

实验4 巨磁电阻效应及其应用

2023年秋季学期试用稿

人们早就知道过渡族金属铁、钴、镍能够出现铁磁性有序状态，后来又发现很多的过渡族金属和稀土金属的化合物具有反铁磁(或亚铁磁)有序状态，相关理论指出这些状态源于铁磁性原子磁矩之间的直接交换作用和间接交换作用。直接交换作用的特征长度为0.1 - 0.3 nm，间接交换作用可以长达1 nm以上。1 nm已经是实验室中人工微结构材料可以实现的尺度，所以，科学家们开始探索人工微结构中的磁交换作用。

1986年德国物理学家彼得·格伦贝格尔(Peter Grunberg)采用分子束外延(MBE)方法制备了铁-铬-铁三层单晶结构薄膜。发现对于非铁磁层铬的某个特定厚度，没有外磁场时，两边铁磁层磁矩是反平行的，这个新现象成为巨磁电阻(Giant Magneto Resistance, 简称GMR)效应出现的前提。进一步研究发现，两个磁矩反平行时对应高电阻状态，平行时对应低电阻状态，两种电阻状态的差别高达10%。

1988年法国物理学家阿尔贝·费尔(Albert Fert)的研究小组将铁、铬薄膜交替制成几十个周期的铁-铬超晶格薄膜，发现当改变磁场强度时，超晶格薄膜的电阻下降近一半，磁电阻变化率达到50%。这个前所未有的现象被称为巨磁电阻效应(GMR效应)。

GMR效应的发现，导致了自旋电子学的创立。GMR效应的应用大大改善了计算机读头的性能，使同样大小的计算机硬盘的容量提高了几百倍，从几百Mbit，提高到几百Gbit甚至上千Gbit。阿尔贝·费尔和彼得·格伦贝格尔因此获得2007年诺贝尔物理学奖。

【实验目的】

1. 了解多层膜GMR效应的原理
2. 掌握测量GMR传感器R-B磁阻特征曲线的方法
3. 了解 GMR 传感器的结构、特点，掌握 GMR 传感器的使用方法

【实验内容】

1. 测量GMR传感器的R-B特征曲线
2. 用GMR模拟传感器测量通电直导线电流
3. 利用GMR传感器测量角位移
4. 利用基于GMR效应的读写装置体验磁卡的工作原理

【实验仪器】

巨磁电阻实验仪，R-B基本特性组件，电流测量组件，角位移传感器组件，磁卡读写组件，磁卡，导线若干

【实验原理】

1. GMR效应的原理

根据导电的微观机理，金属中电子在导电时并不是沿电场直线前进，而是不断与处于晶格位置的原子实产生碰撞（又称散射），每次散射后电子都会改变运动方向，总的运动是电场对电子的定向加速和随机散射运动的叠加。电子在两次散射之间运动的平均路程被称为平均自由程。一般来说，电子散射几率越小，平均自由程就越长，电阻率就低。欧姆定律 $R=\rho l/S$ 应用于宏观材料时，通常忽略了边界效应，把电阻率 ρ 视为常数。当材料的几何尺度小到纳米量级，只有几个原子的厚度时（例如，铜原子的直径约为0.3 nm），电子在边界上的散射几率大大增加，因而可以明显观测到厚度减小，电阻率增加的现象。由于电子除携带电荷外，还具有自旋特性，在外磁场中电子自旋磁矩方向有平行或反平行于磁场的两种可能取向。早在1936年，物理学家N. F. Mott曾指出，在过渡族金属中，自旋磁矩与材料的磁场方向平行的电子，所受散射几率远小于自旋磁矩与材料的磁场方向反平行的电子。材料中电子自旋磁矩与外磁场平行和反平行的电子可被视为分别运行于两条各自独立的通道，材料的总电流是两类自旋电子电流之和，材料的总电阻为两条通道各自独立电阻的并联电阻，即两电流模型。

如图1所示，多层GMR结构中，无外磁场时，上下两层铁磁膜的磁矩是反平行（反铁磁）耦合的-因为这样能量最小。在足够强的外磁场作用下，铁磁膜的磁矩方向都与外磁场方向一致，外磁场使两层铁磁膜从反平行耦合变成了平行耦合。

