

特约专栏

各向异性磁电阻材料的研究进展

皇甫加顺¹, 盛 树¹, 李宝河², 于广华¹

(1. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 北京工商大学理学院, 北京 100048)

摘 要: 各向异性磁电阻效应是自旋电子学中的一种非常重要的物理现象, 其在诸多相关领域有着广泛的应用前景, 因而也是材料科学研究中最具吸引力的方向之一。分别介绍了传统坡莫合金各向异性磁电阻、隧穿各向异性磁电阻、弹道各向异性磁电阻、库仑阻塞各向异性磁电阻、异常各向异性磁电阻以及反铁磁隧穿各向异性磁电阻的研究进展, 提出了一些研究中面临的挑战并对发展方向作出展望。

关键词: 各向异性磁电阻; 自旋轨道耦合; 自旋电子学

中图分类号: TM271; O484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)10-0014-08

Research Progress on Anisotropic Magnetoresistance

HUANGFU Jiashun¹, SHENG Shu¹, LI Baohe², YU Guanghua¹

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. School of Science, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Anisotropic magnetoresistance (AMR) effect is an important physical phenomenon, as provide a wide perspective in many relevant fields as well as has been one of the most attractive research directions in material science. In this paper, we have summarized the recent advances in AMR including conventional permalloy AMR, tunnel AMR, ballistic AMR, coulomb blockade AMR, anomalous AMR, and antiferromagnet AMR. The facing problems as well as the challenges have also been briefly discussed. Moreover, development tendencies were prospected.

Key words: anisotropic magnetoresistance; spin-orbit coupling; spintronics

1 前 言

基于自旋极化和自旋电子相关输运过程基础上的自旋电子学, 给微电子器件的应用带来了革命性的变化^[1-4]。电子既是电荷的载体, 同时又是自旋的载体。随着研究的深入, 人们发现低维纳米尺度的体系中自旋自由度在很多方面优于电荷, 充分利用电子的自旋属性, 有可能获得功能更强大、操控更方便、处理速度更快的新一代微电子器件。

各向异性磁电阻(AMR)效应是自旋电子学中的一种非常重要的物理现象。1857年 William Thomson^[5]在铁磁金属中发现了AMR; 一个世纪后, AMR被成功地作为磁头应用在磁记录中^[6], 迈出了其走向应用的关键一步; 而后, AMR又被应用到传感器等领域^[7-11], 其

潜力得到进一步发挥; 如今, 虽然AMR作为磁头的功能已经被自旋阀等其它磁电子元件取代^[12-13], 但其角度敏感的特征因具有不可替代的优点和广泛的应用前景而一直受到相关领域的关注。近年来, 随着AMR家族新成员的加入^[14-18], 使其更加引人注目。总之, AMR所蕴含的无限魅力使之一直成为自旋电子学研究最关注的方向之一。

通常情况下, AMR是指铁磁材料的电阻率随自身磁化强度和电流方向夹角改变而变化的现象(以前有人称其为方向效应, 或者铁磁体电阻率各向异性)。它的微观机制是基于自旋轨道耦合作用诱导的态密度及自旋相关散射的各向异性。这一点也使得其有别于其它依靠自旋极化电子的注入和检测的磁电阻效应(如巨磁电阻、隧道磁电阻)。

为了更加深入理解各向异性磁电阻的内在机理和不断挖掘其在应用中的潜力, 人们对AMR的展开了多方面的探索和研究。本文将介绍新材料体系中相应的新型AMR的研究进展情况。

收稿日期: 2011-05-01

基金项目: 国家自然科学基金(51071023); 北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR201007122)

通信作者: 于广华, 男, 1966年生, 教授, 博士生导师

2 新型 AMR 的研究进展

由于 NiFe 坡莫合金 AMR 已经显示出在弱场测量中的巨大优越性, 所以这些年相关的研究工作主要集中在 NiFe 薄膜体系中, 并取得了长足的进展^[19-25] (相关其它材料如 NiCo、FeCo 等在这里不再讨论); 近几年来, 在铁磁半导体隧穿结构^[14]中也发现了 AMR 现象; 此外, 在纳米线^[15]、单电子晶体管结构^[16]、钙钛矿型锰氧化物^[17]和基于反铁磁隧穿结构^[18]中的 AMR 效应的研究也取得了很大进展。下面分别介绍这些新型 AMR 的研究进展。

2.1 传统 NiFe 坡莫合金 AMR

介绍传统 NiFe 坡莫合金 AMR 研究进展之前, 先来明确 AMR 传感器需要优化的指标及其之间关系。

如图 1 所示, 新一代高灵敏度 AMR 传感器需要材料高的磁场灵敏度 (S_v) 和信噪比 (或称低噪音), 而高的 S_v 是需要首先获得的关键指标。为了获得高的 S_v , 就需要设法提高材料的磁电阻 (MR), 同时尽可能降低材料的饱和场。另外, 在应用时, 还需要薄膜厚度尽可能小, 以减小退磁场。

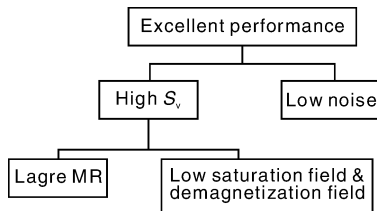


图 1 AMR 传感器需要优化的指标及其之间关系

Fig. 1 Index to be optimized for AMR sensors and the relationship between them

当薄膜厚度减小到与自旋电子的平均自由程相当时, 界面散射对材料电阻率的影响就会变得非常突出。晶界和界面处电子的散射会使坡莫合金的电阻率迅速增大, 从而导致 MR ($MR = \Delta\rho/\rho$) 的急剧减小。想办法提高电阻率变化 $\Delta\rho$ 和降低薄膜的本底电阻率 ρ 是提高 AMR 材料性能的有效办法。近几年来, 通过改善界面处电子散射情况的研究引起了人们的极大兴趣^[23-28]。

