于电压值正比于电阻率，所以上述计算中全部以电压值代替。由下面公式

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} d$$

只要知道了薄膜的厚度就可以计算出电阻率。薄膜的厚度在实验中可以测得。

实验中由于采用了手动调节磁场的大小，通过电流的大小来调节磁场，而在调节过程中，实验仪器的精确度和计数的精确度给实验带来了一定的误差。

对于计数的步距，当电压变化比较小时，步距可以大一些，在实验中步距是按照 0.5mv 计数的。同样，当电流靠近零点时，此时电压的变化值比较大，因而步距要减小，实验中刚开始是以 0.2mv 为步距的，发现实



验误差比较大，因而后面减小步距，改为0.1mv计量。减小实验的误差，但是通过上图的实验图可以看出实验的误差还是比较大，因而最好再次减小步距，但受限于实验仪器本身的精确度和人工计数的不便，因而实验中最好将扫描电流和所测电压通过电脑XY记录仪与电脑相连，通过电脑来计数而减小误差。

在调节电流的过程中，手最好不要离开旋转按钮，实验中发现手离开的瞬间，电流值由一定的波动，给实验测量带来不便。

## 5. 实验讨论与实验思考题

### 5.1 讨论

实验误差，本次实验中有很多因素会导致实验有误差，首先温度会影响测量，测量过程中温度是一直变化的，所以会导致测量得到的曲线不对称。另外，磁场是近似认为是均匀场，实际上不是，这也会造成误差。同时在放置样品是与磁场平行或垂直都是目测的，这样也有可能造成测量的结果有误差。

### 5.2 实验思考题

（1）测量AMR后计算出的是否相同，如不同说明什么问题？

答：从上面计算结果上看可以认为是相同的，这表明该样品在退磁状态下磁畴的分布是各向同性的，如果不相同则说明退磁状态下磁畴的分布是各向异性的。

（2）按前述步骤手动测量的磁电阻曲线与自动测量出的磁电阻曲线有何异同，为什么？

答：手动测量时如实验结果中图示，磁电阻曲线不对称，这主要是由于测量的时间比较长，测量的环境（主要是周围的温度）变化所致，手动测量时测量的周期比较长，环境变化比较大，如果改用自动测量，而且自动测量的周期比较短的话，那么就可以有效的减少环境变化对测量结果的影响，另外，手动测量时有一个好处就是，我们可以在电阻随磁场变化比较大的区域，让线圈电流变化的慢一些，突出这一区域的变化关系，而自动的却很难做到这点。

（3）手动测量时如何更好的选择测量电流？

答：当流过线圈的电流很大时，线圈发热的厉害，容易烧毁线圈，而磁电阻在磁场比较大时变化比较缓慢，故在手动测量时，我们在电流比较大的区域，电流变化的快一些，在电流比较小时，线圈发热不明显，我们可以慢慢测量，并且这一区域是磁电阻变化比较快的，所以在电流较小时，我们应适当减小线圈电流的变化步长，使得在这一区域测量的点多一些。

（4）测量中如何减小热效应对测量的影响？

答：①减小测量的周期，测量周期越长，温差越大，对测量的影响就越大，我们可以改用自动测量的方法，这样可以省去读数记数的时间。

②采用降温的方法，有一种可行的方法就是用气冷，将样品和线圈置于风扇下，这样可以有效的减小前后温差

（5）样品夹具采用的材料有何要求？

答：首先要绝缘材料，另外不能是铁磁或亚铁磁性的材料，最好选用抗磁材料，顺磁的也可以。

## 参考文献

《近代物理实验》 第二版 黄润生 沙振舜 唐涛 编 南京大学出版社

## 原始数据

磁场与电流平行的情况 ( $I=6\text{mA}$ )

线圈电流 $I/\text{mA}$	样品度数 $V/\text{mA}$	线圈电流 $I/\text{mA}$	样品度数 $V/\text{mA}$
6.000	5.736	-6.000	5.760
5.030	5.733	-5.040	5.758
4.060	5.731	-4.060	5.755
3.020	5.724	-3.010	5.751
2.000	5.716	-2.030	5.741
1.000	5.694	-1.020	5.720
0.500	5.677	-0.490	5.701
0.180	5.661	-0.280	5.687
0.000	5.652	-0.040	5.670
-0.130	5.642	0.080	5.660
-0.300	5.632	0.200	5.650
-0.400	5.638	0.280	5.640
-0.510	5.610	0.330	5.635
-0.600	5.600	0.360	5.630
-0.670	5.588	0.400	5.625
-0.710	5.580	0.440	5.620
-0.810	5.576	0.480	5.615
-0.820	5.578	0.500	5.610
-0.840	5.623	0.550	5.601
-0.860	5.638	0.560	5.607

-0.880	5.644	0.610	5.664
-0.900	5.655	0.640	5.675
-0.920	5.661	0.660	5.681
-0.970	5.669	0.680	5.687
-1.000	5.673	0.700	5.690
-1.360	5.698	0.790	5.703
-1.640	5.710	1.020	5.718
-2.030	5.719	2.000	5.748
-2.990	5.733	3.010	5.758
-4.060	5.745	4.010	5.765
-5.030	5.753	5.000	5.769
-6.000	5.760	6.000	5.772

磁场与电流垂直的情况（**I=6mA**）

线圈电流 I/mA	样品度数 V/mA	线圈电流 I/mA	样品度数 V/mA
6.000	5.503	-6.000	5.517
5.030	5.506	-5.020	5.519
4.040	5.511	-4.020	5.523
2.960	5.514	-3.000	5.527
2.020	5.519	-2.000	5.533
1.020	5.534	-1.010	5.544
0.490	5.543	-0.490	5.551
0.000	5.552	-0.160	5.560
-0.350	5.560	0.050	5.565
-0.510	5.572	0.120	5.567

-0.620	5.581	0.180	5.571
-0.700	5.591	0.280	5.579
-0.770	5.600	0.300	5.582
-0.830	5.584	0.320	5.583
-0.850	5.571	0.340	5.586
-0.890	5.557	0.360	5.586
-0.900	5.552	0.380	5.587
-0.930	5.548	0.420	5.590
-0.960	5.545	0.440	5.592
-1.000	5.543	0.460	5.596
-1.260	5.536	0.480	5.597
-1.510	5.533	0.510	5.599
-1.760	5.529	0.520	5.601
-2.040	5.527	0.540	5.603
-2.530	5.524	0.560	5.605
-3.030	5.522	0.580	5.595
-3.500	5.520	0.600	5.581
-4.000	5.519	0.670	5.557
-4.500	5.519	0.720	5.556
-5.080	5.519	0.810	5.553
-6.060	5.517	0.920	5.549
		1.030	5.547
		1.540	5.536
		1.990	5.532
		3.020	5.527

		3.990	5.523
		5.000	5.520
		6.000	5.516