

# 方兴未艾的磁致电阻研究

杨军 许艳

我们知道,在金属中散射作用是电阻产生的主要原因,这包括杂质散射和晶格热运动引起的电声子相互作用。根据动量定理,电子在时间间隔  $\Delta t$  内受到电场  $E$  的作用而产生的定向漂移速度  $\Delta v = \frac{eE}{m} \cdot \Delta t$ , 这里  $e$  和  $m$  分别是电子的电荷和有效质量。此后由于受到散射而失去所获得的定向漂移速度而趋向于平衡态,而后再被电场加速。我们假设电子在经历一次散射后就失去所有的定向漂移速度,重新回到平衡态再进行加速,那么定义电子连续两次受到散射之间的时间间隔为  $\tau$ , 则电子的被加速定向漂移速度为  $\bar{v} = \frac{eE}{m^*} \cdot \tau$ , 因此系统的电导率为  $\sigma = \frac{N_0 e^2}{m^*} \tau = \frac{N_0 e^2}{m^* \nu_F} \lambda$ , 其中  $N_0$  是电子的数密度,  $\nu_F$  是电子的费米速度,  $\lambda = \nu_F \tau$  是电子的平均自由程。当然我们也可以把其中的散射时间换成平均驰豫时间,然后利用玻耳兹曼方程求解,结果是类似的。由此可以看出金属的电导率是正比于电子的平均自由程的。当系统受到外磁场的作用时,导电的电子将受到洛伦兹力的作用,导致运动路径会偏离所受电场力的方向,这样电子所受到散射作用得以增强,从而导致电子的平均自由程变小,结果系统的电阻会受到外磁场的作用而增大。这种系统的电阻随外加磁场的变化而变化就是人们通常所说的磁致电阻效应(magnetoresistance effect)。其实早在20世纪40年代人们就发现某些材料的电阻随磁场的变化而变化的现象,通常用电阻变化率  $\Delta P/P$  描述。早前人们就发现在铁磁金属中电阻随外磁场的增加轻微增大。增大的幅度决定于外加磁场和电流之间的角度,是各向异性的,但基本上都很小,一般金属导体的  $\Delta P/P$  只有约  $10^{-5}\%$ ; 对于磁性金属或合金材料(例如薄膜合金),  $\Delta P/P$  可达  $3\% \sim 5\%$ 。尽管如此,人们对磁致电阻的研究从没有停止,随后不长的时间里人们又发现了作用机制不尽相同的几种磁致电阻效应:

