



# **ZKY-JCZ**

## **巨磁电阻效应及应用实验仪**

### **实验指导及操作说明书**

**四川世纪中科光电技术有限公司**

地址：四川省成都经济技术开发区（龙泉驿区）南二路 309 号      邮编：610100

电话：(028) 61430706 61430729      传真：(028) 64082508

网址：[WWW.ZKY.Cn](http://WWW.ZKY.Cn)      E-mail: ZKY@ZKY.Cn

2015-11-30

# 巨磁电阻效应及其应用

2007 年诺贝尔物理学奖授予了巨磁电阻( Giant magneto resistance,简称 GMR)效应的发现者: 法国物理学家阿尔贝·费尔(Albert Fert)和德国物理学家彼得·格伦贝格尔( Peter Grunberg )。诺贝尔奖委员会说明:“这是一次好奇心导致的发现,但其随后的应用却是革命性的,因为它使计算机硬盘的容量从几百、几千兆,一跃而提高几百倍,达到几百 G 乃至上千 G。”

凝聚态物理研究原子,分子在构成物质时的微观结构,它们之间的相互作用力,及其与宏观物理性质之间的联系。

人们早就知道过渡金属铁、钴、镍能够出现铁磁性有序状态。量子力学出现后,德国科学家海森伯(W. Heisenberg, 1932 年诺贝尔奖得主)明确提出铁磁性有序状态源于铁磁性原子磁矩之间的量子力学交换作用,这个交换作用是短程的,称为直接交换作用。



图 1 反铁磁有序

后来发现很多的过渡金属和稀土金属的化合物具有反铁磁有序状态,即在有序排列的磁材料中,相邻原子因受负的交换作用,自旋为反平行排列,如图 1 所示。则磁矩虽处于有序状态,但总的净磁矩在不受外场作用时仍为零。这种磁有序状态称为反铁磁性。法国科学家奈尔(L. E. F. Neel)因为系统地研究反铁磁性而获 1970 年诺贝尔奖。在解释反铁磁性时认为,化合物中的氧离子(或其他非金属离子)作为中介,将最近的磁性原子的磁矩耦合起来,这是间接交换作用。另外,在稀土金属中也出现了磁有序,其中原子的固有磁矩来自 4f 电子壳层。相邻稀土原子的距离远大于 4f 电子壳层直径,所以稀土金属中的传导电子担当了中介,将相邻的稀土原子磁矩耦合起来,这就是 RKKY 型间接交换作用。

直接交换作用的特征长度为 0.1~0.3nm,间接交换作用可以长达 1nm 以上。1nm 已经是实验室中人工微结构材料可以实现的尺度。1970 年美国 IBM 实验室的江崎和朱兆祥提出了超晶格的概念,所谓的超晶格就是指由两种(或两种以上)组分(或导电类型)不同、厚度 d 极小的薄层材料交替生长在一起而得到的一种多周期结构材料。由于这种复合材料的周期长度比各薄膜单晶的晶格常数大几倍或更长,因此取得“超晶格”的名称。上世纪八十年代,由于摆脱了以往难以制作高质量的纳米尺度样品的限制,金属超晶格成为研究前沿,凝聚态物理工作者对这类人工材料的磁有序,层间耦合,电子输运等进行了广泛的基础方面的研究。

德国尤利希科研中心的物理学家彼得·格伦贝格尔一直致力于研究铁磁性金属薄膜表面和界面上的磁有序状态。研究对象是一个三明治结构的薄膜,两层厚度约 10nm 的铁层之间夹有厚度为 1nm 的铬层。选择这个材料系统并不是偶然的,首先金属铁和铬是周期表上相近的元素,具有类似的电子壳层,容易实现两者的电子状态匹配。其次,金属铁和铬的晶格对称性和晶格常数相同,它们之间晶格结构也是匹配的,这两类匹配非常有利于基本物理过程的探索。但是,很长时间以来制成的三明治薄膜都是多晶体,格伦贝格尔和很多研究者一样,并没有特别的发现。直到 1986 年,他采用了分子束外延(MBE)方法制备薄膜,样品成分还是铁-铬-铁三层膜,不过已经是结构完整的单晶。在此金属三层膜上利用光散射以获得铁磁矩的信息,实验中逐步减小薄膜上的外磁场,直到取消外磁

场。他们发现，在铬层厚度为 0.8nm 的铁-铬-铁三明治中，两边的两个铁磁层磁矩从彼此平行(较强磁场下)转变为反平行(弱磁场下)。换言之，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效应出现的前提。既然磁场可以将三明治两个铁磁层磁矩在彼此平行与反平行之间转换，相应的物理性质会有什么变化？格伦贝格尔接下来发现，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，两个电阻的差别高达 10%。格伦贝格尔将结果写成论文，与此同时，他申请了将这种效应和材料应用于硬盘磁头的专利。当时的申请需要一定的胆识，因为铁-铬-铁三明治上出现巨磁电阻效应所需磁场高达上千高斯，远高于硬盘上磁比特单元能够提供的磁场，但日后不断改进的结构和材料，使这个设想成为现实。