Dieny 等人^[29]研究发现, 通过改变界面处的镜面电子反射系数, 可以有效地降低材料的本底电阻率, 从而提高超薄薄膜的 MR。Ding 等人^[24]通过对一系列纳米氧化物插层的研究, 发现在 Ta/NiFe/Ta 结构的薄膜中插入 MgO, 经过 450 °C 退火后 AMR 的性能得到极大提高。如图 2 所示, 对于 NiFe 厚度为 10 nm 的该结构薄膜而言, 经 450 °C 退火后, MR 值由 1.89% 提高至 3.50%, S_v 从 0.65%/79.58 A · m⁻¹ 提高至 2.1%/79.58 A · m⁻¹。

这些都远远超过 Dieny 等人^[29]所预测的理论值。更加令人欣喜的是, 该结构薄膜按惠斯通电桥的结构微加工成地磁传感元件 (30 μm) 后, 元件的 S_v 高达 3.3 mV/V/79.58 A · m⁻¹, 这使其具有更强的方向敏感性。通过微结构分析表明, MgO 在退火后大量晶化, 其对自旋电子起到了明显的镜面反射作用, 使得薄膜的 MR 及 S_v 显著提高。这使新一代高灵敏度 AMR 传感器的设计前进了一大步。

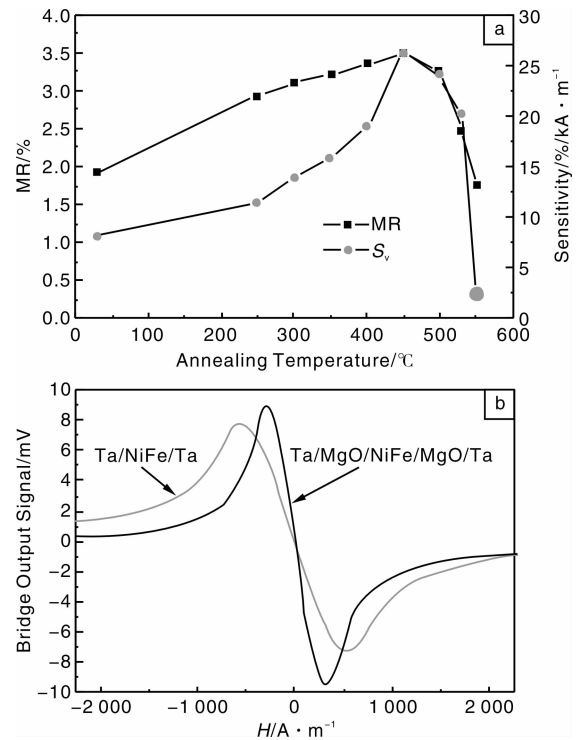


图 2 Ta/MgO/NiFe(10 nm)/MgO/Ta 结构薄膜在不同退火温度下的 MR 以及 S_v 随退火温度变化关系曲线 (a) 以及 450 °C 退火微加工成元件后与 Ta/NiFe(10 nm)/Ta 和 Ta/MgO/NiFe(10 nm)/MgO/Ta 的信号输出响应曲线 (b)

Fig. 2 MR and S_v as a function of annealed temperature for Ta/MgO/NiFe(10 nm)/MgO/Ta (a) and MR transfer curves for elements with the structure of Ta/MgO/NiFe(10 nm)/MgO/Ta and Ta/NiFe(10 nm)/Ta annealed at 450 °C (b)

考虑到 Pt 具有强自旋轨道耦合作用, Liu^[25]等人又通过在 Ta/NiFe/Ta 中增加界面 Pt 插层的办法, 显著地提高了 NiFe 的各向异性磁电阻变化。这是由界面的 Pt 原子对自旋电子的强自旋轨道相关散射作用引起的。同时, Pt 插层还可以抑制界面间的磁死层和避免在热处理时 Ta 和 NiFe 的互扩散。在以往的研究中, Lee 和 Tsann 等人^[30-31]用 NiFeCr 和 NiCr 做底层, 提高了坡莫合金的磁电阻, 但同时也增加了矫顽力。考虑到 NiFe 在 NiFeCr 上可以外延生长, 再加上 Pt 的强自旋轨道耦合作用, Ding 等人^[32]又设计出全金属高灵敏度 NiFeCr/

NiFe/Pt/Ta 结构的薄膜材料。这种结构通过 NiFe 在 NiFeCr 上外延式生长, 以及界面 Pt 原子对自旋电子的强自旋轨道相关散射作用, 薄膜的磁场灵敏度可以达到 $1.8\%/79.58 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。Liu 和 Ding 等人设计的这种全金属 NiFe 薄膜的 MR 值和 S_v 虽然不如引入 MgO 插层的 NiFe 薄膜, 但其不需要高温退火就具有很高的 S_v , 这比较有利于生产。另外, 金属之间的热膨胀系数比较接近, 避免了器件产生较高的噪音, 使其具有很好的应用前景。

