

浅介 2007 年诺贝尔物理学奖与自旋电子学

翟宏如 翟亚

2007 年 10 月瑞典皇家科学院宣布, 将该年度诺贝尔物理学奖授予在 1988 年分别独立发现纳米多层膜中巨磁电阻的法国 Albert Fert 教授和德国 Peter Grünberg 教授。

巨磁电阻 (Giant Magnetoresistance, GMR) 的发现是物理学中的一个全新效应和突破。它基于自旋相关导电, 电阻与传导电子的自旋方向有关。微弱磁场可引起纳米多层膜的电阻发生巨大变化。它被制成高灵敏磁场传感器, 特别是超高密度硬盘磁记录中的高灵敏读出磁头, 解决了关键性技术, 可读出纳米尺寸磁记录单元的微弱磁场信号。1997 年基于 GMR 效应的硬盘读出头进入市场, 使硬盘的记录密度成倍增长。此后, 该技术继续使硬盘的记录密度、容量和小型化程度不断提高。直到最近, 灵敏度更高的隧道结磁电阻读出头, 仍然是 GMR 效应的进一步发展。GMR 的发现引发了世界范围的研究热潮。自旋相关导电机理、层间交换耦合、隧道结磁电阻、庞磁电阻、磁性半导体和自旋注入的理论实验研究, 磁性随机存储器 and 磁性逻辑元件以及其他新型应用的研究与开发, 不断出现, 引人入胜。

传统电子学只考虑电子电荷移动导致的电流, 电流与电子的另一个基本性能——电子自旋——无关。但 GMR 及其后的相关发展则是基于同时利用或巧妙操作电子的电荷与自旋这两个基本性能和他们相互作用的新现象。据此, 人们提出自旋电子学 (Spintronics) 或磁电子学 (Magnetoelectronics) 代表这个新的分支学科。

1966 年理论上预言了巨磁电阻的逆效应——自旋动量矩转移, 并很快为实验证实。传导电子自旋与铁磁体中的磁矩相互作用使自旋极化电流直接诱导磁矩的改变, 而不需要磁场, 这无疑是有史以来物理和技术的另一个历史性突破, 掀起了自旋电子学研究的另一个高潮。自旋电子学在全面形成和发展。



磁电阻与巨磁电阻

磁电阻是指磁场使导体电阻发生变化的现象。早在 1857 年 W. Thomson (开尔文勋爵) 发现了铁和镍的磁电阻。他写道: “铁在磁力作用下, 磁化方向的导电电阻升高, 而在垂直方向的电阻降低。” 故称之为各向异性磁电

阻 (AMR)。磁电阻的相对比值 MR 可表为: $MR = \Delta R / R = (R_H - R_0) / R_H$ 。 R_H 和 R_0 分别为磁场作用下和磁场为零时的电阻。MR 值随磁场增大而增大, 最后达到饱和。铁磁金属与合金的饱和磁电阻值很小, 约 1%~5%。在上世纪 70 年代以前, AMR 并未获得应用。软磁合金的饱和磁场很小, 约几个奥斯特, 甚至更低, 因而具有对弱磁场的传感效应。上世纪 70 年代, 应技术需要, AMR 磁场传感器成为商品, 用于机械运动的自动控制。90 年代初, AMR 硬盘读出头代替了灵敏度较低的感应式磁头, 使硬盘的记录密度每年以 60% 的速度增长, 达到 1~3Gb/in² 的水平。人们曾经企图寻求提高磁电阻的途径, 但未获成功。实际上, 自从 19 世纪开尔文发现 AMR 以来, 其 MR 值没有明显提高。那时人们以为磁电阻传感器和读出头性能的大幅度提高是不大可能的。因此当 1988 年发现 Fe/Cr 纳米多层膜在低温下具有接近于 50% 的 MR 值, 室温下 MR 值也比各向异性磁电阻大得多时, 当然使人们十分惊异, 并且立刻引起世界上物理、材料、电子、计算机和信息等学科以至于汽车工业界的普遍重视。基础研究与应用开发齐头并进, 不断取得丰硕成果。

发现巨磁电阻的背景

发现巨磁电阻是长期基础研究积累的必然结果。过渡族金属, 特别是铁磁金属电阻机制的研究, 要追溯到上世纪 30 年代 N. F. Mott 的理论。Fert 长期从事磁学, 特别是铁磁金属的输运过程的基础研究。在上世纪 60 年代末和 70 年代与 I. A. Campbell 教授一起对铁磁金属的电导和磁电阻进行了大量系统研究, 在实验和理论上有着极为丰富的积累。他们的研

