

磁电阻测量

洪宇宸[†] 181840084

南京大学物理学院

摘要: 磁电阻

关键词: 磁电阻

1 引言

一般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 (Anisotropy magnetoresistance, 简记为 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 (giant magnetoresistance, 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。图 10.1-1 为早期报道的 Co-Cu 颗粒膜磁电阻曲线。

1994 年, 人们又发现 Fe/Al₂O₃/Fe 隧道结在 4.2 K 的 MR 为 30% , 室温达 18% , 见图 10.1-2。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 (Tunneling magnetoresistance 简记为 TMR)。现在 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 $10^3\% \sim 10^5\%$, 称之为庞磁电阻 (Colossal magnetoresistance, 简记为 CMR)。现在锰氧化物 CMR 材料的磁电阻饱和和磁场较高, 降低其饱和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, 这里不作介绍。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。

[†] Email: 181840084@smail.nju.edu.cn

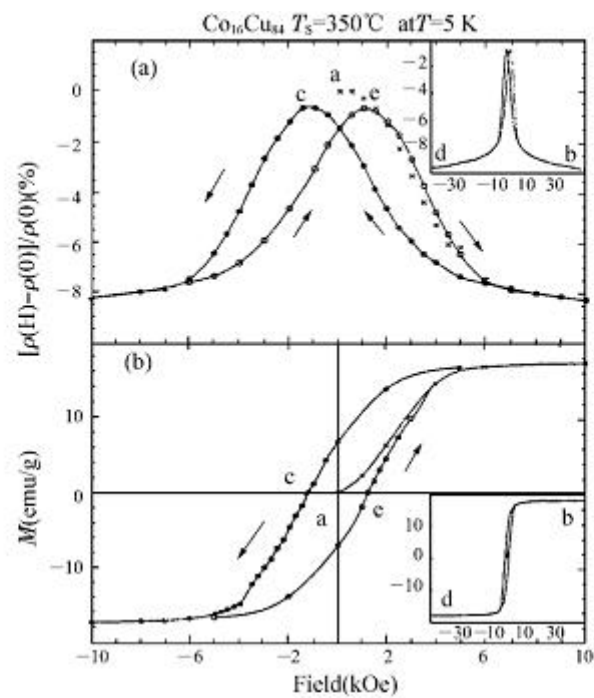


图 10.1-1

(a) 早期报道的 Co-Cu 颗粒膜的磁电阻曲线 (b) 早期报道的 Co-Cu 颗粒膜的磁滞回线

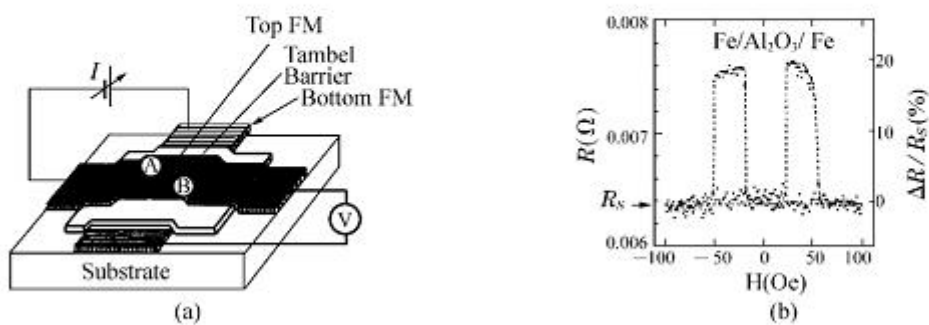


图 10.1-2

(a) F/I/F 隧道结的示意图 (b) 100 nm Fe/Al₂O₃/100 nm Fe 隧道结的磁电阻曲线

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 实验原理

$$\frac{\Delta\rho_{\parallel}}{\rho_{av}} = \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{av}}{\rho_{av}} > 0$$

$$\frac{\Delta\rho_{\perp}}{\rho_{av}} = \frac{\rho_{\perp} - \rho_{av}}{\rho_{av}} < 0$$

$$\frac{\Delta\rho_{\perp}}{\rho_{av}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta\rho_{\parallel}}{\rho_{av}}$$

