

20世纪物理学的奇葩——磁电子学

郭 皓 范剑森

刘 之 景

(中国科技大学化学系 合肥 230026)

(中国科技大学天文与应用物理系 合肥 230026)

磁电子学是一门研究电子学与磁学相结合的新兴交叉学科。电子是电荷的负载体，它同时又是自旋的负载体。研究电子的电荷输运特性，人们创造了电子学、微电子学。1947年，贝尔实验室的巴丁和布拉顿在半导体锗中，发现了微小电流会引起功率输出的巨大变化，这就是晶体管效应。这个发现，使得电子管在相当大的领域内被晶体管所取代，并由此产生了集成电路和大规模集成电路乃至现在的超大规模集成电路。微电子学的迅猛发展，使得人们由习惯上只考虑利用电子的电荷输运，发展到同时考虑电子自旋输运特性。事实上，极化后的电子有自旋向上和自旋向下的两种状态，因此极化电流也有自旋向上和自旋向下的两种载流子，能否控制这两种载流子使之成为电子器件？或者，同时利用电子、空穴和自旋向上、向下四种载流子做成电子器件？这正是磁学研究的最前沿——磁电子学所要研究的主要内容。1995年是一年一度的磁学和磁性材料会议(简称3M会议)创办40周年，为了纪念这一具有历史意义的学术活动，《Physics Today》于1995年4月出版了《磁电子学专辑》向世界科学界介绍和倡导“磁电子学”这一新兴学科的兴起。磁电子学发展到今天，已经初步建立了它的一整套理论体系。它的一系列成果在信息存储等各个领域已经产生了划时代的巨大影响，为人类文明的发展开辟了广阔的前景。

1. 发展历史

早在100年前，人们就对铁磁金属输运特性受磁场的现象做过相当细的观测。汤姆生于1857年发现了铁磁多晶体的各向异性磁电阻效应。所谓磁电阻效应是指物质在磁场作用下电阻发生变化的现象。常用电阻比率 $\Delta R/R_0 = (R_0 - R_H)/R_0$ 作为磁电阻效应大小的

量度，其中 R_0 为零磁场下样品的电阻值， R_H 为磁场下样品的电阻值。但是由于当时科学技术和条件的局限，这个成果在一个多世纪内并未引起人们太多的关注。直到1971年，亨特才提出了可以利用铁磁金属的各向异性磁电阻效应来制作磁盘系统的读出磁头。在以后的20多年中，就是这样一个非常小的电磁效应对整个计算机存储技术产生了相当深刻的影响。1985年IBM公司将亨特的设想付诸实现。1990年又将感应式的写入薄膜磁头与坡莫合金制作的磁电阻式读出磁头组成双元件一体化的磁头。1991年日立公司报道了在3.5英寸硬盘上利用双元件磁头实现了面密度为 $1\text{Gb}/\text{in}^2$ 的高记录密度。80年代末，在法国巴黎大学Fert教授研究小组工作的巴西学者Baibich发现(Fe/Cr)多层膜的磁电阻效应比坡莫合金的磁电阻效应大一个数量级，这个发现引起了全世界的轰动。这种金属磁性Fe/Cr超晶格样品的电阻随磁场增加而下降负磁阻效应就被称为巨磁电阻效应(GMR)，其电阻比率高达50%，远远超过了多层膜中磁致电阻(MR)的总和。在随后的几年中，有关巨磁电阻效应的研究成果接踵而至。人们不但在“铁磁金属/非磁金属”多层膜中发现了巨磁电阻效应，而且在该颗粒膜中发现了巨磁电阻效应。之后，1994年在类钙钛矿中又发现了特大磁电阻效应。与此同时，磁隧道阀的研究也有了突飞猛进的发展。1994年，在Fe/Al₂O₃/Fe组成的三明治结构中发现其隧道结磁电阻值在室温下可达18%。1995年，在Co-Al-O颗粒膜中同样发现了类似的巨磁电阻效应。到了80年代，Johnson通过铁磁金属将自旋极化的电子流不断地注入非磁金属中，使非磁金属在自旋扩散长度范围内出现自旋积累，产生非平衡磁化，同时将其变为电信