另一方面，1988 年巴黎十一大学固体物理实验室物理学家阿尔贝·费尔的小组将铁、铬薄膜交替制成几十个周期的铁-铬超晶格，也称为周期性多层膜。他们发现，当改变磁场强度时，超晶格薄膜的电阻下降近一半，即磁电阻比率达到 50%。他们称这个前所未有的电阻巨大变化现象为巨磁电阻，并用两电流模型解释这种物理现象。显然，周期性多层膜可以被看成是若干个格伦贝格尔三明治的重叠，所以德国和法国的两个独立发现实际上是同一个物理现象。

人们自然要问，在其它过渡金属中，这个奇特的现象是否存在？IBM 公司的斯图尔特·帕金 (S. P. Parkin) 给出了肯定的回答。1990 年他首次报道，除了铁-铬超晶格，还有钴-钌和钴-铬超晶格也具有巨磁电阻效应。并且随着非磁层厚度增加，上述超晶格的磁电阻值振荡下降。在随后的几年，帕金和世界范围的科学家在过渡金属超晶格和金属多层膜中，找到了 20 种左右具有巨磁电阻振荡现象的不同体系。帕金的发现在技术层面上特别重要。首先，他的结果为寻找更多的 GMR 材料开辟了广阔空间，最后人们的确找到了适合硬盘的 GMR 材料，1997 年制成了 GMR 磁头。其次，帕金采用较普通的磁控溅射技术，代替精密的 MBE 方法制备薄膜，目前这已经成为工业生产多层膜的标准，磁控溅射技术克服了物理发现与产业化之间的障碍。使巨磁电阻成为基础研究快速转换为商业应用的国际典范。同时，巨磁电阻效应也被认为是纳米技术的首次真正应用。

诺贝尔奖委员会还指出：“巨磁电阻效应的发现打开了一扇通向新技术世界的大门——自旋电子学，这里，将同时利用电子的电荷以及自旋这两个特性。”

GMR 作为自旋电子学的开端具有深远的科学意义。传统的电子学是以电子的电荷移动为基础的，电子自旋往往被忽略了。巨磁电阻效应表明，电子自旋对于电流的影响非常强烈，电子的电荷与自旋两者都可能载运信息。自旋电子学的研究和发展，引发了电子技术与信息技术的一场新的革命。目前电脑，音乐播放器等各类数码电子产品中所装备的硬盘磁头，基本上都应用了巨磁电阻效应。利用巨磁电阻效应制成的多种传感器，已广泛应用于各种测量和控制领域。除利用铁磁膜-金属膜-铁磁膜的 GMR 效应外，由两层铁磁膜夹一极薄的绝缘膜或半导体膜构成的隧穿磁阻(TMR)效应，已显示出比 GMR 效应更高的灵敏度。除在多层膜结构中发现 GMR 效应，并已实现产业化外，在单晶，多晶等多种形态的钙钛矿结构的稀土锰酸盐中，以及一些磁性半导体中，都发现了巨磁电阻效应。

本实验介绍多层膜 GMR 效应的原理，并通过实验让学生了解几种 GMR 传感器的结构、特性及应用领域。

## 实验目的

1. 了解 GMR 效应的原理
2. 测量 GMR 模拟传感器的磁电转换特性曲线
3. 测量 GMR 的磁阻特性曲线
4. 测量 GMR 开关（数字）传感器的磁电转换特性曲线
5. 用 GMR 传感器测量电流
6. 用 GMR 梯度传感器测量齿轮的角位移，了解 GMR 转速（速度）传感器的原理
7. 通过实验了解磁记录与读出的原理

## 实验原理

根据导电的微观机理，电子在导电时并不是沿电场直线前进，而是不断和晶格中的原子产生碰撞（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与这种无规则散射运动的叠加。称电子在两次散射之间走过的平均路程为平均自由程，电子散射几率小，则平均自由程长，电阻率低。电阻定律  $R=\rho l/S$  中，把电阻率  $\rho$  视为常数，与材料的几何尺度无关，这是因为通常材料的几何尺度远大于电子的平均自由程（例如铜中电子的平均自由程约 34nm），可以忽略边界效应。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 0.3nm），电子在边界上的散射几率大大增加，可以明显观察到厚度减小，电阻率增加的现象。

电子除携带电荷外，还具有自旋特性，自旋磁矩有平行或反平行于外磁场两种可能取向。早在 1936 年，英国物理学家、诺贝尔奖获得者 N.F.Mott 指出：在过渡金属中，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。总电流是两类自旋电流之和；总电阻是两类自旋电流的并联电阻，这就是所谓的两电流模型。

在图 2 所示的多层膜结构中，无外磁场时，上下两层磁性材料是反平行（反铁磁）耦合的。施加足够强的外磁场后，两层铁磁膜的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。电流的方向在多数应用中是平行于膜面的。