2.2 隧穿 AMR

隧穿 AMR 是在单一铁磁层的隧穿结构中产生的各向异性的磁电阻现象。其机制是强的自旋轨道耦合作用所导致的态密度相对于磁矩的各向异性。

在微电子学领域中, 人们总是寄希望于在依靠自旋操控的元件中找到低耗散替代品, 而且, 自旋电子学还被期望将信息处理和存储功能整片集成, 这为实现电脑的即时开关开辟了一个很有吸引力的前景。为了实现这一目标, 目前的研究主要是在两层铁磁半导体中插入隧穿势垒层的体系中的。如此一来, (Ga, Mn)As/(Al, Ga)As/(Ga, Mn)As 结构被进行了广泛的研究^[33-34]。2004 年, Gould 等人^[14]为了对上述结构的隧穿物理现象的全面理解, 研究了单一铁磁层 (Ga, Mn)As 配上一个隧穿势垒层 AlO_x 和一个无磁金属接触层 Au 的结构, 在低于 20 K 时的输运性能时发现了隧穿 AMR 效应, 研究结果如图 3 所示。(Ga, Mn)As/ AlO_x /Au 结构中测量的磁电阻依赖于磁化强度和晶体轴之间的夹角。在这种新的自旋电子学装置中, 产生了一种类自旋阀的效应。这是由于单铁磁层中强的自旋轨道耦合作用, 而非两个耦合铁磁层中自旋极化电流的注入和探测。同时, 第 2 个铁磁层的消除, 使得这种结构更有利于后处理工艺 (如退火等)。虽然这种效应比较小 (只有 3% 左右), 但是隧穿 AMR 所展现出的丰富的物理学现象及其潜在的应用价值, 激起了对自旋电子学领域广泛的研究兴趣, 开辟了自旋电子学研究的一个新分支。

随后, 人们在实验和理论上对不同体系的隧穿 AMR 进行了广泛的研究, 相关报道如雨后春笋般出现。2005 年, Rüster 等人^[35-36]发现完全外延的 (Ga, Mn)As/(Al, Ga)As/(Ga, Mn)As 层在 1.7 K 下的 MR 可达 150 000%, 这里要特别注意区分隧穿 AMR 和各向异性隧穿磁电阻的概念: 上述结构具有两个铁磁层, 可能发生自旋极化电流的注入, 因此应该属于后者的范畴^[37]; Saito 等人^[38]研究了完全外延的异质结构 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}/\text{ZnSe}/\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, 从实验上证明了隧穿 AMR 起源于 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 价带中强自旋轨道相互作用导致的费米面态密度相对于磁化强度的各向异性。2006 年, Shick

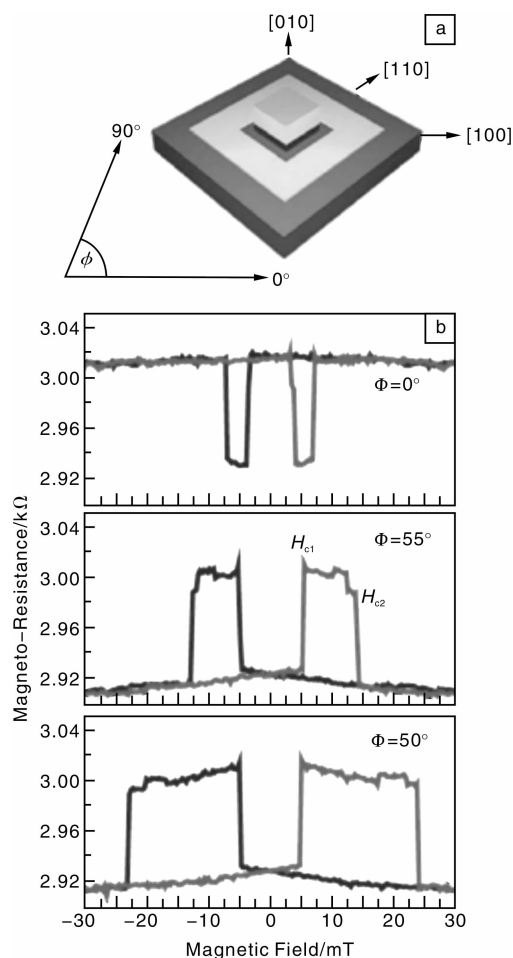


图 3 (Ga, Mn)As/ AlO_x /Au 结构隧穿 AMR 的接触几何学与晶体学方向示意图 (a) 以及滞后磁电阻曲线 (b)

Fig. 3 Device schematic showing the contact geometry and the crystallographic directions (a) and hysteretic MR curves (b) for tunnel AMR of (Ga, Mn)As/ AlO_x /Au structure

等人^[39]从理论上研究了 CoPt 体系的态密度和磁晶各向异性, 计算出 CoPt 体系整体的态密度各向异性要大于相应的 (Ga, Mn)As 体系, 预测了在这些金属铁磁层体系中可能产生相当大的隧穿 AMR 效应, 给出了一个获得室温隧穿 AMR 的前景。2007 年, Moser 等人^[40]在 Fe/GaAs/Au 隧道结中也发现了隧穿 AMR 效应, 但由于 Fe 的弱自旋轨道耦合作用, 其变化幅度小于 0.5%; Gao 等人^[41]在用晶态 MgO 和无定形态 Al_2O_3 做隧穿势垒层及用弱自旋轨道耦合作用的 3d 过渡铁磁金属作为电极的磁性隧道结中, 观察到了隧穿 AMR 效应; Chantis 等人^[42]利用第一性原理计算了 Fe(001) 表面和界面, 预示了利用界面共振态的 Rashba 转移可以在低偏压下获得高达 20% 的隧穿 AMR 效应。2008 年, Park 等人^[43]研究了具有强的自旋轨道耦合作用的 Multilayer (Co/Pt)/ AlO_x /Pt 结构中的隧穿 AMR (约 15%), 并对其优化