有两类与自旋相关的散射对巨磁电阻效应都有贡献。

(1) 界面上的散射

无外磁场时，上下两层铁磁膜的磁场方向相反，无论电子的初始自旋状态如何，从一层铁磁膜进入另一层铁磁膜时都面临状态改变（平行→反平行或反平行→平行），电子在界面上的散射几率很大，对应于高电阻状态。有外磁场时，上下两层铁磁膜的磁场方向一致，电子在界面上的散射几率很小，对应于低电阻状态。

(2) 铁磁膜内的散射

由于无规散射，电子也有一定的几率在上下两层铁磁膜之间穿行。无外磁场时，上下两层铁磁膜的磁场方向相反，无论电子的初始自旋状态如何，在穿行过程中都会经历散射几率小（平行）和散射几率大（反平行）两种过程，两类自旋电子电流的并联电阻类似于两个中等阻



图 1 GMR 的多层膜结构

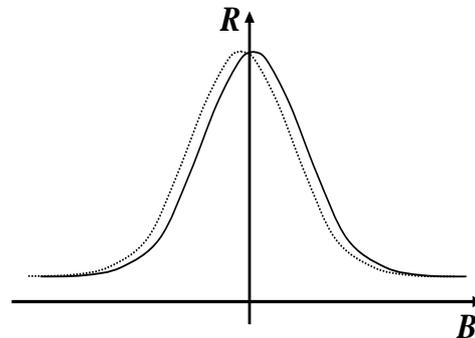


图 2 巨磁阻 R-B 特征曲线

值的电阻的并联，对应于高电阻状态。有外磁场时，上下两层铁磁膜的磁场方向一致，自旋平行的电子散射几率小，自旋反平行的电子散射几率大，两类自旋电子电流的并联电阻类似于一个小电阻与一个大电阻的并联，对应于低电阻状态。

图2是图1结构的一种GMR传感器的磁阻特性。由图中正向磁场方向可见，随着外磁场增大，电阻逐渐减小（图中实线），其间有一段线性区域，当外磁场使两铁磁膜磁场方向完全平行耦合后，继续加大磁场，电阻不再减小，同时达到磁饱和状态；从磁饱和状态开始减小磁场，电阻将逐渐增大（图中虚线）。两条曲线不重合是因为铁磁材料具有磁滞特性。加反向磁场与加正向磁场时的磁阻特性是对称的。

所有多层膜结构的GMR都是由外磁场改变两铁磁层与磁场的相对取向实现巨磁电阻效应，但结构及无外磁场时的耦合状态并不都与图1一样。如自旋阀结构的GMR，由钉扎层，被钉扎层，中间导电层和自由层构成。其中，钉扎层使用反铁磁材料，被钉扎层使用硬铁磁材料，铁磁和反铁磁材料在交换耦合作用下形成一个偏转场，此偏转场将被钉扎层的磁化方向固定，不随外磁场改变。自由层使用软铁磁材料，它的磁化方向易于随外磁场转动。这样，很弱的外磁场就会改变自由层与被钉扎层磁场的相对取向，对应于很高的灵敏度，上个世纪90年代和21世纪初硬盘所用的GMR磁头就采用这种结构。