AMR 常定义为

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

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。图 10.1-3 是曾用作磁盘读出磁头和磁场传感器材料的 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 的磁电阻曲线, 很明显 $\rho_{\parallel} > \rho(0)$, $\rho_{\perp} < \rho(0)$, 各向异性明显。图中的双峰是材料的磁滞引起的。图 10.1-4 是一些铁磁金属与合金薄膜的各向异性磁电阻曲线。

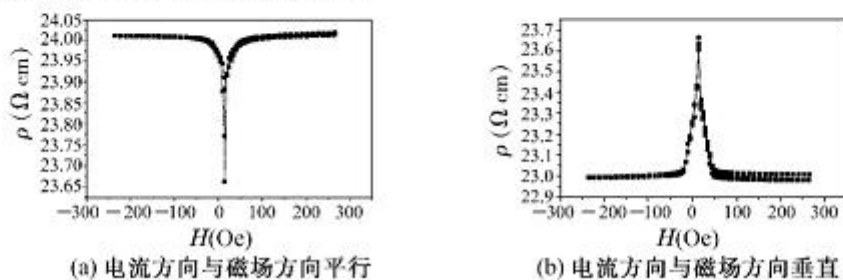


图 10.1-3 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 薄膜的磁电阻曲线

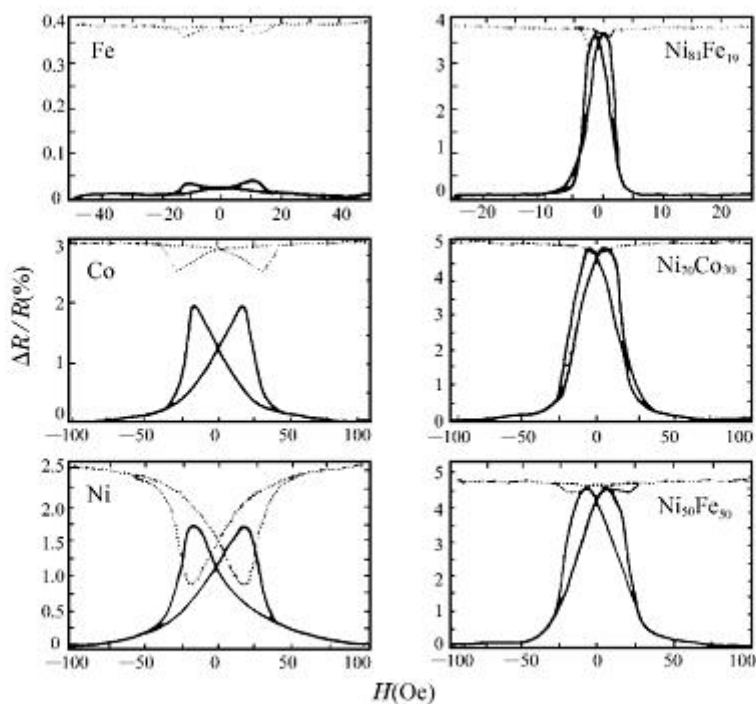


图 10.1-4 一些铁磁金属与合金薄膜的 AMR 曲线,
实线和虚线分别表示纵向和纵向的磁电阻

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 10.1-5 为这种多层膜的磁电阻曲线。由图可见, 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) 基本上是各向同性的。图中高场部分的双线分别对应于 $(MR)_{\parallel}$ 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。