设计提出了一些策略; Shick 等人^[44]研究了 $3d-4(5)d$ Mn/W(001) 多层双金属结构, 并用第一性原理预示了大的磁各向异性和态密度各向异性将会产生大的隧穿 AMR 效应。最近几年, 有关隧穿 AMR 的研究工作相继被大量报道。Wimmer 等人^[45]的研究表明, Fe/GaAs/Au 结构中的隧穿 AMR 现象归因于在 GaAs 势垒层中磁场轨道效应和 Dresselhaus 自旋轨道耦合的相互作用, 而 Bychkov-Rashba 自旋轨道耦合并没有发挥作用; Matos-Abiadue 等人^[46]基于一般的对称性考虑, 通过自旋轨道耦合的特殊形式, 研究了隧穿 AMR 是如何被磁化强度方向决定的; Jia 等人^[47]研究了“正常金属/螺旋多铁体/铁磁体”异质结构中的角度和自旋相关的输运性质, 证实了其中的隧穿 AMR 效应是由隧道结中的螺旋磁有序和多铁体间隔层中定域化的磁矩的拓扑结构诱导的有效自旋轨道耦合作用产生的; Uemura 等人^[48]通过对在 GaAs 上外延生长的 CoFe 层的研究发现, 隧穿 AMR 起因于电子结构的各向异性而非材料结构的各向异性; 最令人欣喜的是, Mark 等人^[49]将电流诱导开关用于磁状态写入器和隧穿 AMR 作为状态读出器结合起来, 实现了铁磁半导体用于读写装置, 迈出了研究全新信息处理理论框架的关键一步。

此外, 还有很多关于隧穿 AMR 的研究工作也被报道^[50-56], 这里不拟赘述。总之, 隧穿 AMR 作为一种新的物理现象, 其研究还处在基础阶段, 要将付诸实用还有很长的路要走, 然而, 其所提供的巨大应用前景, 已经激发了对自旋电子学领域的广泛兴趣。

2.3 弹道 AMR

弹道 AMR 是当材料的束缚宽度与电子的费米波长相当时, 在一维材料中产生的各向异性磁电阻现象。其原理是当束缚宽度与电子的费米波长相当时, 量子化的电导 ($G = Ne^2/h$) 受自旋轨道耦合作用更强, 从而导致了费米面处能带数量 N 随磁化强度方向的明显变化。

2005 年, Velev 等人^[15]在理论上研究了弹道电导随磁化强度方向的变化, 并预言了弹道 AMR 的存在, 且具有相当大的 MR (约 17%)。我们知道, 当维度减少到小于电子的平均自由程时, 电子输运的机制在纳米尺度束缚的几何结构中改变非常显著。当束缚宽度与电子的费米波长相当时, 电子的输运就变成了弹道输运。在这样的情况下, 电导是量子化的, 其基本单位对非磁性材料来说为 $2e^2/h$, 而磁性材料因交换作用提高了自旋简并度为 e^2/h 。在此以前的 Ni 的弹道输运研究中, 就发现了磁电阻的信号随电流与磁场平行或垂直而不同, 但这种行为被当做传统的 AMR 来解释了^[57]。其实, 这种行为是不同于传统块体材料中 AMR 的, 因为其中的电

子的散射是不起作用的。Velev 等人^[15]对铁磁性的 Ni 和 Fe 纳米线采用第一性原理的方法, 揭示出了其中的弹道 AMR 现象并阐明了其意义。在弹道输运体制中的磁电阻各向异性的起源不同于散射输运体制, 因为在弹道输运中电子散射对电导没有贡献。弹道电导由 $G = Ne^2/h$ 给出, N 为开放的传导通道的数量。这个数量 N 在纳米束缚的几何结构中受自旋轨道相互作用的影响比在块体材料中强的多。自旋与轨道角动量的耦合作用, 使其在前者的投影随磁化方向而不同, 因而产生了各向异性的效应。这样, 通过改变磁化强度方向来改变费米面处能带数量, 从而影响弹道电导。特别指出一点, 弹道 AMR 的机制不同于弹道磁电阻。后者是一个电极的磁矩在外场作用下相对于另外一个电极的重新定向, 而前者的机制是单一饱和磁化方向关于某一几何方向轴的旋转。

到目前为止, 关于弹道输运的研究取得了很大的进展^[58-65]。氧掺杂的原子点接触的一维几何结构被 García 等人预言了高达 1 000% 的 AMR^[64]; Rocha 等人已经在实验中实现了高达 450% 的弹道 AMR^[65]。这种效应因具有可观的磁电阻效应而产生很大的吸引力。

2.4 库仑阻塞 AMR

库仑阻塞 AMR 是指在单电子晶体管结构中产生的 AMR 效应, 由于库仑震荡其磁电阻信号接近电阻变化的幅度。其产生机制是, 在强自旋轨道耦合的铁磁体中, 磁化翻转诱导了大的化学势迁移, 从而导致了铁磁性单电子隧穿体制产生了前所未有的性能。

2006 年, Wunderlich 等人^[16]在铁磁性半导体单电子机制中发现了库仑阻塞 AMR 效应。这种低场滞后的磁电阻效应是在 (Ga, Mn)As 单电子晶体管中产生的, 其变化幅度可达 1 000%。这个效应提供了一个新的功能概念, 即将电子晶体管和永久信息存储结合起来, 或者说在单一纳米尺度下用磁化强度控制晶体管特征。

随后许多学者对该效应进行了一些后续研究^[66-69], 主要是单纳米颗粒中各向异性的磁性单电子管功能和磁库仑效应相关的理论工作, 如 Anne 等人^[67]研究认为, 磁库仑效应是由电荷和自旋自由度之间的相互作用产生的。然而, 相关实验方面的结果还是很缺乏。

2.5 异常 AMR

异常 AMR 是指在钙钛矿型锰氧化物中发现的比传统 AMR 大几个数量级的各向异性磁电阻效应。其机制是晶格结构由立方到斜方的扭曲破坏了对称性, 产生了一个对外场各向异性的磁弹性响应和随之发生的显著的磁输运行为。