2. GMR模拟传感器结构

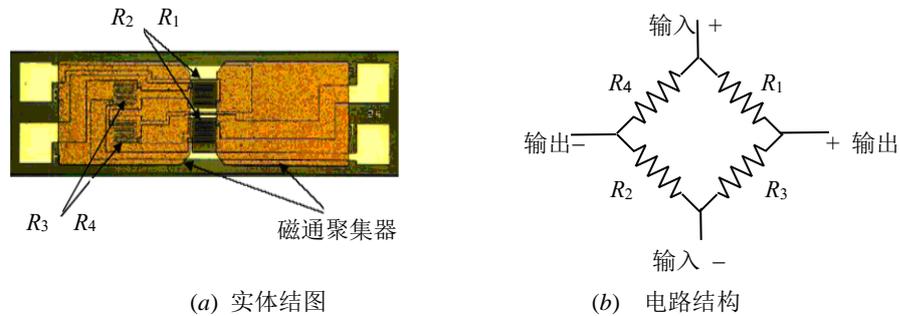


图 3 桥式巨磁阻传感器的结构

将GMR构成传感器时，为了消除温度变化等环境因素对测量的影响，一般采用桥式结构，如图3(b)所示。电桥结构的特点是当四个GMR对磁场的响应完全同步时，就不会有信号输出。因此，将处在电桥对角位置的两个电阻 R_3 、 R_4 覆盖一层高磁导率的材料如坡莫合金，以屏蔽外磁场对它们的影响；将电阻 R_1 、 R_2 直接面对外磁场使其阻值随外磁场变化而改变；屏蔽层同时设计为磁通聚集器，它的高磁导率将磁感应线聚集在 R_1 、 R_2 电阻所在的空间，进一步提高了 R_1 、 R_2 的磁灵敏度，如图3(a)所示。设桥式电路对应端的输入电压为 U_{IN} ，另一对应端输出电压为 U_{OUT} ，无外磁场时四个GMR的阻值均为 R ，当外磁场改变时电阻 R_1 、 R_2 的阻值在外磁场作用下减小 ΔR ，则输出电压为：

$$U_{OUT} = \frac{U_{IN} \Delta R}{(2R - \Delta R)} \quad (4-1)$$

由上式可以得到GMR模拟传感器的磁电转换特性，从而对有关物理量进行测量。另外，从图3(a)的实体几何结构还可看出，GMR被光刻成了微米宽度的迂回状的电阻条，目的是为了大大增大其电阻值，使其在较小工作电流下也能得到合适的电压输出，确保在一般的测试条件下也能得到合适的测量灵敏度。

由磁阻特性及(4-1)式可知，GMR模拟传感器在一定的范围内输出电压与磁感应强度成线性关系。其灵敏度要高于其它磁传感器，因此，可以方便的将GMR制成磁强计，测量磁感应强度或其它与磁场相关的物理量。例如，可以用它来以非接触的方式测量电流。在实际应用中，为了提高测量精度，必须使GMR模拟传感器工作在R-B特征曲线的线性区间，常常还需要给传感器施加一固定的已知磁场（称为磁偏置）调整传感器的响应区间。其原理类似于电子电路中的直流偏置。

【实验要求】

1. 测量GMR传感器的R-B特征曲线

(1) 测量原理提示

将GMR传感器置于螺线管磁场中，如图4所示，磁阻两端加上恒定电压，调节螺线管励磁电流，改变磁感应强度，记录对应改变的巨磁阻传感器工作电流 I 。

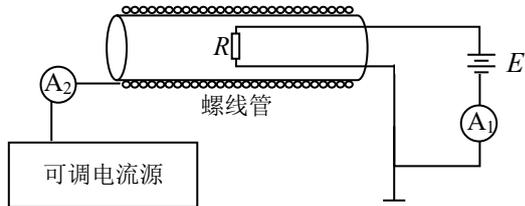


图 4 巨磁阻 R-B 特征曲线测试电路

(2) 测量要求与步骤

- ① 将 GMR 模拟传感器置于螺线管内中心位置，功能切换按钮调整到“巨磁阻测量”功能。
- ② 将实验仪的“电路供电”接到基本测量组件的“电路供电”；“巨磁电阻供电”与电流表串联后接到基本测量组件的“巨磁电阻供电”；恒流输出接到基本测量组件的“螺线管电流输入”。
- ③ 打开电源，调节“恒流调节”旋钮，首先将螺线管励磁电流调至150 mA，使巨磁阻传感器中的铁磁层饱和且同向。
- ④ 从150mA开始，逐渐减小励磁电流至0 mA，然后再反接励磁电流输出端以便得到反向的电流；逐渐增大反励磁向电流至-150 mA，使得铁磁层在反向饱和且同向；反向减小励磁电流至0 mA，然后再正接输出端；逐步增大励磁电流至正向150 mA。调整过程中需要根据曲线的走势选择合适的励磁电流调整步长，既可以是等间距的，也可以是非等间距的，但是选点一定要合理，能够正确反映出R-B特征曲线的变化规律。记录一系列 A_2 与相应的 A_1 表读数。
- ⑤ 测量结束后，调节“恒流调节”旋钮，使恒流输出归零，准备下一环节实验或者关机。