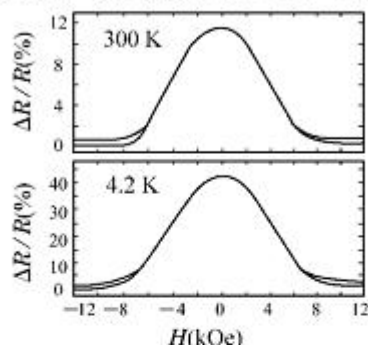


图 10.1-5 Fe/Cr 多层膜的 GMR 曲线

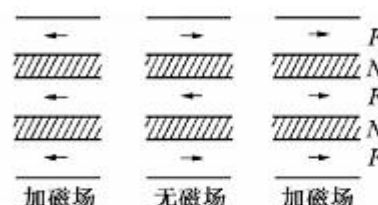


图 10.1-6 多层膜中有无外磁场磁化分布与电阻变化的示意图

(3) 多层膜的磁电阻按传统定义 $MR = \frac{\rho(H) - \rho(0)}{\rho(0)} \times 100\%$ 是负值, 恒小于 100%。常采用另一定义 $GMR = \frac{[\rho(0) - \rho(H)]}{\rho(H)} \times 100\%$, 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 M_i 反平行排列, 电阻最大, 加外磁场后, 各层 M_i 平行排列, 电阻最小。如图 10.1-6 所示。

(5) 除 Fe/Cr 多层膜外, 人们已在许多系统如 Fe/Cu, Fe/Al, Fe/Ag, Fe/Au, Fe/Mo, Co/Cu, Co/Al, Co/Ag, Co/Au, Co/Ru, 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 Fe/V 多层膜。

图 10.1-7 是 Si(100)/Fe(2.2 nm)/[Co2 nm/Cu2.1 nm]₁₅ 多层膜的磁电阻曲线。

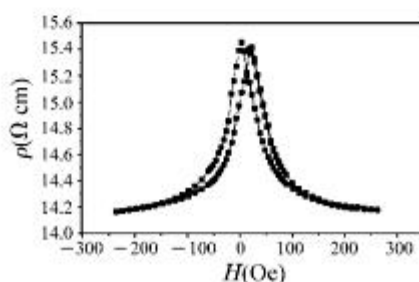


图 10.1-7 多层膜 Si(100)/Fe(2.2 nm)/[Co2 nm/Cu2.1 nm]₁₅ 的室温磁电阻曲线

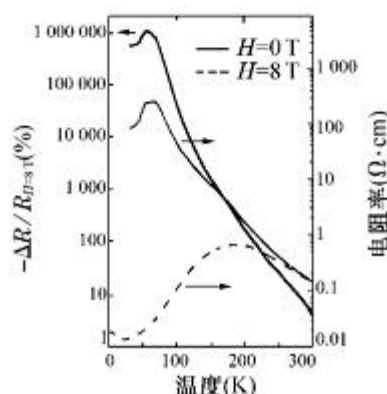


图 10.1-8 $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜样品的电阻率和磁电阻随温度变化关系, 其中 $MR > 10^5\%$

4 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。

5 实验内容

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: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 10.1-10 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。

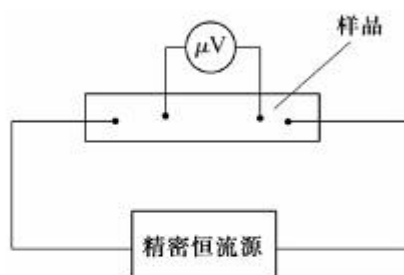


图 10.1-10 四探针法示意图

2. 测量

(1) 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,并作如图 10.1-9 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,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 g、h 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 e~j 步测量、记录。
- ⑫ 关闭所有仪器电源,将与亥姆霍兹线圈连接的恒流源换接成大功率扫描电源。将毫特斯拉计输出端与电脑 X-Y 记录仪的 X 输入端连接,将微伏表的放大输出端与电脑 X-Y 记录仪 Y 输入端连接,将电脑 X-Y 记录仪控制输出端与大功率扫描电源控制端连接。
- ⑬ 启动所有仪器,预热 5~15 分钟后,在计算机上启动自动测量记录程序,自动测出磁电阻曲线,将样品夹具转 90°再自动测出另一方向的磁电阻曲线。
- ⑭ 将手动测量记录的数据,绘制 R-H 曲线(横坐标为磁场大小,纵坐标为电阻大小)。
- ⑮ 计算出 ρ_{av} , 饱和磁化时间 $\Delta\rho_{//}$ 、 $\Delta\rho_{\perp}$ 以及 AMR。