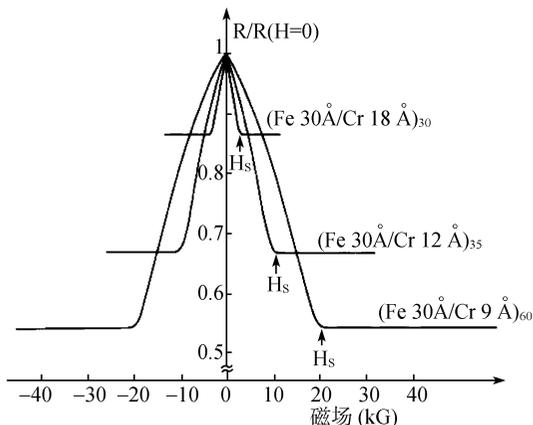


图 1 4.2K 下 Fe/Cr 多层膜电阻与磁场的关系

究确认了铁磁金属中的两通道导电机制。过渡族金属的导电主要决定于 4s 电子，磁性主要由 3d 电子提供。金属中 3d 和 4s 能级扩展为能带，过渡族金属中二者有重叠。导电主要由能量最高，达 Fermi 能的 4s 电子实现，电阻则来源于 4s 电子运动中被散射。与优良导体 Cu 比，3d 过渡族金属中传导电子的有效数目并不少，但其被散射的几率较高，平均自由程较小，因而电阻率比 Cu 高。其原因是由于过渡族金属的 Fermi 面跨过 3d 和 4s 两个能带，4s 电子运动过程中出现了许多 4s 电子转变到未被占领的 3d 状态的散射，因而电阻增大。相反，铜的 3d 能带在 Fermi 能面之下，不出现 4s 电子转变到 3d 的散射，因而电阻较低，为优良导体。铁磁金属的导电分别由并联的自旋向上和自旋向下两种传导电子通道构成。由于在费米能面上两种自旋态电子的能态密度，主要是 3d 能带的能态密度不同，因而两种自旋态电子的散射几率、平均自由程和电阻率可有很大差别，称为自旋相关散射或自旋相关导电的双通道模型。这正是铁磁/非铁磁纳米多层膜 GMR 机制的基本概念。当发现由于反铁磁交换耦合，在零场下 Fe/Cr 纳米多层膜中相邻 Fe 层的磁化自发反平行排列时，根据双通道模型可以预期，在磁场作用下使之平行排列，必然引起电阻变化，即为 GMR。Fert 发现 GMR 的重大成就几乎是水到渠成的。在 1988 年的论文中就给出了正确解释。图 1 为该论文中的磁电阻曲线，其中 $(\text{Fe } 30\text{\AA}/\text{Cr } 18\text{\AA})_{30}$ 等标注的含义是，厚度分别为 30 Å 和 18 Å 的 (Fe/Cr) 多层膜中包含了 30 个 (Fe/Cr) 周期 (1 nm=10 Å)。图 2 为多层膜中自旋相关散射的双通道模型示意图：白色与黑色箭头分别表示铁膜中的磁矩和传导电子自旋的方向，二者同向时电阻低，反向时电阻

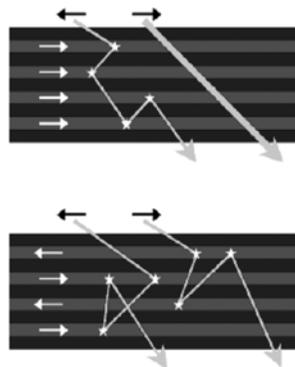


图 2 多层膜中的自旋相关散射示意图：上图各层的 M 平行、下图的 M 反平行，折线代表两个电子通道；黑色箭头为通道中传导电子自旋的方向，当它与 M 平行时散射很少（以直线表示），反平行时散射很多（以折线表示）；上图为低阻态、下图为高阻态

高，是为自旋相关导电。其下图为零场下反铁磁耦合导致的磁矩总 $M=0$ 的高电阻态，每个通道中高阻段和低阻段相互串联。上图为低电阻态。高阻和低阻通道相互并联，而低阻通道起了短路作用。

