

近代物理实验报告

10.1: 各向异性磁电阻、巨磁电阻测量

xy 学号 匡亚明学院

2019 年 2 月 29 日

1 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。通常将磁场引起的电阻率变化写成 $\Delta\rho = \rho(H) - \rho(0)$ ，其中 $\rho(H)$ 和 $\rho(0)$ 分别表示在磁场 H 中和无磁场时的电阻率。磁电阻的大小常表示为

$$\text{MR} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \times 100\%$$

其中 ρ 可以是 $\rho(0)$ 或 $\rho(H)$ ，MR 是 magnetoresistivity 的缩写。

绝大多数非磁性导体的 MR 很小，约为 $10^{-5}\%$ ，磁性导体的 MR 最大为 $3\% \sim 5\%$ ，且电阻率的变化与磁场方向与导体中电流方向的夹角有关，即具有各向异性，称之为各向异性磁电阻 (AMR)。

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 (GMR)，90 年代，人们又在 Fe/Cu、Fe/Al、Fe/Ag、Fe/Au、Co/Cu、Co/Cu 和 Co/Cu 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/Al₂O₃/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 (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 $10^3\% \sim 10^6\%$ ，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，降低其饱和场是将其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)；还可制成测量位移、角度、速度、转速等的磁传感器。

磁电阻效应，特别是巨磁电阻效应的理论涉及较多的固体量子知识，CMR 等尚未有比较完善的统一理论解释，这里不做介绍。本实验内容中涉及的测量磁电阻也纯粹是技术上的，不作物理细节上的深入划分。有兴趣的同学可参阅相关的文献、专著。

2 实验目的

1. 初步了解磁性合金的 AMR。

2. 初步掌握室温磁电阻的测量方法。

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、四探针样品夹具。

4 实验原理

4.1 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 $\Delta\rho_{//} = \rho_{//} - \rho(0)$ 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 $\rho_{av} = \frac{1}{3}(\rho_{//} + 2\rho_{\perp})$ 相等。大多数材料 $\rho_{//} > \rho(0)$ ，故

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\rho_{//}}{\rho_{av}} &= \frac{\rho_{//} - \rho_{av}}{\rho_{av}} > 0 \\ \frac{\Delta\rho_{\perp}}{\rho_{av}} &= \frac{\rho_{\perp} - \rho_{av}}{\rho_{av}} < 0 \\ \frac{\Delta\rho_{\perp}}{\rho_{av}} &= -\frac{1}{2} \frac{\Delta\rho_{//}}{\rho_{av}}\end{aligned}$$

AMR 常定义为

$$\text{AMR} = \frac{\rho_{//} - \rho_{\perp}}{\rho_0} = \frac{\Delta\rho_{//}}{\rho_0} - \frac{\Delta\rho_{\perp}}{\rho_0}$$

如果 $\rho_0 \neq \rho_{av}$ ，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。

5 实验内容

5.1 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 θ 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：

- (a) 将样品刻成细线，使薄膜样品的宽度远远小于长度。
 - (b) 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。

5.2 测量

测量 Fe-Ni 薄膜的 AMR。

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，并按电路图连接。
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 1~100mA 范围内的某个确定电流，具体大小视样品情况与测量仪表精度决定。
7. 调节大功率恒流源输出电流，从零开始，逐点增大，以改变磁场大小，逐点记录大功率恒流源输出电流值、毫特斯拉计显示的磁场大小、数字微伏表显示的电压值。注意开始时磁场变化的步距要小。
8. 当磁场继续增大，微伏表显示电压值基本不变时，将大功率恒流源输出电流逐点减小，仍作上述记录。
9. 当大功率恒流源输出电流降到零时，将输出极性反向。
10. 再重复 7、8 两步测量、记录。
11. 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 5-10 步测量、记录。

6 实验数据

有实验原理可知记录得到的数据中，横坐标电流正比于磁场强度，纵坐标电压值正比于样品电阻率，因此我们用电流-电压作图即可体现样品电阻率与磁场的关系，即 AMR 曲线。

6.1 平行方向

图 (1) 中有两个谷值，分别为 31.041mV 和 31.32mV，取平均值为 $U_{0//}=31.181\text{mV}$ ；电流极值附近有两个电压饱和值，分别为 31.78mV 和 31.594mV，取平均值为 $U_{//}=31.687\text{mV}$ 。

6.2 垂直方向

图 (2) 中有两个峰值，分别为 31.17mV 和 31.394mV，取平均值为 $U_{0\perp}=31.282\text{mV}$ ；电流极值附近有两个电压饱和值，分别为 30.58mV 和 30.503mV，取平均值为 $U_{\perp}=30.541\text{mV}$ 。