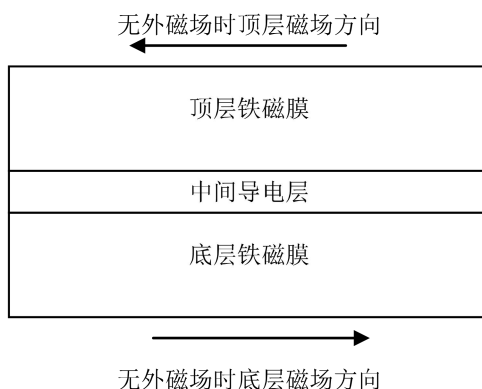


图 2 多层膜 GMR 结构图

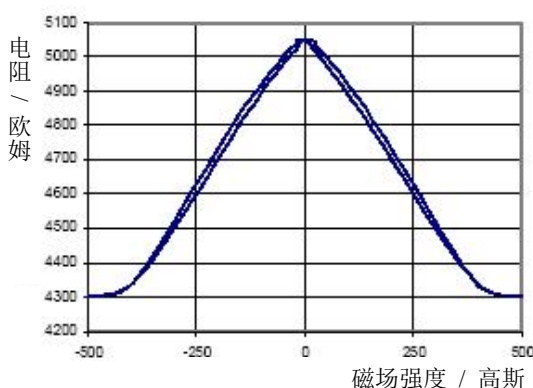


图 3 某种 GMR 材料的磁阻特性

图 3 是图 2 结构的某种 GMR 材料的磁阻特性。由图 3 可见，随着外磁场增大，电阻逐渐减小，其间有一段线性区域。当外磁场已使两铁磁膜完全平行耦合后，继续加大磁场，电阻不再减小，进入磁饱和区域。磁阻变化率  $\Delta R/R$  达百分之十几，加反向磁场时磁阻特性是对称的。注意到图 3 中的曲线有两条，分别对应增大磁场和减小磁场时的磁阻特性，这是因为铁磁材料都具有磁滞特性。

有两类与自旋相关的散射对巨磁电阻效应有贡献。

其一，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。

其二，铁磁膜内的散射。即使电流方向平行于膜面，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，两类自旋电流的并联电阻相似两个中等阻值的电阻的并联，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，两类自旋电流的并联电阻相似一个小电阻与一个大电阻的并联，对应于低电阻状态。

多层膜 GMR 结构简单，工作可靠，磁阻随外磁场线性变化的范围大，在制作模拟传感器方面得到广泛应用。在数字记录与读出领域，为进一步提高灵敏度，发展了自旋阀结构的 GMR。如图 4 所示。

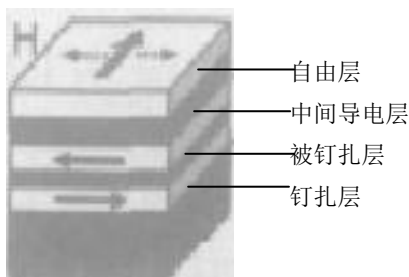


图 4 自旋阀 SV-GMR 结构图

自旋阀结构的 SV-GMR(Spin valve 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。制造时，使自由层的初始磁化方向与被钉扎层垂直，磁记录材料的磁化方向与被钉扎层的方向相同或相反（对应于 0 或 1），当感应到磁记录材料的磁场时，自由层的磁化方向就向与被钉扎层磁化方向相同（低电阻）或相反（高电阻）的方向偏转，检测出电阻的变化，就可确定记录材料所记录的信息，硬盘所用的 GMR 磁头就采用这种结构。