然而多层膜中层间的反铁磁交换耦合则是由 P.Grünberg 在 1986 年首先发现的。Grünberg 多年从事超薄膜磁性 with 光散射的基础研究。特别是以分子束外延法制备磁性超薄膜和光散射测量的改进著称，他对 Brillouin 光散射精度的改进使他能够检测到表面磁振子和单原子层中的自旋波驻波。正是利用先进的纳米技术，Grünberg 小组于 1986 年首次发现结构为 Fe 12nm/Cr 12nm 三层膜中，两个过渡族铁磁层 Fe 通过非铁磁层 Cr 的媒介发生反铁磁交换耦合，自发反平行排列。其结构为 Fe12nm/Cr1nm/Fe12nm 三层膜。同年，Majkrzak 等人在稀土金属 Gd/Y/Gd 超晶格中观察到 RKKY 型的反铁磁交换耦合。不久 Grünberg 发现了具有反铁磁耦合的 Fe/Cr/Fe 三层膜在室温下具有与 Fe 的各向异性磁电阻迥异且数值大得多的 GMR。当时他们二人都意识到 GMR 的重要应用价值，而第一个专利则由 Grünberg 在 1988 年获得。因此，应当说，Fert 和 Grünberg 同时并分别独立发现了 GMR。可以看到，基础研究的长期积累导致重大发现，而基础研究的重大发现引起重大应用和学科的发展。

发现巨磁电阻的物质基础是纳米技术的发展一方面，只有集成电路和磁记录单元发展到纳米尺寸时，才引起对高灵敏度传感器和读出头的要求；另一方面，如果没有近代制备纳米结构技术的发展，观察到层间交换耦合和 GMR 都是不可能的。在上世纪 50 年代金属中以传导电子为媒介的 RKKY 交换作用理论提出后，证明其存在的实验研究一直在进行。顺磁共振获得了成功。但多层膜中交换耦合的实验研究一直未获成功，直至 1986 年 Grünberg

在分子束外延制备的 Fe/Cr 三层结构中才首次观察到反铁磁耦合，导致 GMR 的发现。然而反铁磁耦合并非引起零场下铁磁层中磁化反平行排列的唯一途径，因而亦非出现 GMR 的必要条件。出现 GMR 的必要条件是多层膜总厚度必须小于自旋扩散长度 l_f 。电子自旋扩散长度为电子在金属中运动时，保持其自旋方向不变的平均距离。在图 2 的上图中，低通道电子起短路作用的必要条件是电子在多层膜运动的整个过程其自旋方向保持不变。因此多层膜的厚度必须尽可能不超过其自旋扩散长度 l_f 。铁磁金属中的 l_f 的数值为 10 纳米的量级。显然，观察到 GMR 必须在纳米结构中才有可能。综上所述，发现巨磁电阻的物质基础是纳米技术的发展。

自旋电子学的形成与发展

发现 GMR 后，基础研究与开发应用在世界范围内迅速大量发展。新现象、新材料、新器件的理论、实验和技术研究掀起一个个高潮、取得了惊人的成果，自旋电子学迅速形成并不断发展。

振荡型的层间交换耦合 1988 年后不久的第一个引人入胜的发展是振荡型层间交换耦合的发现。S. Parkin 在多种过渡金属作为中间层的多层膜中发现了振荡型层间交换耦合（图 3）。其交换耦合的符号、强度用 MR 值与饱和磁场表示。对振荡型层间交换耦合的系统研究提出的物理问题引发了新

的理论成果。在铁磁层间非铁磁金属层中电子的限制效应和自旋相关量子尺寸效应的理论获得了成功。

溅射技术和自旋阀、巨磁电阻实用化的关键性进展 Parkin 发现的具有振荡型层间交换耦合和巨磁电阻的多层膜是采用溅射技术制备的。溅射技术的制膜速率比分子束外延快 10^2 倍，因而适用于大规模生产。溅射技术成功制备良好的多层膜是巨磁电阻走向产业化的关键一步。最早发现 GMR 多层膜中的层间反铁磁交换耦合使其矫顽力和饱和磁场很高，不适用于低磁场的传感。不久出现了具有双矫顽力的三层膜 FM/NM/FM，及用反铁磁层钉扎的四层膜 AF/FM/NM/FM，避免了层间耦合引起的高矫顽力和高饱和磁场，大大提高了低场传感灵敏度，称为自旋阀，制成了第一代实用化 GMR 传感器，1997 年取代了 AMR 读出头，使硬盘存储密度不断提高。