2008 年, Li 等人^[17]在钙钛矿型锰氧化物单晶中发现了异常 AMR 效应, 并提出了一个维象模型对其给出

了很好的解释。研究发现,在这种体系中即便弱的各向异性便可以诱发出超大的 AMR 效应。该效应随温度和磁场具有非单调的变化关系,其 MR 甚至可以高于 GMR 和 TMR,比传统 AMR 要高出几个数量级。一个小的晶体学各向异性就激发出如此庞大的 AMR 效应,使之接近于该体系金属-绝缘体转变的界限。这种 AMR 现象不但为基础物理,如材料中自旋轨道和磁弹耦合,提供了详细的信息,还为研究新型 AMR 材料及其应用提供了思路。

此后, Yu 等人^[70]研究了钙钛矿型锰氧化物中的磁轴结构与晶体学方向之间的关系,但目前这方面的后续研究工作还很缺乏。

2.6 反铁磁隧穿 AMR

反铁磁隧穿 AMR 是反铁磁隧穿结构中磁输运行行为的各向异性现象,其机制是基于反铁磁自旋电子学中的自旋轨道耦合作用。2011 年 3 月, Park 等人^[18]将反铁磁引入到了自旋电子学的概念中,并首次发现了反铁磁体中的隧穿各向异性磁电阻现象。以往的研究中,隧穿 AMR 现象只在铁磁体中发现。反铁磁隧穿 AMR 依赖于一个单铁磁电极的磁矩相对方向的变化。然而,根据以前 Shick 和 Jungwirth 等人关于反铁磁体和半导体带结构的研究^[71-72],隧穿 AMR 也应该在反铁磁体中呈现出来,基于此, Park 等人从第一性原理出发,预示了基于自旋轨道耦合现象的反铁磁自旋电子学发展的另外一条路线,即研究反铁磁体系中的磁电阻现象。最终在 NiFe/IrMn/MgO/Pt 结构中实现了反铁磁隧穿 AMR 的设计。他在设计这个结构时考虑到了以下 3 个因素:①双金属体系中,可以将过渡金属的 3d 壳层大的自发矩和贵金属 5d 壳层大的磁敏感性及自旋轨道耦合结合起来,使磁各向异性可达到最大值;②Mn 在过渡金属之间传递的力矩最大,且大多数包含 Mn 的双金属呈现反铁磁有序;③利用软磁 NiFe 和 IrMn 的交换弹簧效应,可以促使 IrMn 层力矩有效的翻转。这样,强的磁各向异性现象和反铁磁自旋电子学的目标就呼之欲出。

Park 等人的这些实验工作,是建立在他们以前“实现一种新的基于反铁磁中磁输运各向异性现象的自旋电子器件”的理论基础上的。据第一性原理预测,大的隧穿 AMR 现象可以在 3d-5d 反铁磁合金中实现。为此,他们设计了一种隧穿元件,如图 4 所示,其只有一个包含 IrMn 反铁磁体的磁性电极和一个被 MgO 势垒层分开的无磁性的 Pt 电极。在低温(4K)下观察到了高达 160% 的反铁磁-隧穿 AMR 信号,这比在过渡金属铁磁体中的隧穿 AMR 大 1~2 个数量级,与传统的包含两个铁磁层的隧道结的磁电阻值相当。在反铁磁隧穿 AMR

中,大的各向异性磁电阻和低开开关场只需要一个磁性电极就能在隧道结结构中实现,这充分说明了反铁磁体在自旋电子学中的应用潜力。

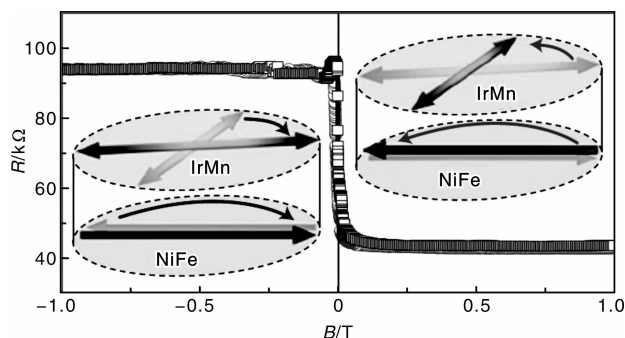


图 4 NiFe/IrMn(1.5 nm)/MgO/Pt 结构所产生的磁电阻信号和反铁磁 IrMn 磁矩翻转的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of magnetoresistance signal and the rotation of antiferromagnet moment in IrMn of NiFe/IrMn(1.5 nm)/MgO/Pt structure

在理论上,这种由自旋轨道耦合诱导的各向异性磁电阻现象,在高温下实现的可能性并没有明显的物理限制。在 Park 等人首创的反铁磁隧穿 AMR 中,虽然低温下(4 K)获得了很大的磁电阻变化率,但是在 100 K 时就变得很小了,这就需要在后续的工作中优化其结构中每一层及其界面。

反铁磁隧穿 AMR 也可以被用作实际实验工具去研究其本身所产生的一些现象。相对于传统的基于铁磁性的自旋电子学,反铁磁自旋电子学概念,很可能成为一种具有吸引力的替代品^[73-74]。若把反铁磁体引入到半导体自旋电子学中,将具更大的意义。我们知道,合成高居里温度的铁磁半导体是一个巨大的挑战。同样地,在最常见的半导体化合物中的磁性对应部分中,发现具有高于室温的安全有序化温度的反铁磁体,也是一个非常巨大的挑战。

3 结 语

坡莫合金 AMR 要想被成功地用在新一代的高灵敏度磁场传感器上,除了继续提高其 S_v , 还需要加大在降低信号噪音方面的研究;对于隧穿 AMR,其潜在的应用价值还有待挖掘,基础理论和应用研究还需继续;弹道 AMR 被预言高达 1 000% 的 MR,这有待去研究实现;若将库仑阻塞 AMR 和电子晶体管结合起来,就有可能实现信息的永久存储;异常 AMR 在低场下就具有很大的磁电阻效应,其机理和应用方面的研究亟待发展;反铁磁隧穿 AMR 刚被发现就显示出巨大的吸引力,其相关理论和应用研究都有待完善。