号。这一实验使他首次成功地直接测量了自旋极化的电子在非金属中的自旋弛豫时间。据此, Johnson 于 1993 年也提出了“铁磁金属/非磁金属/铁磁金属”的三明治结构可作为一种新型的金属自旋晶体管的构想。磁电子学就是在这样的研究热潮中迅速地丰富着它的内涵。

2. 理论基础

目前, 在磁电子学领域中有很多种理论如: 能带交换劈裂理论、自旋阀理论、极化子理论等等。下面我们将主要围绕巨磁电阻效应机理的研究来讨论磁电子学的理论体系。

1988 年, Baibich 等人在由 Fe、Cr 交替沉积而形成的多层膜中发现了巨磁电阻效应。图 1 为这种多层膜的电阻变化率与外加磁场 H 的关系曲线。

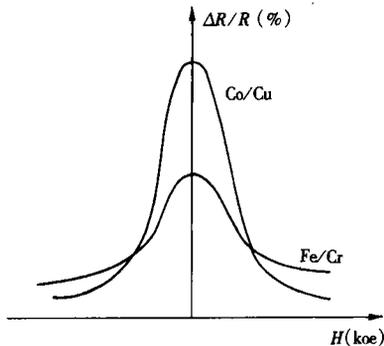


图1 Fe/Cr、Co/Cu 多层膜的电阻变化率与外加磁场的关系曲线

我们知道磁场可以使许多金属的电阻发生变化, 只不过变化率很小, 一般不超过 2%—3%。那么这种材料为什么会有那么大的磁致电阻呢? 这个问题从 1856 年磁致电阻现象发现后直到本世纪末 20 年代量子力学理论建立起来, 人们才得以解释。针对铁磁性金属元素非整数磁矩问题, Stoner 提出了能带劈裂交换理论。我们知道对于普通金属电子的自旋态是简并的, 所以不存在净的磁矩。同样, 费米面附近的电子态也是自旋简并的, 因此输运过程中电子是非自旋极化的。不过, 对于铁磁过渡金属来说, 由于 3d 电子的交换作用, 自旋取向不同的 3d 电子具有不同的能量, 3d 能带分裂成两

个子带, 自旋向上的子带和自旋向下的子带发生相对的位移, 这便是人们所熟悉的“交换劈裂”。由于交换劈裂, 自旋向上的子带(多数自旋)将全部或绝大部分被电子所占据, 而自旋向下的子带(少数自旋)仅部分被电子所占据, 量子带的占据电子数之差正比于它的磁矩。二者的差异造成了铁磁过渡金属元素原子磁矩的非整数性。由于费米面处自旋向上和向下的 3d 电子的态密度相差很大, 所以尽管在费米面处还有少数受交换劈裂影响较小的 s 电子和 p 电子, 传导电流仍是自旋极化的。图 2 为 Stoner 的能带劈裂交换模型。

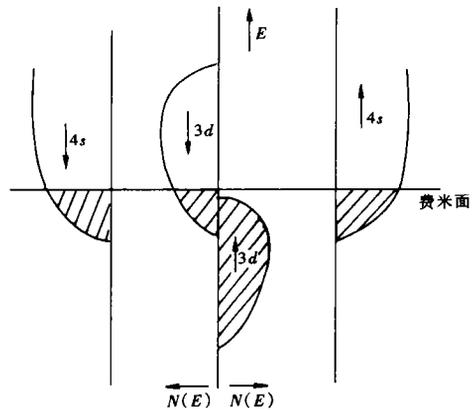


图2 过渡金属的态密度函数 $N(E)$ 示意图

在 Stoner 的模型启示下, 英国著名物理学家, 诺贝尔奖获得者 N. F. Mott 提出了二流体模型。这是一个关于铁磁性金属导电的理论。Mott 认为, 在铁磁金属中, 导电的 s 电子与局部的 d 电子作用, 发生散射, 散射的几率取决于导电的 s 电子自旋方向与固体中磁性原子方向的相对取向。进一步实验表明, 自旋方向与磁矩方向一致的电子受到的散射作用很弱, 而两方向相反的电子则受到强烈的散射作用。传导电子受到散射作用的强弱则直接影响到材料电阻的大小。