磁性隧道结 GMR 的发现和使上世纪 70 年代已发现的磁性隧道结（Magnetic tunneling junction, MTJ）取得了惊人的新发展。它的基本结构为 FM1/I/FM2，FM1 和 FM2 为两个纳米铁磁性薄膜，I 为厚度约 1~1.5 纳米的绝缘层，如 Al_2O_3 和最新发展的 MgO。当电压垂直于膜面时，由于电子的波动性，可产生与自旋相关的隧道电流。一般，两铁磁层反平行时，隧道电流小，为高阻态，二者平行时为低阻态。隧道结巨磁电阻得到了比自旋阀更高的 MR 数值。新近的水平是室温下达到 400%。MTJ 已用于制备比自旋阀更先进的硬盘读出头，并正在用于开发磁性随机存储器（MRAM）。MRAM 有望成为全面性能、价格可与当前计算机主内存——半导体动态随机存储器（DRAM）比拟，但 MRAM 为不挥发性存储器。

庞磁电阻材料 GMR 的发现使上世纪 50 年代发现的钙钛矿型锰氧化物重新获得重视。在低温强磁场作用下，观察到超大磁电阻，被称为庞磁电阻（Colossal Magnetoresistance, CMR）。例如，在 30K、50KOe 磁场作用下 $Nd_{0.65}Ca_{0.35}MnO_3$ 的 MR 值高达 $10^6\%$ 。由于庞磁电阻需要低温和高磁场，因而迄今未能实用化，但这类材料中有丰富的物理问题，包括电子关联、自旋有序、电荷有序、轨道有序、磁场诱导结构相变等，吸引了许多基础研究。

半金属材料 GMR 等自旋-电子的效应均与磁性金属费米面的自旋极化度 P 相关。 P 定义为 $P=(n_{\uparrow}-n_{\downarrow})/(n_{\uparrow}+n_{\downarrow})$ ， n_{\uparrow} 和 n_{\downarrow} 为费米面上亦即电流中自旋向上及向下的电子能态密度。Fe、Co、

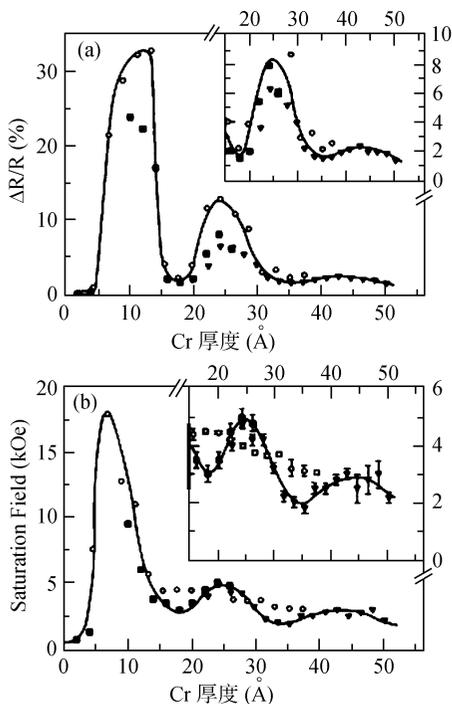


图 3 Fe/Cr 多层膜的振荡型层间交换耦合

Ni 自旋极化度 P 的数值仅为+40%、+35%和+23%。新近数据更高些，可达 50%或更高，但远不及 100%。半金属材料（如 Cr_2O_3 和 Fe_3O_4 ）以及上述钙钛矿型锰氧化物均属 P 接近 1 的材料，引起了广泛兴趣。半金属材料电子结构的特点是一个自旋相关能带为金属性、另一个为绝缘体的性质，因而其自旋极化度 $P=1$ ，引起了重视。Fert 观察到 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3/\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 隧道结的 TMR 达 1800%。

磁性半导体与自旋注入 上述自旋电子器件均为铁磁纳米结构。为了使自旋电子器件获得大规模集成化，正在两个途径上努力。其一：寻求居里点在室温以上的磁性半导体；其二：将铁磁金属中的自旋极化电流注入半导体，并保持足够长的自旋扩散长度。这两方面均不断取得了令人鼓舞的进展。