我国在新型 AMR 的相关研究比较少, 这不适合我国日益增长的对先进功能材料及微电子器件的需求。AMR 效应的研究更需要多领域的交叉和综合协同进行。随着研究的不断深入, 它必将成为最具优势的自旋电子学器件。

参考文献 References

- [1] Jiao Zhengkuan(焦正宽), Cao Guanghan(曹光旱). *Magnetoelectronics*(磁电子学)[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005.
- [2] Han Xiufeng(韩秀峰). 自旋电子学材料、物理和器件设计原理的研究进展[J], *Physics*(物理), 2008, 37(6): 392.
- [3] Zutic L, Fabian J, Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and Applications[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76(2): 323.
- [4] Cai Jianwang(蔡建旺). 磁电子学器件应用原理[J]. *Progress in Physics*(物理学进展), 2006, 26(2): 180.
- [5] William Thomson. On the Electro-Dynamic Qualities of Metals: Effect of Magnetization on the Electric Conductivity of Nickel and Iron[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1857(8): 546–550.
- [6] Hunt R P. A Magnetoresistive Readout Transducer[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1971, 7(1): 150.
- [7] Moran T J, Dahlberg E D. Magnetoresistive Sensor for Weak Magnetic Fields[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(14): 1894.
- [8] Yeh T, Witcraft W F. Effect of Magnetic Anisotropy on Signal and Noise of NiFe Magnetoresistive Sensor[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, 31(6): 3131.
- [9] Casselman T N, Hanka S A. Calculation of the Performance of a Magnetoresistive Permalloy Magnetic Field Sensor[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1980, 16(2): 461.
- [10] Lin T, Gorman G, Tsang C. Antiferromagnetic and Hard-Magnetic Stabilization Schemes for Magneto-Resistive Sensors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(5): 3443.
- [11] Ueda M, Endoh M, Yoda H, et al. AC Bias Type Magneto-Resistive Sensor[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1990, 26(5): 1572.
- [12] Tsang C, Fontana R, Lin T, et al. Design, Fabrication and Testing of Spin-Valve Read Heads for High Density Recording[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, 30(6): 3801.
- [13] Heim D, Fontana R, Tsang C, et al. Design and Operation of Spin Valve Sensors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, 30(2): 316–321.
- [14] Gould C, Rüster C, Jungwirth T, et al. Tunneling Anisotropic Magnetoresistance: A Spin-Valve-Like Tunnel Magneto-Resistance Using a Single Magnetic Layer[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(11): 117203.
- [15] Velez J, Sabirianov R F, Jaswal S S, et al. Ballistic Anisotropic Magnetoresistance[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(12): 127203.
- [16] Wunderlich J, Jungwirth T, Kaestner B, et al. Coulomb Blockade Anisotropic Magnetoresistance Effect in a (Ga, Mn)As Single-Electron Transistor[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(7): 077201.
- [17] Li R W, Wang H B, Wang X W. Anomalous Large Anisotropic Magnetoresistance in a Perovskite Manganite[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(34): 14224.
- [18] Park B G, Wunderlich J, Martí X, et al. A Spin-Valve-Like Magnetoresistance of an Antiferromagnet-Based Tunnel Junctions[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(5): 347.
- [19] Fitzsimmons M R, Silva T J, Crawford T M. Surface Oxidation of Permalloy Thin Films[J]. *Physical Review B*, 2006, 73(1): 014420.
- [20] Volmera M, Neamtu J. Magnetic Field Sensors Based on Permalloy Multilayers and Nanogranular Films[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 316(2): 265.
- [21] Dimitrova P, Andreev S, Popova L, et al. Thin Film Integrated AMR Sensor for Linear Position Measurements[J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 147(2): 387.
- [22] Fassbender J, Von Borany J, Mücklich A, et al. Structural and Magnetic Modification of Cr-Implanted Permalloy[J]. *Physical Review B*, 2006, 73(18): 184410.
- [23] Ding L, Teng J, Zhan Q, et al. Enhancement of the Magnetic Field Sensitivity in Al₂O₃ Encapsulated NiFe Films with Anisotropic Magnetoresistance[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(16): 162506.
- [24] Ding L, Teng J, Wang X C. Designed Synthesis of Materials for High-Sensitivity Geomagnetic Sensors[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(5): 052515.
- [25] Liu Y F, Cai J W, Sun L. Large Enhancement of Anisotropic Magnetoresistance and Thermal Stability in Ta/NiFe/Ta Trilayers with Interfacial Pt Addition[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(9): 092509.
- [26] Ding Lei(丁雷), Wang Le(王乐), Teng Jiao(滕蛟), et al. Al₂O₃ 层对超薄各向异性磁电阻薄膜性能影响的研究[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属), 2009, 33(1): 26.
- [27] Wang Dongwei(王东伟), Ding Lei(丁雷), Wang Le(王乐), et al. 纳米氧化层(NOL)对坡莫合金薄膜性能影响的研究[J]. *Vacuum Electronics*(真空电子技术), 2007, 03(3): 63.
- [28] Wang L, Zhang J Z, Wang L J. Effect of Nano-oxide Layers on the Magnetoresistance of Ultrathin Permalloy films[J]. *Rare Metals*, 2009, 28(6): 624.
- [29] Dieny B, Li M, Liao S H, et al. Effect of Interfacial Specular Electron Reflection on the Anisotropic Magnetoresistance of Magnetic