(2) 测量金属多层膜的 GMR

①~⑭步与测量 Fe-Ni 膜的 AMR 一样。

第⑮步,比较垂直、平行两个方向的磁电阻曲线有何异同,作出合理的解释。

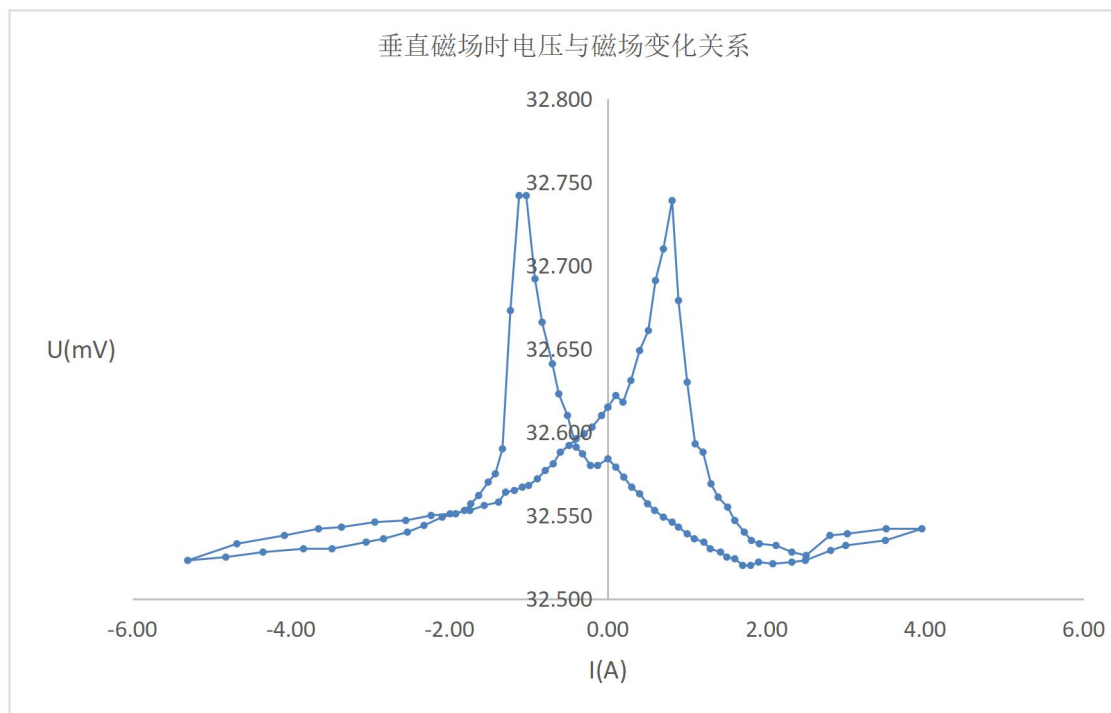
(3) 测量掺银 La-Ca-Mn-O 样品的 CMR

将亥姆霍兹线圈换成电磁铁,毫特斯拉计换成特斯拉计,所有测量步骤与测 GMR 相同。

6 数据记录与处理

(1) 电流与磁场方向垂直

记录的数据作图后如下所示：



图中两个峰值为 32.739mV、32.742mV，取平均为 32.741mV，完全磁化时为 32.542mV、32.523mV，取平均为 32.533mV，所以：