自旋动量矩转移——一个新的历史性突破 1996 年 Slonczewski 和 L.Berger 分别从理论上预言，自旋极化电流通过纳米磁体时，传导电子与局域磁矩间的散射可使传导电子的自旋动量矩转移给局域磁矩，简称为自旋转移（Spin Transfer, ST）。因而电流可直接引起纳米铁磁体的磁化发生变化，包括磁矩转动、磁矩反转、磁矩进动以及畴壁位移。ST 实际上是 GMR 和自旋相关导电的逆效应，但它在 GMR 发现 8 年后才引起注意。不久，电流诱导磁化反转和电流诱导磁矩进动均被实验证实。稍后，电流诱导畴壁位移也得到实验证实，Ono 小组作了直接观察。ST 是继巨磁电阻发现以来的另一个新的历史性突破。自从数千年前发现磁铁矿和物质磁性以来，公认的理论实验事实是只有磁场才能使磁矩发生变化。电流直接引起磁矩变化而不通过磁场无疑是历史性的突破。最近十来年，实验、理论和应用开发研究掀起了新高潮，令人鼓舞的新成果不断出现。电流诱导磁化反转已开始用于磁性随机存储器中 MTJ 存储单元写入的研究。实验证明，电流直接写入或自旋转移磁化反转（STS），比传统的磁场写入更节省能量（图 4）。电流诱导磁矩进动的频率在微波区域，磁矩进动引起薄膜电阻的变化，因而直流电通过一个自旋阀或磁性隧道结型的纳米器件可产生微波频率的高频分量；反之，微波电流的通过可产生直流分量。电流诱导微波发生器和整流器等微波器件成为另一个研究热点。电流诱导畴壁位移也是一个研究热点。除基础研究外，利用纳米线中的电流诱导畴壁位移开

发新型高密度存储器——跑道存储器（Racetrack memory）的研究正在 IBM 由 Parkin 领导的小组紧锣密鼓地进行。另一方面，电流诱导纳米磁体磁化的理论和实验研究正在改写 100 多年来磁场作用下的磁化理论和传统铁磁学。

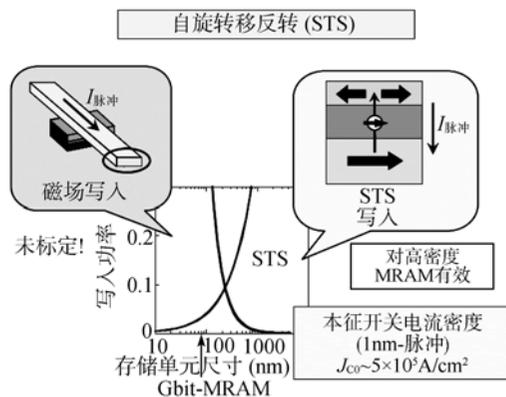


图 4 CoFeB/MgO/CoFeB MTJ 存储单元的磁场写入和电流写入的对比

自旋电子学的应用发展和产业化 从发现 GMR 到传感器和读出头进入市场只有七八年，这确实是基础研究成果转化为重要大规模产品的典范。而且其性能和效益不断提高，MTJ 的加入使性能发生了跃进式提高。MRAM 是对计算机和信息技术影响更大、效益更高的应用，正处于大规模生产的前夕。电流直接写入技术的引入将使 MTJ 记忆单元向更加低能耗、小型化发展。GMR 和 MTJ 传感器在机械运动、芯片的检验、生物与医学方面也有许多诱人应用。正在研究开发的纳米线逻辑元件、自旋转移跑道存储器、自旋转移纳米微波元件等，描绘出美不胜收的前景。关于自旋电子学的产业化情况和我国的研究情况请参看本文所给的文献*。

结束语

GMR 和自旋相关导电，电流诱导磁化和自旋转移是两个历史性的突破。新现象、新理论、新材料、新器件不断出现，打破了人们长期的概念和传统认识，正在使电子学和微电子学的功能更加丰富多彩。其核心是同时利用电子电荷与电子自旋，以及它们的相互作用，这就是自旋电子学。它是磁学和电子学中的新分支，也是纳米科学的新内容。它是一个已成型的幼儿，前途无可限量。

（翟宏如，南京大学现代分析中心 210093；翟亚，东南大学物理系 211189）

*科技导报 25 卷 24 期（2007）17 页。