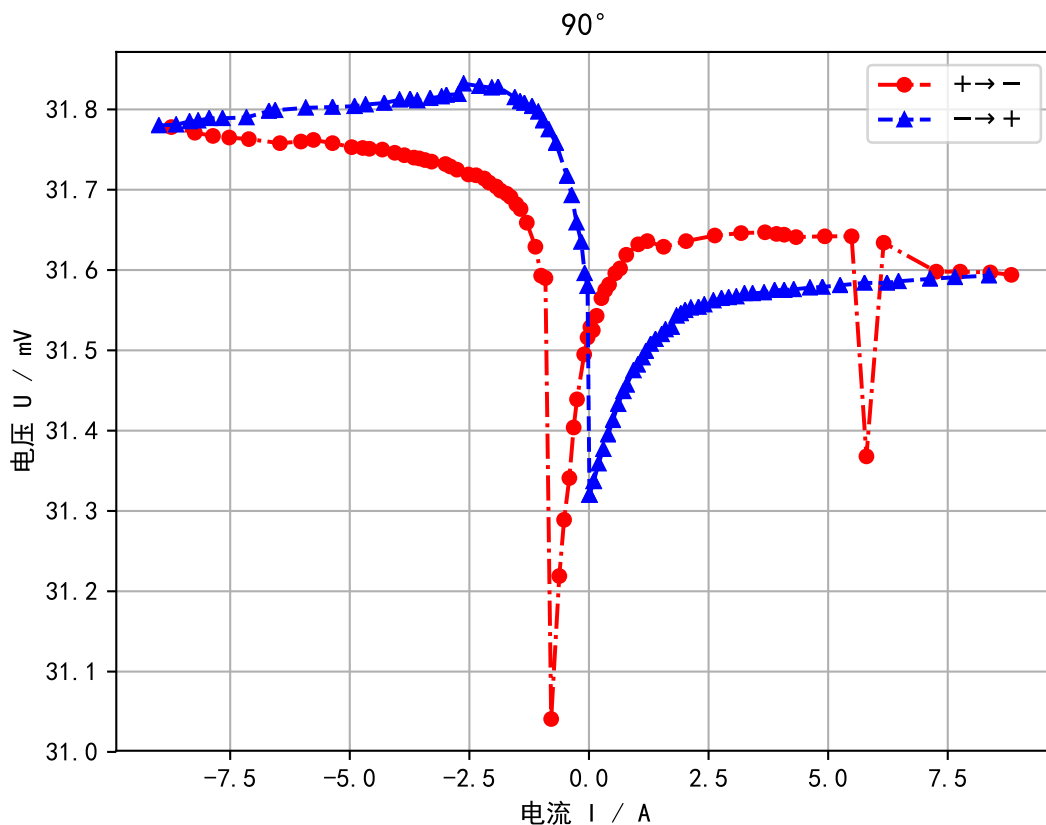


图 1: 平行方向数据图

6.3 计算 AMR

$$\text{AMR} = \frac{\Delta\rho_{\parallel} - \Delta\rho_{\perp}}{\rho_0} = \frac{U_{\parallel} - U_{\perp}}{U_0} = \frac{31.687 - 30.541}{\frac{31.181 + 31.282}{2}} \times 100\% \doteq 3.67\% \quad (1)$$

7 误差分析

1. 实验方法。教材中要求我们从 0 开始增加亥姆霍兹线圈的电流，而我认为这样的方法是不妥的，因为从 0 开始施加磁场，材料的磁畴可能仍处于杂乱状态，当磁场经历增大-减小-反向增大-减小的过程回到 0 时，材料的磁畴是处于有序状态的，即有剩余磁化，这样就和开始时测量的状态不一样。应该从磁场的极大或极小值开始测量。这也是图 (1) 和 (2) 中数据有一个极其陡峭的峰 (谷) 值的原因。
2. 仪器误差。实验中我们观察到实验所用的电压表有极其严重的漂移现象，放置一段时间按后同样环境的读数会增加 0.1mV 量级的偏差，而实验过程中我们读数时有一些停顿时间，这是实验数据误差的重要来源。
3. 随着实验的进行，样品通电时间越来越长，产生的热量越来越多，可能导致样品温度发生变化，从而造成误差。