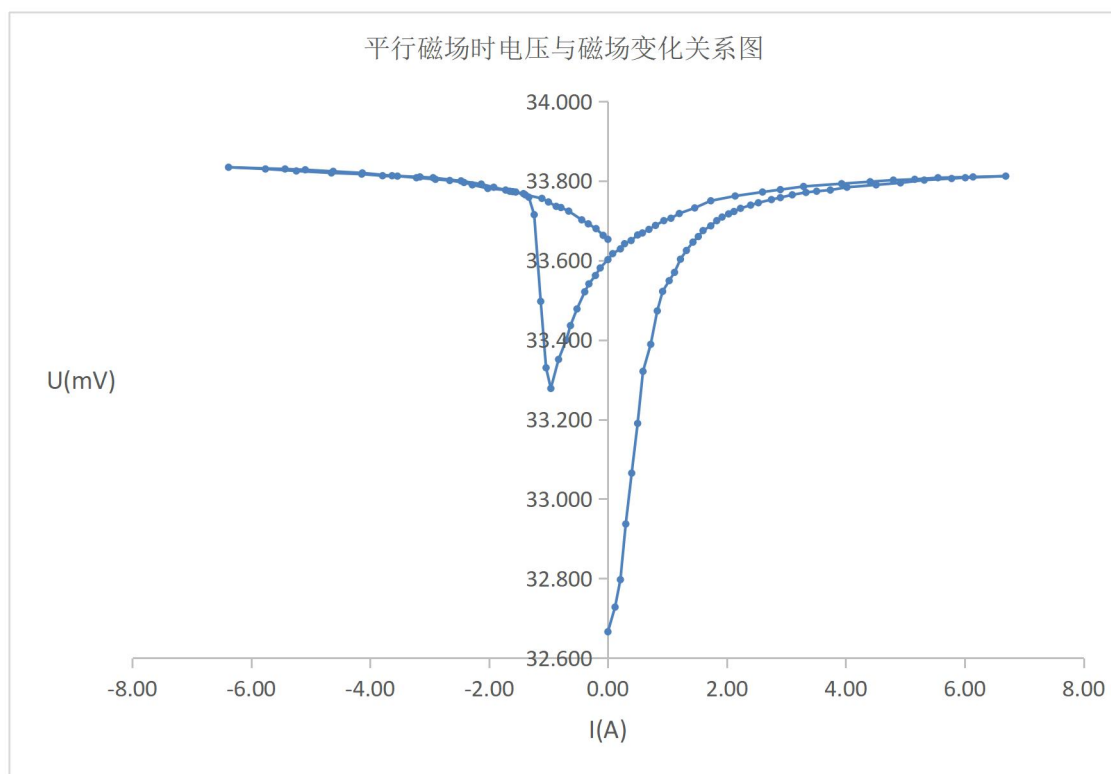
$$U_{0\perp} = 32.741\text{mV}$$

$$U_{\perp} = 32.533\text{mV}$$

$$\text{MR}_{\perp} = \frac{U_{0\perp} - U_{\perp}}{U_{0\perp}} \times 100\% = 0.635\%$$

(2) 电流与磁场方向平行

记录的数据作图后如下所示：



图中三个谷值为 32.666mV、33.653mV、33.278mV，取平均为 33.199mV，完全磁化时为 33.812mV、33.834mV，取平均为 33.823mV，所以：

$$U_{0\parallel} = 33.199mV$$

$$U_{\parallel} = 33.823mV$$

$$MR_{\perp} = \frac{U_{\parallel} - U_{0\parallel}}{U_{0\parallel}} \times 100\% = 1.88\%$$

$$U_0 = \frac{U_{0\parallel} + U_{0\perp}}{2} = \frac{33.199 + 32.741}{2} = 32.970mV$$

$$U_{av} = \frac{U_{0\parallel} + 2U_{0\perp}}{3} = \frac{33.199 + 2 \times 32.741}{3} = 32.894mV$$

$$\frac{32.894 - 32.970}{32.894} = -0.231\%, \text{ 可做 } U_{av} = U_0 \text{ 近似}$$

$$AMR = \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_0} = \frac{R_{\parallel} - R_{\perp}}{R_0} = \frac{U_{\parallel} - U_{\perp}}{U_0} = \frac{33.823 - 32.533}{\frac{33.199 + 32.741}{2}} \times 100\% = 3.913\%$$