- Thin Films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88 (7): 4 410.
- [30] Lee W Y, Toney M F, Mauri D. High Magnetoresistance in Sputtered Permalloy Thin Films through Growth on Seed Layers of $(\text{Ni}_{0.81}\text{Fe}_{0.19})_{1-x}\text{Cr}_x$ [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36(1): 381.
- [31] Tsann L, Daniele M, Brian Y. Crystalline Reconstruction in Ni-Cr-Fe/Ni-Fe Films [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(3): 386.
- [32] Ding Lei (丁 雷). *Studies on Magnetoresistance Films for High-sensitivity Geomagnetic Sensors* (高灵敏度地磁导航磁阻薄膜材料的研究) [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010.
- [33] Higo Y, Shimizu H, Tanaka M. Anisotropic Tunnel Magnetoresistance in GaMnAs/AlAs/GaMnAs Ferromagnetic Semiconductor Tunnel Junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 89(11): 6 745.
- [34] Chiba D, Matsukura F, Ohno H. Tunneling Magnetoresistance in (Ga, Mn)As-Based Heterostructures with a GaAs Barrier [C]// The Editorial Committee of This Collected Works. *Physica E*. Amsterdam: Elsevier, 2004: 966–969.
- [35] Rüster C, Gould C, Jungwirth T, *et al.* Very Large Tunneling Anisotropic Magnetoresistance of a (Ga, Mn)As/GaAs/(Ga, Mn)As Stack [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(2): 027 203.
- [36] Giddings A D, Khalid M N, Jungwirth T, *et al.* Large Tunneling Anisotropic Magnetoresistance in (Ga, Mn)As Nanoconstrictions [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(12): 127 202.
- [37] Matos-Abiague A, Fabian J. Anisotropic Tunneling Magnetoresistance and Tunneling Anisotropic Magnetoresistance: Spin-Orbit Coupling in Magnetic Tunnel Junctions [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(15): 155 303.
- [38] Saito H, Yuasa S, Ando K. Origin of the Tunnel Anisotropic Magnetoresistance in $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}/\text{ZnSe}/\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ Magnetic Tunnel Junctions of II-VI/III-V Heterostructures [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(8): 086 604.
- [39] Shick A B, Múca F, Masek J, *et al.* Prospect for Room Temperature Tunneling Anisotropic Magnetoresistance Effect: Density of States Anisotropic in CoPt Systems [J]. *Physical Review B*, 2006, 73(2): 024 418.
- [40] Moser J, Matos-Abiague A, Schuh D, *et al.* Tunneling Anisotropic Magnetoresistance and Spin-orbit Coupling in Fe/GaAs/Au Tunnel Junctions [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(5): 056 601.
- [41] Gao L, Jiang X, Yang S H, *et al.* Bias Voltage Dependence of Tunneling Anisotropic Magnetoresistance in Magnetic Tunnel Junctions with MgO and Al_2O_3 Tunnel Barriers [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(22): 226 602.
- [42] Chantis A N, Belashchenko K D, Tsymlal E Y, *et al.* Tunneling Anisotropic Magnetoresistance Driven by Resonant Surface States: First-principles Calculations on an Fe(001) Surface [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(4): 046 601.
- [43] Park B G, Wunderlich J, Williams D A. Tunneling Anisotropic Magnetoresistance in Multilayer-(Co/Pt)/AlOx/Pt Structures [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(8): 087 204.
- [44] Shick A B, Múca F, Ondráček M. Large Magnetic Anisotropy and Tunneling Anisotropic Magnetoresistance in Layered Bimetallic Nanostructures: Case Study of Mn/W(001) [J]. *Physical Review B*, 2008, 78(5): 054 413.
- [45] Wimmer M, Lobenhofer M, Moser J, *et al.* Orbital Effects on Tunneling Anisotropic Magnetoresistance in Fe/GaAs/Au Junctions [J]. *Physical Review B*, 2009, 80(12): 121 301.
- [46] Matos-Abiague A, Fabian J. Anisotropic Tunneling Magnetoresistance and Tunneling Anisotropic Magnetoresistance: Spin-orbit Coupling in Magnetic Tunnel Junctions [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(15): 155 303.
- [47] Jia C L, Berakdar. Tunnel Anisotropic Magnetoresistance of Helimagnet Tunnel Junctions [J]. *Physical Review B*, 2010, 81(5): 052 406.
- [48] Uemura T, Harada M, Akiho T, *et al.* Influence of GaAs Surface Structure on Tunneling Anisotropic Magnetoresistance and Magnetocrystalline Anisotropy in Epitaxial Co₅₀Fe₅₀/n-GaAs Junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(10): 102 503.
- [49] Mark S, Dürrenfeld P, Pappert K, *et al.* Fully Electrical Read-Write Device Out of a Ferromagnetic Semiconductor [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(5): 057 204.
- [50] He H T, Cao X C, Zhang T, *et al.* Systematic Study of Anisotropic Magnetoresistance Effect in (311)A GaMnAs Films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(6): 063 902.
- [51] Zhan Q F, Vandezande S, Temst, *et al.* Magnetic Anisotropic and Reversal in Epitaxial Fe/MgO(001) Films [J]. *Physical Review B*, 2009, 80(9): 094 416.
- [52] Einwanger A, Ciorga M, Wurstbauer U, *et al.* Tunneling Anisotropic Spin Polarization in Lateral (Ga, Mn)As/GaAs Spin Esaki Diode Devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(15): 152 101.
- [53] Gould C, Mark S, Pappert K, *et al.* An Extensive Comparison of Anisotropic in MBE Grown (Ga, Mn)As Material [J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(5): 055 077.
- [54] Liu R S, Canali C M, Samuelson L, *et al.* Magnetoresistance Studies on Co/AlOx/Au and Co/AlOx/Ni/Au Tunnel Structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(20): 203 107.
- [55] Burton J D, Sabirianov R F, Velev J P. Effect of Tip Resonances on Tunneling Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic Metal Break-junctions: A First-principles Study [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(14): 144 430.
- [56] Chappert C, Fert A, Van Dau F N D. The Emergence of Spin Electronics in Data Storage [J]. *Nature Materials*, 2007, 6(11): 813.