1986 年, 德国人 P. Genberg 在 Fe/Cr/Fe 三明治结构中发现, 当 Cr 层厚度合适时, 两 Fe 层之间存在反铁磁耦合作用。根据这一结果, 几十年来一直致力于研究薄膜中的磁致电阻现象的法国巴黎大学的物理学家, A. Fert 设计了图

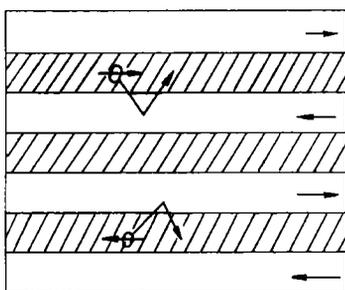
3 所示的 (Fe/Cr) 多层膜, 成功地使磁电阻效应得以放大, 使之成为巨磁电阻。

由此看出, 巨磁电阻从现象发现到理论研究, 最终走向初步的人工设计的轨道上来了。随后, 各国的许多实验室都相继开展了 GMR 的研究。一度, GMR 的研究从理论到实验成果都有了很大的进展, 大量的工作表明, GMR 效应广泛存在于过渡金属磁性多层膜, 纳米尺度的磁性颗粒膜, 自旋阀结构, 磁隧道结以及氧化物薄膜中。对于磁电子学的理论探讨, 本文仅限于巨磁电阻方面。

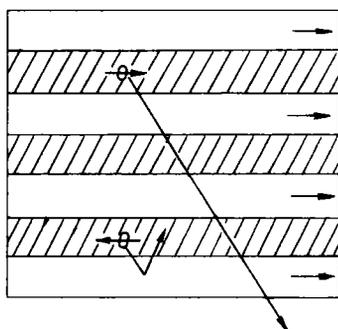
3. 发展方向

(1) 磁性多层膜

根据 Mott 的铁磁金属电导理论, 在多层膜中, 传导电子在不同外加磁场作用下的运动情况是不同的。



(a) 相邻磁层磁矩反平行排列



(b) 相邻磁层磁矩平行排列

图 3

图 3(a) 表示室外场为零时电子的运动状态。此时, 多层膜中同一磁层中原子的磁矩沿同一方向排列, 相邻磁层的磁矩反平行排列。虽然传导电子分成自旋向上和向下的两组, 但

无论哪一种传导电子, 都在穿过磁矩取向与其自旋相同的一个磁层后就会遇到另一个其方向相反的磁层。在宏观上表现为: 多层膜处于高电阻状态。

图 3(b) 是在加上足够大的外场后, 各磁层磁矩取向变成与外磁场一致后的情况。此时, 自旋方向与磁矩取向相同的那一半电子便可顺利地通过所有磁层而只受到微弱的散射作用。即此时有一半传导电子存在一低电阻通道, 在宏观上表现为: 多层膜处于低电阻状态。

在这里, 饱和 GMR 值强烈的依赖于多层膜的具体结构。磁层、非磁层的厚度和结构、周期数 N 、缓冲层的成分及厚度都直接影响到饱和 GMR。研究表明: 当周期数 N 增大时, GMR 值也增大, 最后趋近于饱和。而当非磁层的厚度增大时, GMR 的幅值却随之而减小。

在实际中, 还应考虑磁层与非磁层界面处的自旋相关散射, 即界面散射。同时也要考虑单层厚度远小于传导电子的平均自由程。

(2) 自旋阀

图 4 为典型的自旋阀结构图。自旋阀主要由铁磁层(自由层)/隔离层(非铁磁层)/铁磁层(钉轧层)/反铁磁层组成。其中 AF 为反铁磁层, F 为铁磁层, NM 为非磁性层。

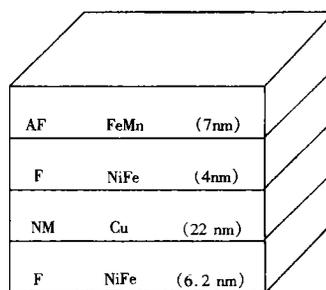


图 4 典型的自旋阀结构图

在制备自旋阀时, 基片上外加一偏置磁场, 两磁性层磁矩平行排列, 这时自旋阀电阻小, 在外加反向磁场时, 自由层首先发生磁化反转, 两磁性层磁矩反平行排列, 自旋阀电阻大。自旋阀电阻的大小取决于自由层磁场是否反转, 故称为自旋阀。