我们实验仪器 GMR 材料的多层结构是基于一个 Ni-Fe-Co 磁性层和 Cu 间隔层。

## 仪器介绍

### 1. 实验仪



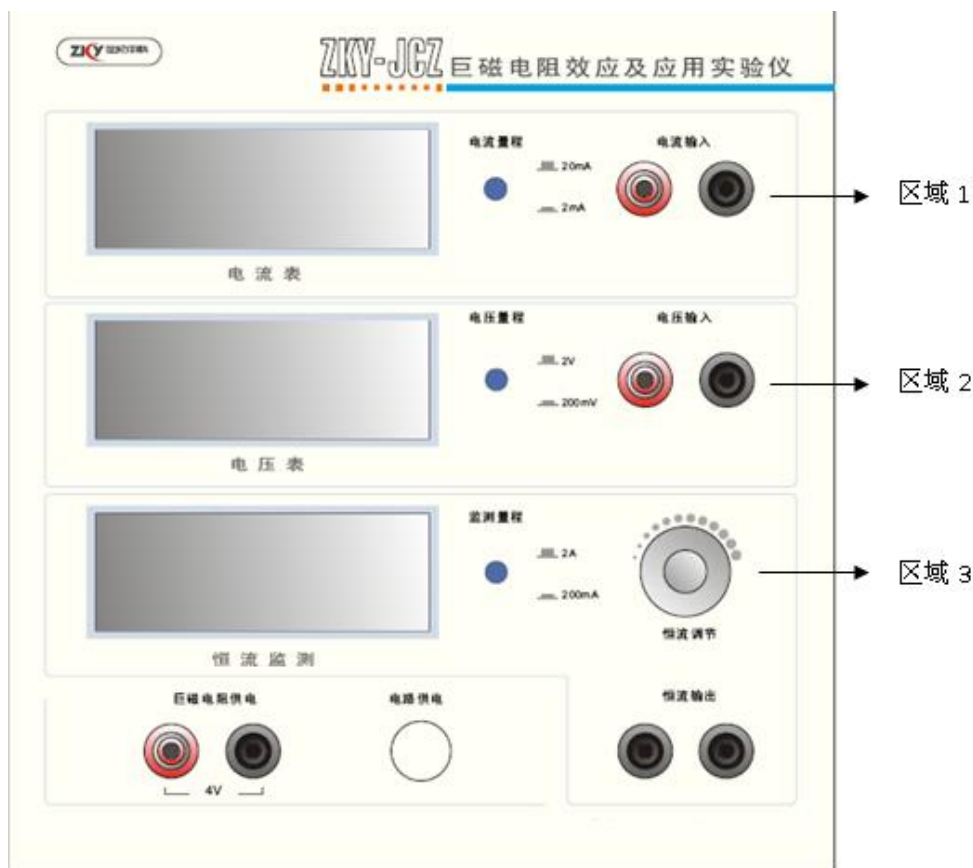


图 5 巨磁阻实验仪操作面板

图 5 所示为实验系统的实验仪前面板图。

区域 1——电流表部分：作为一个独立的电流表使用。

两个档位：2mA 档和 20mA 档，可通过电流量程切换开关选择合适的电流档位测量电流。

区域 2——电压表部分：作为一个独立的电压表使用。

两个档位：2V 档和 200mV 档，可通过电压量程切换开关选择合适的电压档位。

区域 3——恒流源部分：可变恒流源。

实验仪还提供 GMR 传感器工作所需的 4V 电源和运算放大器工作所需的 $\pm 8V$  电源。

## 2. 基本特性组件



图 6 基本特性组件

基本特性组件由 GMR 模拟传感器，螺线管线圈及比较电路，输入输出插孔组成。用以对 GMR 的磁电转换特性，磁阻特性进行测量。

GMR 传感器置于螺线管的中央。

螺线管用于在实验过程中产生大小可计算的磁场，由理论分析可知，无限长直螺线管内部轴线上任一点的磁感应强度为：

$$B = \mu_0 n I \quad (1)$$

式中  $n$  为线圈密度， $I$  为流经线圈的电流强度， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  为真空中的磁导率。采用国际单位制时，由上式计算出的磁感应强度单位为特斯拉（1 特斯拉 = 10000 高斯）。

### 3. 电流测量组件



图 7 电流测量组件

电流测量组件将导线置于 GMR 模拟传感器近旁，用 GMR 传感器测量导线通过不同大小电流时导线周围的磁场变化，就可确定电流大小。与一般测量电流需将电流表接入电路相比，这种非接触测量不干扰原电路的工作，具有特殊的优点。

### 4. 角位移测量组件



图 8 角位移测量组件

角位移测量组件用巨磁阻梯度传感器作传感元件，铁磁性齿轮转动时，齿牙干扰了梯度传感器上偏置磁场的分布，使梯度传感器输出发生变化，每转过一齿，就输出类似正弦波一个周期的波形。利用该原理可以测量角位移（转速，速度）。汽车上的转速与速度测量仪就是利用该原理制成的。

## 5. 磁读写组件



图 9 磁读写组件

磁读写组件用于演示磁记录与读出的原理。磁卡做记录介质，磁卡通过写磁头时可写入数据，通过读磁头时将写入的数据读出来。

## 实验内容与步骤

### 1. GMR 模拟传感器的磁电转换特性测量

在将 GMR 构成传感器时，为了消除温度变化等环境因素对输出的影响，一般采用桥式结构，图 10 是某型号传感器的结构。

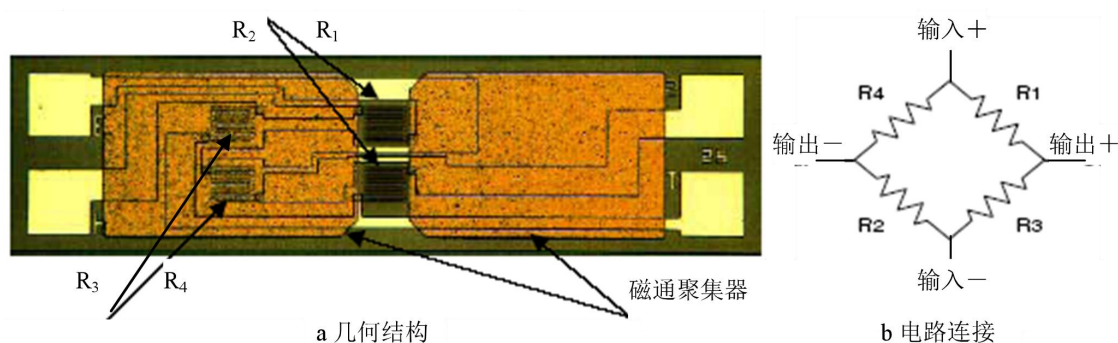


图 10 GMR 模拟传感器结构图

对于电桥结构，如果 4 个 GMR 电阻对磁场的响应完全同步，就不会有信号输出。图 10 中，将处在电桥对角位置的两个电阻  $R_3$ 、 $R_4$  覆盖一层高导磁率的材料如坡莫合金，以屏蔽外磁场对它们的影响，而  $R_1$ 、 $R_2$  阻值随外磁场改变。设无外磁场时 4 个 GMR 电阻的阻值均为  $R$ ， $R_1$ 、 $R_2$  在外磁场作用下电阻减小  $\Delta R$ ，简单分析表明，输出电压：



$$U_{OUT}=U_{IN}\Delta R/(2R-\Delta R) \quad (2)$$

屏蔽层同时设计为磁通聚集器，它的高导磁率将磁力线聚集在  $R_1$ 、 $R_2$  电阻所在的空间，进一步提高了  $R_1$ 、 $R_2$  的磁灵敏度。