- [57] Yang C S, Zhang C, Doudin B, *et al.* In Situ Magnetoresistance of Ni Nanocontacts[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(15): 2 865.
- [58] Häfner M, Viljas J K, Cuevas J C. Theory of Anisotropic Magnetoresistance in Atomic-sized Ferromagnetic Metal Contacts[J]. *Physical Review B*, 2009, 79(14): 140 410.
- [59] Ben H, Andrew H. Contrasting Spin-Polarization Regimes in Co Nanowires Studied by Density Functional Theory[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(9): 094 442.
- [60] Jacob D, Fernández-Rossier J, Palacios J J. Anisotropic Magnetoresistance in Nanocontacts[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(16): 165 412.
- [61] Autès G, Barreateau C, Spanjaard D, *et al.* Electronic Transport in Iron Atomic Contacts: From the Infinite Wire to Realistic Geometries[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(15): 155 437.
- [62] Kato T, Ishikawa Y, Itoh H, *et al.* Intrinsic Anisotropic Magnetoresistance in Spin-Polarized Two-Dimensional Electron Gas with Rashba Spin-Orbit Interaction[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(23): 233 404.
- [63] Ou M N, Yang T J, Harutyunyan S R, *et al.* Electrical and Thermal Transport in Single Nickel Nanowire[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(6): 063 101.
- [64] García N, Ibarra M R, Hao C, *et al.* Huge Ballistic Magnetoresistance in Multiple Nanocontacts Devices[J]. *Condensed Matters*, 2005, arXiv: cond-mat/0502046 (unpublished).
- [65] Rocha A R, Archer T, Sanvito S. Search for Magnetoresistance in Excess of 1 000% in Ni Point Contacts: Density Functional Calculations[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(5): 054 435.
- [66] Xu X L, Irvine A C, Yang Y, *et al.* Coulomb Oscillations of Indium-Doped ZnO Nanowire Transistors in a Magnetic Field[J]. *Physical Review B*, 2010, 82(19): 195 309.
- [67] Anne B M, Pierre S, Karim B, *et al.* Anisotropic Magnetocoulomb Effects and Magnetic Single-Electron-Transistor Action in a Single Nanoparticle[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(12): 920.
- [68] Jalil M B A, Tan S G, Ma M J. Enhanced Magneto-Coulomb Effect in Asymmetric Ferromagnetic Single Electron Transistors[J]. *Journals of Applied Physics*, 2009, 105(7): 07C 905.
- [69] Fernández-Rossier J, Aguado R, Brey L. Anisotropic Magnetoresistance in Single Electron Transport[J]. *Physica Status Solidi(c)*, 2007, 3(12): 4 231.
- [70] Yu X Z, Li R W, Asaka T, *et al.* Relationship Between Magnetic Domain Configuration and Crystallographic Orientation in a Colossal Magnetoresistive Material[J]. *Journal of Electron Microscopy*, 2010, 59(S1): S95.
- [71] Shick A B, Khmelevskyi S, Mryasov O N, *et al.* Spin-Orbit Coupling Induced Anisotropy Effects in Bimetallic Antiferromagnets: A Route Towards Antiferromagnetic Spintronics[J]. *Physical Review B*, 2010, 81(21): 212 409.
- [72] Jungwirth T, Novák V, Martí X, *et al.* Demonstration of Molecular Beam Epitaxy and a Semiconducting Band Structure for I-Mn-V Compounds[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(3): 035 321.
- [73] Wang L, Wang S G, Rizwan S, *et al.* Magnetoresistance Effect in Antiferromagnet/Nonmagnet/Antiferromagnet Multilayers[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(15): 152 512.
- [74] Ohno H. A Window on the Future of Spintronics[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(12): 952.

“第 13 届国际超导磁通物质态研究会议”在美国芝加哥召开

2011 年 7 月 31 ~ 8 月 4 日, “第 13 届国际超导磁通物质态研究会议”(International Workshop on Vortex Matter in Superconductors)于美国芝加哥顺利召开。该会议是两年一次的系列国际性学术会议中的一次。自 1994 年于法国帕莱首次举办以来, 共举办 13 届。与会专家均是活跃于超导领域的科学家或著名人士。此次会议由美国阿贡国家实验室举办, 共有来自世界 20 多个国家和地区的 130 余人参加了会议。为期 5 天的会议讨论了超导领域的最新研究进展, 包括磁通态成像、反常磁通态性质、磁通态相图、氧化物超导体赝能隙区的可能磁通态、实用超导体的磁通动力学和临界电流问题、Josephson 磁通态和太赫兹辐射、铁基超导体中的磁通态和配对机理、电场诱导超导现象问题等等。以前的系列会议内容一般只涉及较狭窄的磁通态物理问题, 此次有了较大改变, 包括与超导机理的磁通问题(如氧化物赝能隙区域的可能的磁通激发)和应用材料相关的基础研究内容(如钇钡铜氧涂层导体的磁通动力学和临界电流问题), 以及一些超导研究前沿的新动向(如铁基超导体的磁通物理和电场诱导超导电性)。会议受到广泛的关注, 取得圆满成功。

本次会议还设立了与磁通物理相关的第一届阿布里科索夫奖(Abrikosov Award), 授予在超导体磁通物质态方面富有成就的荷兰科学家 Peter Kes 教授, 由诺贝尔物理学奖得主阿布里科索夫亲自颁奖。

此系列会议的召开和阿布里科索夫奖项的设立对促进超导体磁通物质态, 超导体基础材料、机理问题 and 应用基础的研究具有重要意义。经过会议国际顾问委员会的投票, 一致同意下届会议于 2013 年 5 月中下旬于中国南京市南京大学举行。此前中国大陆尚未举办过此类会议。

(南京大学 闻海虎教授供稿)