## 一、巨磁电阻效应(GMR)

近年来,由于纳米材料制备技术的发展,人们对小尺寸系统物理性质的研究取得了很大的进展,基

于此技术人们发现某些磁性合金材料的磁电阻在一定磁场作用下急剧减小,而  $\Delta P/P$  急剧增大,一般增大的幅度比通常的磁性合金材料的磁电阻高近10倍,这被称之为巨磁电阻(Giant Magnetoresistance),简称GMR。巨磁电阻效应是1988年由法国物理学家发现的一种磁致电阻效应。GMR效应自发现以来由于其潜在的巨大应用价值,已成为凝聚态物理学关注的焦点,这个发现是长期以来对磁性本质问题探索的结果,而超薄膜制备技术的发展使之得以实现。1988年, M. N. Baibich 等人在利用分子束外延技术制备的 Fe/Cr/Fe 多层膜中发现其电阻率在 4.2K 和 2T 的磁场下可以降到无磁场时数值的一半, Fe/Cr/Fe 多层膜是一种由铁磁金属/非金属构成的异质结构。随后,有报道在其他许多具有反铁磁耦合的磁性多层膜结构中也观察到了巨磁电阻效应,如 Fe/Cu、Fe/Ag、Fe/Al、Fe/Au、Co/Cu、Co/Ag、Co/Au 等层间偶合多层膜都具有显著 GMR 效应。自 1988 年发现 GMR 效应后仅 3 年,人们便研制出可在低磁场 ( $10^{-2} \sim 10^{-6}T$ ) 出现 GMR 效应的多层膜(如 [CoNiFe/CoFe/AgCu/CoFe/CoNiFe] $_n$ )。除了在磁多层膜结构外,1992年,人们又发现由散乱分布在非金属基底(如 Cu、Ag 等)中的铁磁单畴颗粒(如 Fe、Co、Ni 等)组成的合金颗粒膜系统中同样也存在着巨磁电阻效应。1992年人们利用两种磁矫顽力差别大的材料(例如 Co 和 Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub>)制成 Co/Cu/Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub>/Cu 多层膜,他们发现,当 Cu 层厚度大于 5 纳米时,层间耦合较弱,此时利用磁场的强弱可改变磁矩的方向,这是以自旋取向的不同来控制膜电阻的大小,从而获得巨磁电阻效应,故又称为自旋阀。GMR 材料按其结构可分为具有层间偶合特性的多层膜(例如 Fe/Cr)、自旋阀多层膜(例如 FeMn/FeNi/Cu/FeNi)、颗粒型多层膜(例如 Fe/Co)和钙钛矿氧化物型多层膜(例如 AMnO<sub>3</sub>)等结构;其中自旋阀(spin valve)多层膜又分为简单型和对称型两类;也有将其分为钉扎(pinning)和非钉扎型两类的。其中磁性异质多层膜(颗粒膜)系统的巨磁电阻效应与传统的单质材料中的磁电阻效应有明显的区别:一是磁性异质结构系统中的电阻在存在外磁场

的情况下比没有加磁场时要小,而传统的单质材料中的电阻是随外磁场增加而增大的。二是从磁电阻数值上我们可以发现巨磁电阻系统的可以达到几十个百分点以上,而单质材料只有百分之几甚至更小,这表明磁性异质结构系统中的磁致电阻的产生机理完全有别于传统的磁致电阻机理。研究发现,巨磁电阻效应主要来源于系统中的自旋相关散射,外加磁场的主要作用是改变了被散射系统的状态而不是直接影响电子的运动。磁性异质结构系统中电子所受到的散射一般可以分为体散射和界面散射。体散射指的是电子在各个区域内部所受到的杂质散射,截面散射是指电子在不同金属区域的界面部位由于工艺原因和原子之间的相互渗透、无序和杂质密度要比区域内部大得多等造成的电子所受到比单个区域内部强很多的散射。实验还发现,在磁性异质结构系统中电子所受到的散射具有自旋不对称性。当系统的温度比较低时忽略散射造成的自旋翻转效应,人们提出了两电流模型即系统总的电流等于两个自旋上下两个通道电流之和,总电流等于两自旋通道电流之和,这相当于两个自旋通道被并联到一个系统中。所以,磁道过程中系统总的电导率  $\sigma = \sum_s \sigma_s$ , 这里  $\sigma_s$  是指自旋为  $s$  的电子的电导率。实际上人们也正是利用此种方法来分析研究磁性多层膜系统中的巨磁电阻效应的。在磁性多层膜结构中当系统受到饱和外磁场的作用时,电子的平均自由程在有外磁场时相差很大,加了外磁场后的系统电导将大于不加磁场时的电导,所以会表现出负的磁致电阻效应。

因为磁致电阻效应能够把外磁场信号转化为电信号,所以它在磁读写、磁存储器件和磁性传感器等领域有着广泛的应用前景。1994年,美国的 NVE 公司首先实现巨磁电阻效应的产业化,并销售巨磁电阻磁场传感器。1998年,美国的 IBM 公司成功地把 GMR 效应应用在计算机硬盘驱动器上,研制出巨磁电阻磁头。巨磁电阻磁头的应用带动了计算机产业的迅速发展,打破了信息高速公路图像传递存储的瓶颈,目前存储密度已高达 56GB/平方英寸。在发现低磁场 GMR 效应之后,1994年全集成化的 GMR 器件—自旋阀研制成功。同年,美国的 IBM 公司研制出利用自旋阀原理的数据读出磁头,它将磁盘记录密度提高了接近 20 倍。这种效应也开始用于制造角度、位置传感器,用于数控机床、汽车测速、非接触