从图 10 的几何结构还可见，巨磁电阻被光刻成微米宽度迂回状的电阻条，以增大其电阻至  $k\Omega$ ，使其在较小工作电流下得到合适的电压输出。

图 11 是某 GMR 模拟传感器的磁电转换特性曲线。图 12 是磁电转换特性的测量原理图。

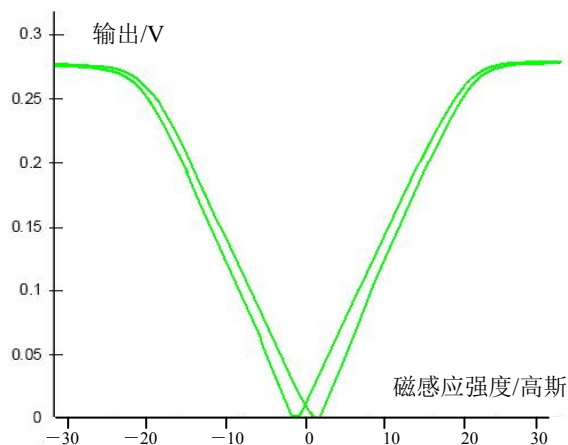


图 11 GMR 模拟传感器的磁电转换特性

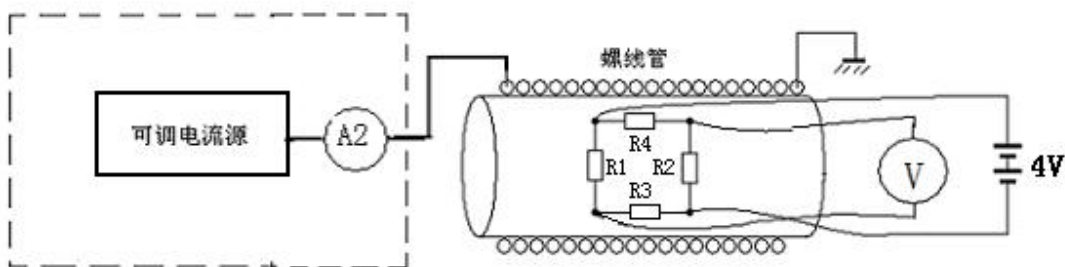


图 12 模拟传感器磁电转换特性实验原理图

实验装置：巨磁阻实验仪，基本特性组件。

将 GMR 模拟传感器置于螺线管磁场中，功能切换按钮切换为“传感器测量”。实验仪的 4V 电压源接至基本特性组件“巨磁电阻供电”，恒流源接至“螺线管电流输入”，基本特性组件“模拟信号输出”接至实验仪电压表。

按表 1 数据，调节励磁电流，逐渐减小磁场强度，记录相应的输出电压于表格“减小磁场”列中。由于恒流源本身不能提供负向电流，当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时流经螺线管的电流与磁感应强度的方向为负，从上到下记录相应的输出电压。

电流至 -100mA 后，逐渐减小负向电流，电流到 0 时同样需要交换恒流输出接线的极性。从下到上记录数据于“增大磁场”列中。

理论上讲，外磁场为零时，GMR 传感器的输出应为零，但由于半导体工艺的限制，4 个桥臂电阻值不一定完全相同，导致外磁场为零时输出不一定为零，在有的传感器中可以观察到这一现象。

表 1 GMR 模拟传感器磁电转换特性的测量

电桥电压：4V

磁感应强度/高斯		输出电压/mV	
励磁电流/mA	磁感应强度/高斯	减小磁场	增大磁场
100			
90			
80			
70			
60			
50			
40			
30			
20			
10			
5			
0			
-5			
-10			
-20			
-30			
-40			
-50			
-60			
-70			
-80			
-90			
-100			

根据螺线管上标明的线圈密度，由公式（1）计算出螺线管内的磁感应强度B。

以磁感应强度B作横坐标，电压表的读数为纵坐标做出磁电转换特性曲线。

不同外磁场强度时输出电压的变化反映了 GMR 传感器的磁电转换特性，同一外磁场强度下输出电压的差值反映了材料的磁滞特性。

## 2. GMR 磁阻特性测量

为加深对巨磁电阻效应的理解，我们对构成 GMR 模拟传感器的磁阻进行测量。将基本特性组件的功能切换按钮切换为“巨磁阻测量”，此时被磁屏蔽的两个电桥电阻  $R_3$ 、 $R_4$  被短路，而  $R_1$ 、 $R_2$  并联。将电流表串连进电路中，测量不同磁场时回路中电流的大小，就可计算磁阻。测量原理如图 13 所示。

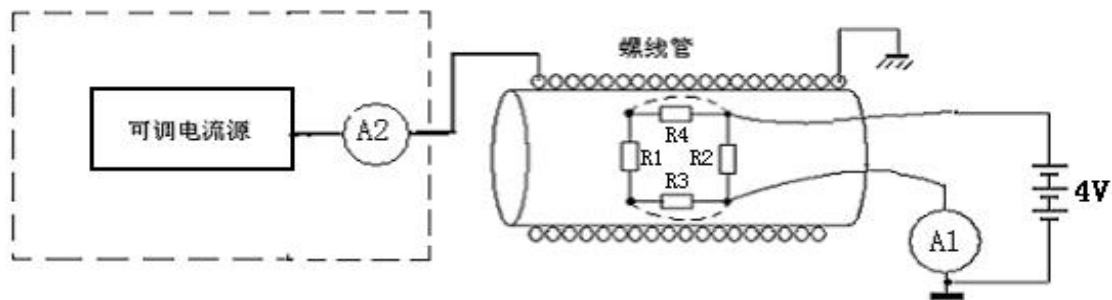


图 13 磁阻特性测量原理图

实验装置：巨磁阻实验仪，基本特性组件。

将 GMR 模拟传感器置于螺线管磁场中，功能切换按钮切换为“巨磁阻测量”实验仪的 4 伏电压源串连电流表后接至基本特性组件“巨磁电阻供电”，恒流源接至“螺线管电流输入”。