自旋阀对于开发灵敏度高的 GMR 磁电子器件很有意义。目前正在研制低饱和场, 稳定性好, GMR 效应大的自旋阀。

(3) 其他

隧道磁电阻效应是指因外磁场改变隧道铁磁层的磁化状态而导致其电阻变化的现象, 属于自旋阀磁电阻效应。目前一般采用 FM/I/FM 结构, 当两铁磁层磁化方向平行及反平行时, 隧道将具有不同的电阻值。

颗粒膜磁电阻效应与多层膜有不少相似之处, 二者均属于二相或多相复合的非均匀体系, 所不同的是纳米微粒在颗粒膜中呈混乱的统计分布, 而多层膜中相分离具有人工周期结构。对物理问题的理论处理, 多层膜优于颗粒膜, 然而工艺制备颗粒膜却比多层膜简便, 因而它在实际应用上颇受青睐。

4. 应用

巨磁电阻效应的研究在近几年能有如此迅速的发展, 是与它所具有的重要的应用前景分不开的。GMR 一经发现, 人们就预见到了—种比目前已有的 AMR 器件更为灵敏的 GMR 器件。因此 GMR 的研究不光是学术界, 而且在工业界均受到了很高的重视。目前, 对 GMR 的应用处于开发及实用化阶段, 它主要有三个方面。

(1) 传感器

磁传感器主要用来检测磁场的存在、强弱、方向和变化等。普通各向异性磁电阻传感器由于其灵敏度小而限制了它的应用。利用 GMR 制成的高灵敏度、高分辨率的磁传感器器件, 已被广泛应用于家用电器、汽车和自动控制、商标识别、卫星定位、导航系统以及精密测量技术中。其体积小, 灵敏度高, 阻抗低, 抗恶劣环境, 制作成本低的特点, 即将导致传感设备的更新换代。如在先进的录像机中, 采用磁电阻传感器精密地控制其转速的变化, 若录像机精密齿节 MR 传感器采用 GMR 材料后, 其灵敏度提高 6 倍, 可分辨 $15\mu\text{m}$ 的磁齿节, 在汽车工业中使用磁传感器监控转速, 以改善汽车的刹车报死系统。GMR 磁传感器还可用于公路上汽车无人驾驶

系统, 收费系统和卫星导航系统。它也可以制成安全检查设备, 全电子罗盘等, 有着广阔的应用领域和开发前景。

(2) 磁记录读出磁头

计算机, 多媒体高速公路的发展要求高密度、大容量及小型化的外存系统。超高密度磁盘的发展使每个记录单元的尺寸减小到亚微米级, 传统的感应式磁头已无法适应越来越高的要求。因此磁电阻及巨磁电阻磁头就成为实现新型超高密度磁记录的关键技术, 引起了目前各国的争相研究。1994 年 IBM 公司首先在硬盘中使用了自旋阀 GMR 读出磁头, 实现密度为 $1.55\text{TB}/\text{m}^2$ 。1995 年, IBM 公司宣布硬盘密度达到 $4.65\text{TB}/\text{m}^2$ 。1996 年, 该公司进一步将硬盘密度提高到 $7.75\text{TB}/\text{m}^2$ 。目前, 美国国家存储协会 (NSFC) 和日本信息存储协会 (SRC) 均组织了联合体, 协同作战。估计到 2000 年, 通过研制出具有耐腐蚀、稳定性好、巨磁电阻效应大的 GMR 材料, 使硬盘密度超过 $15.5\text{—}30.0\text{TB}/\text{m}^2$ 。到那时, 如此优越性能的硬盘 (容量超过 1000 亿字节, 存取速度 $< 10\text{ms}$, 数据传输率大于 $440\text{Mb}/\text{s}$ 。以及位价格低于 0.1 美元/M 字节) 将在高速运算, 网络服务和多媒体信息库方面发挥不可替代的作用, 并产生极为深远的影响。

(3) GMR 随机存储器 (MRAM)

目前广泛采用的 RAM 是半导体动态存储器 (DRAM) 和静态存储器 (SRAM)。DRAM 密度为 $0.4\text{Gbit}/\text{cm}^2$, 存取时间 $15\text{—}20\text{ns}$, 而 SRAM 的存取密度为 $0.003\text{Gbit}/\text{cm}^2$, 存取时间为 2ns , 且两者均为易失性 (即机器断电时, 所存数据全部丢失), 抗辐射性能差, 给使用带来了极大的不便。