开关、旋转编码器等领域,作为传感器它具有功耗小、可靠性高、体积小、价格便宜和更强的输出信号等优点。

## 二、庞磁电阻效应(CMR)

1994年,人们在类钙钛矿结构 La-Ca-Mn-O 材料中发现了具有比 GMR 更大的磁致电阻材料,被称为特大磁致电阻或者庞磁电阻 (Colossal Magnetoresistance),简称 CMR。随后人们在其他具有钙钛矿结构的掺杂稀土锰氧化物中也陆续发现了这一效应,其磁致电阻效应比率高达 10% 以上。这一类材料由于其丰富的物理性质和与高温超导体相类似的结构而倍受关注。这类锰氧化物和高温超导体一样是归属与强耦合系统,其相互作用非常复杂,其作用机制现在还不是十分明朗。人们普遍认为这种特大磁致电阻是自旋和轨道相互作用的直接结果。这方面的主要理论是 50 年代提出的双交换模型。虽然双交换模型比较成功地解释了掺杂锰氧化物的铁磁性和金属性的共存,但从 CMR 的材料研究情况来看这种模型不足以解释其所有的物理现象,还有很多现象和性质如电声子耦合、电子的局域化效应等并不能得到理想的解释,这方面的理论和应用研究还有待于进一步深入。据报道,中科院物理所王芳卫副研究员在法国合作研究期间,利用极化中子衍射研究了准二维层状锰氧化物  $(La, Pr)_{1-x}Sr_xMn_2O_7$ 。从实验上直接测定了外场诱导的绝缘顺磁态到铁磁金属态的一级相变,而且通过对两种不同的磁场诱导金属铁磁态的自旋密度的分析,证明了该系统中自旋与轨道之间存在强烈的耦合,即自旋方向的变化明显改变锰离子的  $e_g$  电子的轨道分布,这项工作的结果发表在美国的物理评论快报上。另外,南京大学物理系微结构国家重点实验室在磁电阻这方面的研究也倍受国际同行关注。

## 三、隧道磁致电阻效应(TMR)

除了上面所说的两种磁致电阻效应外,在 1975 年, M. Julliere 发表在物理快报 (Phys. Lett.) 上的一篇文章里首次报道了一种所谓隧道磁致电阻 (Tunnelling Magnetoresistance),简称 TMR。即在铁磁体/绝缘层/铁磁体这样类似三明治的结构中发现在两边铁磁体磁化方向平行和反平行时结的电阻存在着差异,并给出了如下的磁电阻公式:  $\frac{\Delta G}{G_P} = \frac{2PP'}{1+PP'}$  其中  $G_P$  为两铁磁层平行时的电导,

$\Delta G$  是平行时的电导减去反平行时的电导,  $P$  和  $P'$  分别是左右铁磁层的有效输运电子态密度的自旋极化率。隧道磁致电阻产生的机制与传统的磁电阻效应机制是有区别的, 研究表明隧道磁电阻效应主要是来自于自旋相关的隧道过程。当系统的温度比较低的时候, 散射所造成的自旋反转可以忽略不计, 所以, 电子在系统中运动时它的自旋方向始终保持不变, 也就是上面所提到的两电流模型。在隧穿过程中, 对电流的贡献主要是费米面附近的电子, 而  $d$  电子在费米面附近的电子数要远大于  $s$  电子在费米面附近的电子数, 所以隧穿过程中  $d$  电子对电导起主要贡献。假设多数自旋态电子的密度  $n_{\uparrow}$ , 少数自旋态电子的密度  $n_{\downarrow}$ 。如果两个铁磁电极的极化方向平行, 则一个电极中多数自旋子带的电子将进入另一个电极中多数自旋子带的空态, 而少数自旋子带的电子也从一个电极的进入另一个电极的少数子带的空态; 但是如果两个电极的磁化方向反平行, 则一个电极中的多数自旋子带的自旋方向是和另一个电极中少数自旋子带电子的自旋方向是平行的, 那么在隧穿过程中, 一个电极的多数自旋子带的电子必然进入另一个电极少数自旋子带的空态; 反之亦然。所以当两个电极的磁化方向相同时(图 1), 发射极中多数自旋电子与高密度的空态相遇时, 它的电