按表 2 数据，调节励磁电流，逐渐减小磁场强度，记录相应的磁阻电流于表格“减小磁场”列中。由于恒流源本身不能提供负向电流，当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时流经螺线管的电流与磁感应强度的方向为负，从上到下记录相应的输出电压。

电流至 -100mA 后，逐渐减小负向电流，电流到 0 时同样需要交换恒流输出接线的极性。从下

到上记录数据于“增大磁场”列中。

表 2 GMR 磁阻特性的测量

磁阻两端电压：4V

磁感应强度/高斯		磁阻/ $\Omega$			
		减小磁场		增大磁场	
励磁电流/mA	磁感应强度/高斯	磁阻电流/mA	磁阻/ $\Omega$	磁阻电流/mA	磁阻/ $\Omega$
100					
90					
80					
70					
60					
50					
40					
30					
20					
10					
5					
0					
-5					
-10					
-20					
-30					
-40					
-50					
-60					
-70					
-80					
-90					
-100					

根据螺线管上标明的线圈密度，由公式（1）计算出螺线管内的磁感应强度  $B$ 。

由欧姆定律  $R=U/I$  计算磁阻。

以磁感应强度  $B$  作横坐标，磁阻为纵坐标作出磁阻特性曲线。应该注意，由于模拟传感器的两个磁阻是位于磁通聚集器中，与图 3 相比，我们做出的磁阻曲线斜率大了约 10 倍，磁通聚集器结构使磁阻灵敏度大大提高。

不同外磁场强度时磁阻的变化反映了 GMR 的磁阻特性，同一外磁场强度下磁阻的差值反映了材料的磁滞特性。

### 3. GMR 开关（数字）传感器的磁电转换特性曲线测量

将 GMR 模拟传感器与比较电路，晶体管放大电路集成在一起，就构成 GMR 开关（数字）传感器，结构如图 14 所示。

比较电路的功能是，当电桥电压低于比较电压时，输出低电平；当电桥电压高于比较电压时，输出高电平。选择适当的 GMR 电桥并结合调节比较电压，可调节开关传感器开关点对应的磁场强度。

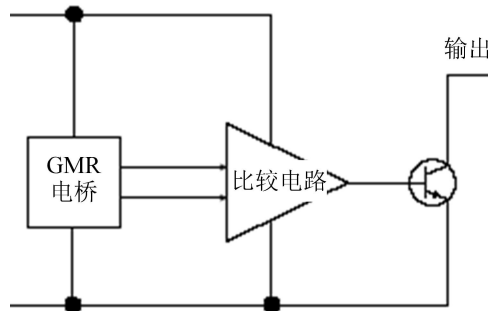


图 14 GMR 开关传感器结构图

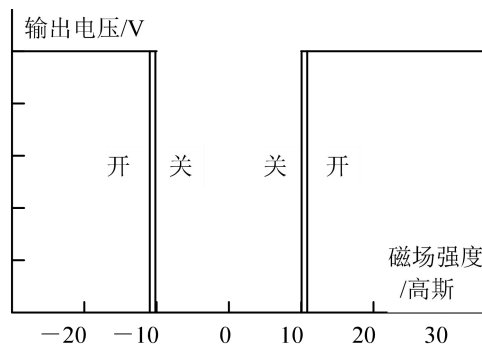


图 15 GMR 开关传感器磁电转换特性

图 15 是某种 GMR 开关传感器的磁电转换特性曲线。当磁场强度的绝对值从低增加到 12 高斯时，开关打开（输出高电平），当磁场强度的绝对值从高减小到 10 高斯时，开关关闭（输出低电平）。

实验装置：巨磁阻实验仪，基本特性组件。

将 GMR 模拟传感器置于螺线管磁场中，功能切换按钮切换为“传感器测量”。实验仪的 4V 电压源接至基本特性组件“巨磁电阻供电”，“电路供电”接口接至基本特性组件对应的“电路供电”输入插孔，恒流源接至“螺线管电流输入”，基本特性组件“开关信号输出”接至实验仪电压表。

从 50mA 逐渐减小励磁电流，输出电压从高电平（开）转变为低电平（关）时记录相应的励磁电流于表 3 “减小磁场”列中。当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时流经螺线管的电流与磁感应强度的方向为负，输出电压从低电平（关）转变为高电平（开）时记录相应的负值励磁电流于表 3 “减小磁场”列中。将电流调至 -50mA。

逐渐减小负向电流，输出电压从高电平（开）转变为低电平（关）时记录相应的负值励磁电流于表 3 “增大磁场”列中，电流到 0 时同样需要交换恒流输出接线的极性。输出电压从低电平（关）转变为高电平（开）时记录相应的正值励磁电流于表 3 “增大磁场”列中。