MRAM 和现有的半导体相比, 最大的优点是非易失, 抗辐射, 长寿命和低成本。由于使用了 GMR 材料, 可实现 $10\text{Gbit}/\text{cm}^2$ 的存储密度和 0.5ns 的存储时间。因此 MRAM 的采用将是计算机内存的一场革命。在国防和民用工业中都有着不可低估的价值和应用前景。如计算机的 BIOS 芯片、蜂窝电话、传真机、固态录像机、个

简论热力学熵、信息熵及熵的泛化

魏 环

(河北理工学院基础部 唐山 063009)

热力学熵 熵是克劳修斯于1865年定义并命名的一个热力学系统的状态函数,它严格应用于系统的热运动,故又称“热力学熵”。熵的英文为“entropy”,是克劳修斯用两个希腊字拼合而成,“en”是能量的词冠,“tropy”意为转移和变化,因此,熵是一个与热力学过程中的能量变化有关的量。根据热力学第一、第二定律,有

$$dA \leq - (dU - TdS) \quad (1)$$

式中 U 、 S 、 T 分别为系统的内能、熵和温度, dA 为系统对外做的功。式(1)表明:在热力学过程中,系统被消耗的内能分为两部分,能用来对外做功的能量为 $(dU - TdS)$, 而另一部分能量 TdS 则不可利用,它失去了做功的潜力,是退化了的能量。并且,这部分不可利用能在量值上与该过程中系统的熵增成正比。因此,是熵将能量再分为两类:熵从反面量度系统的运动转化潜力,熵是系统能量品位的量度。系统的

人数字助理机(PDA)和大容量电子存储器方面都有良好的应用前景。特别是抗辐射性能,在军事目的和在航天航空中的应用有重要的意义。

目前,各国在政府资助下正在积极开展 MRAM 的研究工作,预测到2000年,容量达 $15.5\text{TB}/\text{cm}^2$, 存储时间减少到纳秒级的 MRAM 将进入市场。

总之,从1988年发现 GMR 效应到1994年 IBM 宣布制成高性能 GMR 硬盘读出磁头和现在 GMR 在各领域中的应用研究,对 GMR 的研究正以惊人的速度从基础研究进入实际应用,这也体现了目前各国对有应用前景的科研项目支持远大于对其他一般性研究课题的支持水平。在市场经济中,谁走在巨磁电阻研究的前沿,谁就将领导一个新的技术革命,谁就会拥有

熵越高,其能量的品位越低、对外做功的潜力越小、可用性越小。在自然界中,一切真实的过程都是不可逆的过程,也是熵增加的过程,因此,一切真实过程的进行都会导致能量的退化、贬值。熵的这种性质,也使其为一切热力学过程发生的条件、进行的方向及进行的限度提供了普遍的判据。

从分子运动的观点看,熵是系统内分子运动紊乱程度的测度,即

$$S = k \ln W \quad (2)$$

式中 W 为系统的微观态数,又称为热力学概率。式(2)表明:分子运动越是无序,系统的熵就越高。玻尔兹曼对熵做出的这一统计解释,为熵的泛化奠定了理论基础。

信息熵 从通讯的角度看,由于随机性的干扰(即噪音)是无法避免的,因此,通讯系统具有统计的特征,信号源可视为一组随机事件的

市场。因此 GMR 技术的应用研究将会给我们带来丰厚的经济利益。

5. 学科意义及启示

磁电子学的兴起有重要的意义。从科学发展史上看,各学科间的相互促进也是很有意义的。在本世纪初,由于现代物理学的两大基础——量子论和相对论的建立,铁磁性理论才从唯象理论进展到微观理论。也为从真空电子学发展到固体电子学奠定了基础。到本世纪中期,在现代物理学基础上发展了现代固体物理学和凝聚态物理学,由此又发展了各种技术从而推动了磁性材料从金属到高电阻率的非金属铁氧体的发展。到本世纪后期,由于电子自旋与电子传导结合的磁电子学就是一个证明。从生产力的发展上看,磁电子学的兴起将极大地推动人类文明的发展和创造出巨大的社会财富。