7 实验分析和讨论

1. 在理想情况下，双峰或双谷应关于原点对称，但在该实验中，双峰和双谷关于原点有明显的偏移，这可能由样品的磁滞回线不对称引起，也可能由仪器的系统误差引起。

2. 随着测量时间的推移，测得的磁电阻曲线有明显向高电阻方向移动的趋势。电阻率增幅可达到 1% 左右，而实验最终的 AMR 为 3.913%，可见测量时间越长，由热效应引起的误差越大越不可忽略。在读取平行方向和垂直方向的饱和电压值时，我们对起始点和结束点的电压值取了平均，其实这并不合理。热效应对电阻率的影响到时第一次读数比第二次读数更加准确，

取平均导致饱和电压值偏高。但是由于计算 AMR 时有 $AMR = \frac{\rho_{||} - \rho_{\perp}}{\rho_0}$, 分母上两次饱和电压值相减, 消除了误差。

3. 两次实验开始和最终的饱和电压值都不一样, 这也有可能是因为磁滞的缘故还有可能是因为材料在此电压下还没有能达到饱和状态。更大的影响也是因为存在焦耳热对电阻率的正作用, 导致一定时间后电阻率增加。由于开始测量时热效应较微弱, 电压值也较小, 等一个周期的时间过去, 热效应变大, 回到起始点时电压值也变大。

4. 从数据结果来说, 在电流平行和垂直于磁场时, ρ_0 的值相差很小, 说明数据峰谷的读数较为准确。我们在计算中用平均值的方式比较合理。

5. 由于有测量步长的限制, 所取的点不能完全反应材料的特性, 特别是在峰值或估值附近, 数据变化太明显, 虽然减少了步长, 但是并不能准确读出峰值或谷值, 仍然存在一定的误差。

8 思考题

1. 测量 AMR 后计算出的 $\rho_{av}, \rho(0)$ 是否相同, 如不同说明什么问题?
2. 按前述步骤手动测出的磁电阻曲线与自动测出的磁电阻曲线有何异同, 为什么?
3. 手动测量与自动测量时, 如何更好地选取流过样品的测量电流大小?
4. 测量中如何减小热效应对测量的影响?
5. 样品夹具采用材料有何要求?

1. 测量 AMR 后计算出的 $\rho(0), \rho_{av}$ 是否相同, 如不同说明什么问题?

不同, 说明样品在退磁状态下有磁畴结构, 即磁畴分布并非完全各向同性。

2. 按前述步骤手动测出的磁电阻曲线与自动测出的磁电阻曲线有何异同, 为什么?

手动测出的磁电阻曲线相对于自动测出的磁电阻曲线有明显的基线漂移, 即随着测量时间的增加, 测得的曲线明显向高电阻方向移动。原因在于手动测量时间长, 电流通过样品产生的热效应不可忽略, 样品温度有显著升高, 使其电阻率明显变大。

3. 手动测量与自动测量时, 如何更好地选取流过样品的测量电流大小?

手动测量时, 测量电流不应太大, 否则热效应带来的影响过于突出; 自动测量时, 由于测量时间短, 测量电流可以较大, 以达到较好的实验精度。

4. 测量中如何减小热效应对测量的影响?

- (a) 测量应尽量迅速;
- (b) 测量时样品应处于良好通风环境中;
- (c) 必要时可以采用有关的恒温设备。

5. 样品夹具采用材料有何要求?

(a) 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。

(b) 材料不要具有铁磁性，在磁场作用下性质不发生变化。

9 参考文献

焦正宽, 曹光早. 磁电子学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005