表 3 GMR 开关传感器的磁电转换特性测量

减小磁场			增大磁场		
开关动作	励磁电流/mA	磁感应强度/高斯	开关动作	励磁电流/mA	磁感应强度/高斯
关			关		
开			开		

根据螺线管上标明的线圈密度，由公式（1）计算出螺线管内的磁感应强度  $B$ 。

以磁感应强度  $B$  作横坐标，电压读数为纵坐标做出开关传感器的磁电转换特性曲线。

利用 GMR 开关传感器的开关特性已制成各种接近开关，当磁性物体（可在非磁性物体上贴上磁条）接近传感器时就会输出开关信号。广泛应用在工业生产及汽车，家电等日常生活用品中，控



制精度高，恶劣环境（如高低温，振动等）下仍能正常工作。

#### 4. 用 GMR 模拟传感器测量电流

从图 11 可见，GMR 模拟传感器在一定的范围内输出电压与磁场强度成线性关系，且灵敏度高，线性范围大，可以方便的将 GMR 制成磁场计，测量磁场强度或其它与磁场相关的物理量。作为应用示例，我们用它来测量电流。

由理论分析可知，通有电流  $I$  的无限长直导线，与导线距离为  $r$  的一点的磁感应强度为：

$$B = \mu_0 I / 2\pi r = 2I \times 10^{-7} / r \quad (3)$$

在  $r$  不变的情况下，磁场强度与电流成正比。

在实际应用中，为了使 GMR 模拟传感器工作在线性区，提高测量精度，还常常预先给传感器施加一个固定已知磁场，称为磁偏置，其原理类似于电子电路中的直流偏置。

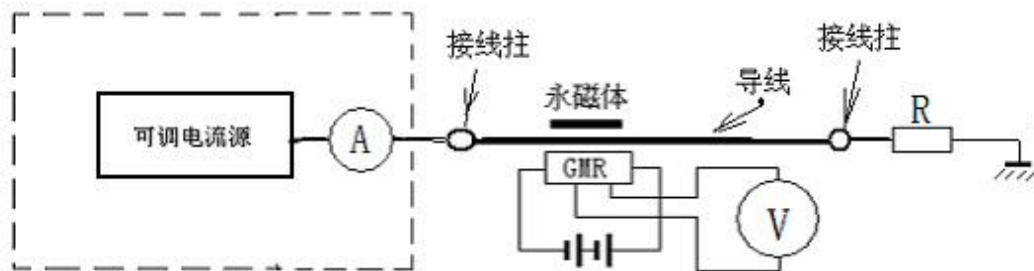


图 16 模拟传感器测量电流实验原理图

实验装置：巨磁阻实验仪，电流测量组件。

实验仪的 4V 电压源接至电流测量组件“巨磁电阻供电”，恒流源接至“待测电流输入”，电流测量组件“信号输出”接至实验仪电压表。

将待测电流调节至 0。

将偏置磁铁转到远离 GMR 传感器，调节磁铁与传感器的距离，使输出约 25mV。

将电流增大到 300mA，按表 4 数据逐渐减小待测电流，从左到右记录相应的输出电压于表格“减小电流”行中。由于恒流源本身不能提供负向电流，当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时电流方向为负，记录相应的输出电压。

逐渐减小负向待测电流，从右到左地记录相应的输出电压于表格“增加电流”行中。当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时电流方向为正，记录相应的输出电压。

将待测电流调节至 0。

将偏置磁铁转到接近 GMR 传感器，调节磁铁与传感器的距离，使输出约 150mV。

用低磁偏置时同样的实验方法，测量适当磁偏置时待测电流与输出电压的关系。

表 4 用 GMR 模拟传感器测量电流

待测电流/mA			300	200	100	0	-100	-200	-300
输出 电压 /mV	低磁偏置 (约25mV)	减小电流							
		增加电流							
	适当磁偏置 (约150mV)	减小电流							
		增加电流							

以电流读数作横坐标，电压表的读数为纵坐标作图。分别做出 4 条曲线。

由测量数据及所作图形可以看出，适当磁偏置时线性较好，斜率（灵敏度）较高。由于待测电流产生的磁场远小于偏置磁场，磁滞对测量的影响也较小，根据输出电压的大小就可确定待测电流的大小。

用 GMR 传感器测量电流不用将测量仪器接入电路，不会对电路工作产生干扰，既可测量直流，也可测量交流，具有广阔的应用前景。

### 5. GMR 梯度传感器的特性及应用

将 GMR 电桥两对对角电阻分别置于集成电路两端，4 个电阻都不加磁屏蔽，即构成梯度传感器，如图 17 所示。

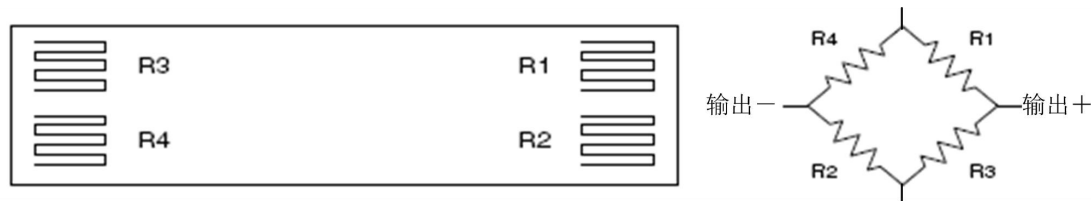


图 17 GMR 梯度传感器结构图

这种传感器若置于均匀磁场中，由于 4 个桥臂电阻的阻值变化相同，电桥输出为零。如果磁场存在一定的梯度，各 GMR 电阻感受到的磁场不同，磁阻变化不一样，就会有信号输出。图 18 以检测齿轮的角位移为例，说明其应用原理。