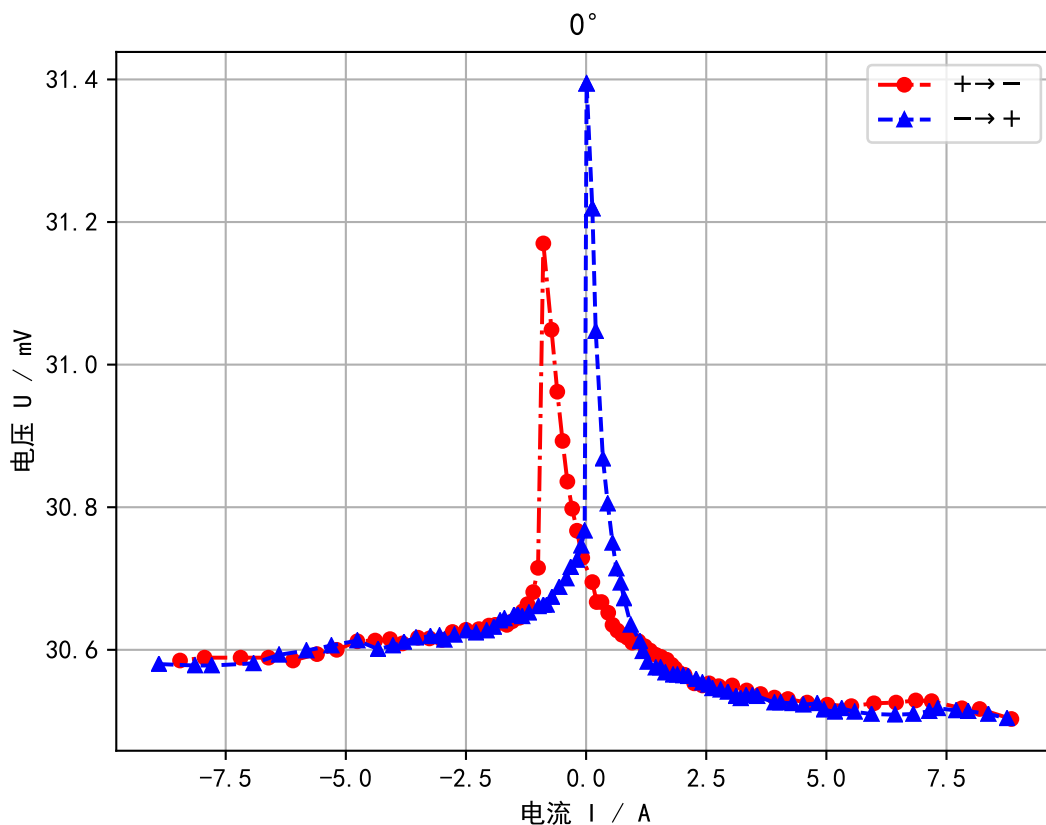


图 2: 垂直方向数据图

8 思考题

8.1 测量 AMR 后计算出来的 ρ_{av} 和 ρ_0 是否相同, 如不同说明什么问题?

$$U_0 = \frac{31.181 + 31.282}{2} = 31.231\text{mV} \quad (2)$$

$$U_{av} = \frac{U_{//} + 2U_{\perp}}{3} = \frac{31.687 + 2 \times 31.282}{3} = 31.590 \quad (3)$$

所以 ρ_{av} 和 ρ_0 的计算值不相等, 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的, 说明样品薄膜是各向异性的材料。

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

手动测量误差比较大, 而自动测量误差比较小, 由于实验中并没有自动测量, 实验图无法得知。由实验误差引起的情况可以看出自动测量的图形波动没有那么明显。在非零点应该基本上是一条直线, 在零点附近出现峰值。

8.3 手动测量与自动测量时如何更好的选择流过样品的电流的大小?

对于选取的电流根据样品的情况和测量仪表的精度所决定, 电流值不能太大, 否则会引起样品的发热而引起实验误差, 但是电流值也不宜太小, 否则测量起来会很不方便。本实验中选取的电

流值为 12.5mA。

8.4 测量中如何减小热效应对测量的影响？

1. 实验过程不能太长，电流长时间会引起热效应。
2. 通过样品的电流不能太大，要适中，电流越大，引起的热效应越明显。
3. 调节磁场电流的值不能太大，最好不要超过 6A。磁场电流太大，会提高测量环境的温度。电流越大热效应越明显。
4. 应尽量使装置放在通风的环境中，减小温度变化。

8.5 样品夹具采用的材料有何要求？

1. 对于样品夹具，接触电阻对实验有影响，因而对于夹具的材料，电阻值应该比较小，尽量减少接触电阻对实验的影响。夹具与样品的接触面积应比较小但必须有良好的接触。
2. 材料不要具有铁磁性，在磁场作用下性质不发生变化。

参考文献

- [1] 黄润生. 近代物理实验. 南京大学出版社, 2 edition, 2008.