2. 用 GMR 模拟传感器测量电流

(1) 测量原理提示

将GMR传感器置于通电直导线旁边，如图5所示，用永磁体给传感器施加一磁偏置。改变导线电流，记录GMR传感器输出电压值。

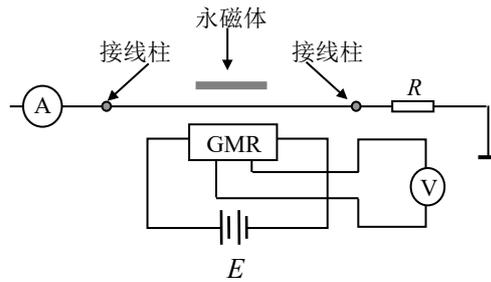


图 5 用巨磁阻传感器测量通电直导线电流测试电路

(2) 测量要求与步骤

- ① 将实验仪的“巨磁电阻供电”接到电流测量组件的“巨磁电阻供电”；恒流输出接到电流测量组件的“待测电流输入”；电压表接到电流测量组件的“信号输出”。
- ② 打开电源，调节偏置磁铁到远离 GMR 模拟传感器位置，即弱磁偏置状态。
- ③ 逐步调整恒流源输出电流，使直导线的电流值从0 mA增大到200mA，再从200 mA减小到0 mA。调整间隔视变化情况选定，但应合理反映曲线变化过程。记录此过程中一系列A表和相应V表的读数。测量升电流和降电流曲线的目的是为了确定在该偏置条件下，GMR传感器的输出状态是否重合。不重合的话将难以用来进行定量检测。
- ④ 将偏置磁体转到接近GMR模拟传感器位置，即较强磁偏置状态，重复前面的测量过程。
- ⑤ 将电流输出调整到0 mA在，准备下一步实验或者关机。

3. GMR 梯度传感器的特性及应用

将 GMR 桥式结构的两对对角电阻分别置于集成电路两端，4 个电阻不加磁屏蔽，对均匀磁场，电桥输出为零，对梯度磁场，各 GMR 电阻感受到的磁场不同，电桥会有信号输出，从而构成梯度传感器。利用梯度传感器测量齿轮的位移。

实验装置：巨磁阻实验仪，角位移测量组件。

4. 磁记录与读出

用磁卡做记录介质，利用绕线磁芯做写入磁头，用GMR传感器做读取磁头。磁卡磁条上的磁性物质只有两个稳定的磁化方向，可以分别代表数字信号中的0和1。当磁卡通过写入磁头时，可以通过磁头分别改变磁条中不同位置的磁化方向，代表一定的数据信息。当磁卡通过读取磁头时，磁卡中不同取向的磁化区域会产生不同的外磁场，使GMR传感器电阻分别居于高低阻态，将磁卡中存储的数据重新转化电信号。可自行设计二进制码，完成磁读写过程。

实验装置：巨磁阻实验仪，磁读写组件，磁卡。

【数据处理及结果分析】

1. 基于书中给出的公式，列表计算GMR传感器和磁感应强度 B 的大小，并在坐标纸上或者计算机上绘制出 R - B 特征曲线的散点折线图。（其中 $B = \mu_0 n I$ ）。
2. 以通电直导线的电流值 I 为横坐标，GMR传感器的输出电压 U 为纵坐标，在在坐标纸上或者计算机上绘制出不同偏置状态下的变化曲线；确认和指出升电流和降电流过程的曲线是否重合，是否是线性变化；分别计算不同磁偏置下的测量灵敏度，即 I 变化单位大小时， U 的变化值。
3. 记录GMR梯度传感器两个电压变化周期的数据。用计算机处理程序（建议Python）画出散点折线图。

4. 对某个整数数值（小于256）进行8位二进制编码，把编码值写入磁卡。记录读取的二进制各位的传感器输出数值。判断二进制的0和1分别对应于怎样的物理电压值。

建议用 Python 进行数据处理：

1. 参考霍尔效应与磁场测量实验讲义中的相关部分，安装 Anconda, 打开 Spyder 或 Jupyter Notebook
2. 参考 Python 例程，编写处理本实验数据的程序。设计测试数据，验证程序的正确性。
3. 完成实验的原始数据记录后，利用编写的程序对数据进行处理。

【分析讨论题】

1. 试分析不同磁偏置影响电流测量灵敏度的原因是什么？
2. 如何理解磁阻特性变化过程的物理机理？
3. 试讨论梯度传感器的特点，并分析梯度传感器可否用于车辆流量测量？

【参考资料】

1. 吴镛，都有为. 巨磁电阻效应的原理及其应用[J]. 自然杂志，2007，29(6):322-327.
2. 邢定钰. 自旋输运和巨磁电阻[J]. 物理，2005，34（5）：348-361.
3. 吴建华，李伯减，蒲富格等. 平行与垂直磁化下多层磁膜巨磁电阻与外磁场关系的唯象理论计算[J]. 物理学报，1994，43(1):110-116.

(白洪亮，姚志，李宏)