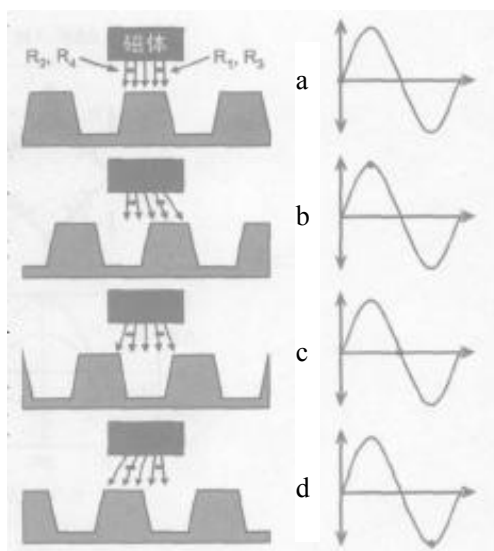


图 18 用 GMR 梯度传感器检测齿轮位移

将永磁体放置于传感器上方，若齿轮是铁磁材料，永磁体产生的空间磁场在相对于齿牙不同位置时，产生不同的梯度磁场。a 位置时，输出为零。b 位置时， $R_1$ 、 $R_2$  感受到的磁场强度大于  $R_3$ 、 $R_4$ ，输出正电压。c 位置时，输出回归零。d 位置时， $R_1$ 、 $R_2$  感受到的磁场强度小于  $R_3$ 、 $R_4$ ，输出负电压。于是，在齿轮转动过程中，每转过一个齿牙便产生一个完整的波形输出。这一原理已普遍应用于转速（速度）与位移监控，在汽车及其它工业领域得到广泛应用。

实验装置：巨磁阻实验仪、角位移测量组件。

将实验仪 4V 电压源接角位移测量组件“巨磁电阻供电”，角位移测量组件“信号输出”接实验仪电压表。

逆时针慢慢转动齿轮，当输出电压为零时记录起始角度，以后每转 3 度记录一次角度与电压表的读数。转动 48 度齿轮转过 2 齿，输出电压变化 2 个周期。

表 5 齿轮角位移的测量

转动角度/度															
输出电压 /mV															

以齿轮实际转过的度数为横坐标，电压表的读数为纵向坐标作图。

根据实验原理，GMR 梯度传感器能用于车辆流量监控吗？

## 6. 磁记录与读出

磁记录是当今数码产品记录与储存信息的最主要方式，由于巨磁阻的出现，存储密度有了成百上千倍的提高。

在如今的磁记录领域，为了提高记录密度，读写磁头是分离的。写磁头是绕线的磁芯，线圈中通过电流时产生磁场，在磁性记录材料上记录信息。巨磁阻读磁头利用磁记录材料上不同磁场时电阻的变化读出信息。磁读写组件用磁卡做记录介质，磁卡通过写磁头时可写入数据，通过读磁头时将写入的数据读出来。

同学可自行设计一个二进制码，按二进制码写入数据，然后将读出的结果记录下来。

实验装置：巨磁阻实验仪，磁读写组件，磁卡。

实验仪的 4V 电压源接磁读写组件“巨磁电阻供电”，“电路供电”接口接至基本特性组件对应的“电路供电”输入插孔，磁读写组件“读出数据”接至实验仪电压表。同时按下“0/1 转换”和“写确认”按键约 2 秒将读写组件初始化，初始化后才可以进行写和读。

将需要写入与读出的二进制数据记入表 6 第 2 行。

将磁卡有刻度区域的一面朝前，沿着箭头标识的方向插入划槽，按需要切换写“0”或写“1”（按“0/1 转换”按键，当状态指示灯显示为红色表示当前为“写 1”状态，绿色表示当前为“写 0”状态）。按住“写确认”按键不放，缓慢移动磁卡，根据磁卡上的刻度区域线，确认写“0”或写“1”的起点及终点。注意：为了便于后面的读出数据更准确，写数据时应以磁卡上各区域两边的边界线开始和结束。即在每个标定的区域内，磁卡的写入状态应完全相同。

完成写数据后，松开“写确认”按键，此时组件就处于读状态了，将磁卡移动到读磁头出，根据刻度区域在电压表上读出的电压，记录与表 6 中。

表 6 二进制数字的写入与读出

十进制数字								
二进制数字								
磁卡区域号	1	2	3	4	5	6	7	8
读出电平								

此实验演示了磁记录与磁读出的原理与过程。

注：由于测试卡区域的两端数据记录可能不准确，因此实验中只记录中间的 1~8 号区域的数据。

## 注意事项

1. 由于巨磁阻传感器具有磁滞现象，因此，在实验中，恒流源只能单方向调节，不可回调。否则测得的实验数据将不准确。实验表格中的电流只是作为一种参考，实验时以实际显示的数据为准。
2. 测试卡组件不能长期处于“写”状态。
3. 实验过程中，实验仪器不得处于强磁场环境中。