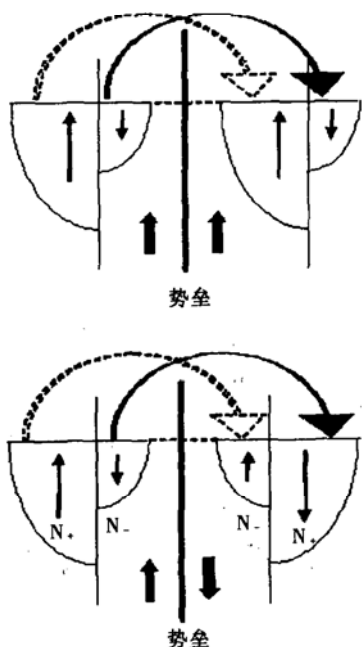


图 1 平行与反平行结构隧穿示意图

$$G_P = C \cdot (N_{\uparrow}^2 + N_{\downarrow}^2) \quad (1)$$

反过来, 当两个电极的磁化方向相反时, 多数自

旋的电子与一个低密度的空态相遇, 它的电导为

$$G_{AP} = C \cdot 2N_{\downarrow}N_{\uparrow} \quad (2)$$

显然

$$G_P - G_{AP} = C \cdot (N_{\uparrow} - N_{\downarrow})^2 \geq 0 \quad (3)$$

即当两铁磁电极平行时的电导  $G_P$  要比两铁磁电极反平行时的电导  $G_{AP}$  要大。所以一般情况下隧道磁电阻是大于零的。为了获得磁性隧道结的自旋隧穿的完整的物理图像, 詹森 (Jansen) 和莫迪拉 (Modera) 在简单的 FM/I/FM 隧道结的绝缘层中掺进了磁性杂质和非磁性杂质, 直接测量了杂质对隧穿电子的自旋极化运输的影响。因为在磁性隧道结中在某些外加磁场下两铁磁层能够反平行排列, 必须使得两铁磁层的矫顽力有所不同, 通常把隧道结一端的铁磁层使用一反铁磁层钉扎以提高它的矫顽力大小, 也可以改变铁磁层的几何形状等方法使得两端铁磁层的矫顽力产生差异。磁性隧道结除了基本的铁磁/绝缘层/铁磁结 (FM/I/FM) 外, 还有诸如 FM/I/N/I/FM、N/FM/I/FM 等类型的双结或多结, 由于隧道效应是一个量子过程, 所以对于双结电子在两个界面的势垒处将会发生多次反射, 从而可能形成相干隧穿, 且其震荡效应也有潜在的应用价值。近年来, 科学家采用了一些新的磁性材料来代替传统的铁磁材料制作磁性隧道结, 例如利用纳米碳管联接两铁磁层的隧道结中也发现了 TMR 效应。而用在实验上用分子束外延的方法制成的 GaMnAs/AlAs/GaMnAs 隧道结中发现的 TMR 效应高达 75%。像 GaMnAs 这样的磁性半导体有着它自身的特点, 它同时具有半导体和磁性特性, 和一般的铁磁金属相比, 有一些新奇的性质, 比如它的有效极化率随着磁场的变化而变化等。此外, 半导体成熟的制作工艺可以使磁性半导体方便地投入应用, 所以用磁性半体制成的隧道结有非常乐观的应用前景。

总之, 随着理论和实验技术的发展, 人们逐渐认识到磁致电阻效应的巨大社会应用价值, 现在基于自旋运输的磁自旋电子学已经发展成为一门新兴的交叉学科, 上面介绍的 GMR, CMR 和 TMR 等磁致电阻效应正是其应用的典型例子。我们相信这方面的研究和应用才刚刚开始, 随着研究的不断深入, 其应用前景将更为广阔。

(杨军 江苏南京解放军理工大学理学院数理系 210007; 许艳 南京江苏科学宫 210013)