

自旋电子学材料、物理和器件设计原理的研究进展

韩秀峰[†]

(中国科学院物理研究所 磁学国家重点实验室 北京 100190)

摘要 文章介绍了作者所在实验室在巨磁电阻(GMR)、隧穿磁电阻(TMR)、庞磁电阻(CMR)和反铁磁钉扎薄膜材料以及单晶金属氧化物、高自旋极化率材料、P-N 异质结和纳米环磁随机存储器原理型演示器件设计等研究方面取得的一些重要研究成果和进展。例如:在 Al-O 势垒磁性隧道结材料体系里,获得室温磁电阻超过 80% 的国际最好结果,获得两种高性能层状反铁磁钉扎材料体系;发现具有大的电致电阻效应的 CMR 薄膜材料,并可期望用于电流直接进行磁信息写和读操作的磁存储介质;发现双势垒磁性隧道结中的量子阱态共振隧穿和磁电阻振荡效应,以及纳米器件体系中自旋翻转长度的观测新方法,可用于新型自旋电子学材料及相关器件的人工辅助设计;利用电子自旋共振谱探测和研究了金属氧化物的微观自旋结构和各向异性,在 [CoFe/Pt]_n 磁性金属多层膜中,观测到超高灵敏度的反常霍尔效应;利用纳米环状磁性隧道结作为存储单元,研制出一种新型纳米环磁随机存储器 MRAM 原理型演示器件。

关键词 自旋电子学,巨磁电阻,隧穿磁电阻,庞磁电阻,磁随机存储器,自旋转移力矩,电子自旋共振

Spintronic materials, physics and device designs

HAN Xiu-Feng[†]

(State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190, China)

Abstract Recently, in the State Key Laboratory of Magnetism amorphous Al-O barrier based magnetic-tunnel-junctions (MTJs) with ring-shaped structures and a tunneling magnetic resonance ratio of 80% at room temperature were micro-fabricated. High ordered FePt and antiferromagnetic (Cr₂₅Mn₂₅)Pt₅₀ thin films with good thermal stability and high coercivity were also synthesized. Large current-induced resistance effects in colossal magnetic resonance thin films was observed. A new method was designed to observe spin flip scattering in the nanometer sized spacer layer near the ballistic limit based on MTJs. An important first-principles study of quantum well (QW) states and QW-resonance tunneling in the symmetric epitaxial Fe(001)/MgO/Fe/MgO/Fe double barrier MTJ was performed. Electron spin resonance spectra was successfully used to investigate the interlayer exchange coupling and anisotropic spin structures in layered transition metal oxides. An ultrahigh sensitivity Hall effect was observed in CoFe/Pt multilayers via manipulation of the perpendicular interface anisotropy due to the strong spin-orbit interaction of Pt. Nano-ring MTJs and 4×4 bit nano-ring magnetic random access memory (MRAM) demo devices were fabricated with spin-polarized current (spin transfer torque) switching, which may open a new way for developing MRAM devices.

Keywords spintronics, GMR, TMR, CMR, MRAM, spin transfer torque, electron spin resonance

自从 1988 年在磁性多层膜中发现了巨磁电阻效应(GMR),1993 和 1994 在钙钛矿锰氧化物($R_{1-x}T_x\text{MnO}_3$, R 为稀土元素, T 为二价碱土金属)中发现了庞磁电阻效应(CMR),特别是 1995 年在铁磁性隧道结材料中发现了室温高隧穿磁电阻效应(TMR)以及后续形成的稀磁半导体等研究热潮^[1-10],这些具有里程碑意义的人工合成磁性材料

的成功制备和深入研究,不仅迅速推动了近 20 年中凝聚态物理新兴学科——磁电子学(magneto-electronics)和自旋电子学(spin-electronics/spintronics)的形成与快速发展^[11,12],也极大地促进了与自旋极

2008-05-25 收到

[†] Email: xfhan@aphy.iphy.ac.cn

化电子输运相关的磁电阻材料和新型自旋电子学器件的研制和应用。

例如,巨磁电阻(GMR)是自旋电子学成功应用的范例之一,它从物理发现到材料制备,直至最后器件大规模产业化仅用了不到 10 年的时间。计算机硬盘在 GMR 读出头的推动下,其磁记录密度已从过去 60 Mbit/inch² 发展到目前 ~300 Gbit/inch² (1G = 10⁹, 美国 Seagate Tech. 公司公布的数据),提高了近 5000 倍。2002 年,它仅在硬盘驱动器方面创造的收入就突破 400 亿美元。基于非晶 Al₂O₃ 势垒材料的磁性隧道结(MTJ)和隧穿磁电阻效应(TMR)是自旋电子学的另一个成功应用的范例之一,它从物理发现(1995 年发现 20% 的室温隧穿磁电阻效应)到材料制备和 2005 年 TMR 磁读出头器件大规模生产化(>270 Gbit/inch²)也仅用了不到 10 年时间。2007 年美国西部数据公司(WD)采用基于单晶 Mg(001)势垒的磁性隧道结材料和 TMR 读出头技术结合垂直磁记录介质,实现了 520 Gbit/inch² 磁硬盘面记录密度的演示。

从 1997 年至今,基于以上 GMR 和 TMR 效应的磁读出头产品及其硬磁盘已经被广泛地应用到网络服务器和台式计算机、手提电脑、数字照相机以及 MP3、MP4 等音乐播放器中,显著促进了计算机和信息技术的进步,充分体现了基础科学研究对丰富人类文化生活的的作用。自从 1997 年以来,已经有 50 亿只 GMR 磁读出头被生产和投放市场,而且至今仍然被广泛使用;自从 2004 年开始,大约每年生产 4 亿个隧穿磁电阻(TMR)磁读出头,并不地被投入市场,进入最终用户,正在产生巨大的科技和社会经济效益。磁性金属材料的基础物理研究及其器件应用,已经为磁硬盘工业以及信息技术(IT)的发展带来了革命性的技术更新。正因为如此,2007 年诺贝尔物理学奖授予了巨磁电阻 GMR 的发现者 Albert Fert 和 Peter Grünberg,以表彰他们为当代凝聚态物理和信息科学技术发展所做出的杰出贡献。可以说,分别于 1988 年和 1995 年发现的 GMR 和 TMR 新材料,导致计算机信息存储技术在 21 世纪进入了一个 GMR 和 TMR 时代。

目前,基于 GMR 和 TMR 磁电阻材料的各种磁敏传感器,成为国际上众多公司大力开发和研制的高新技术产品目标,特别是为发展基于磁性隧道结材料和 TMR 效应的 256 Mbit 以上的实用型磁随机存储器(MRAM 芯片),美国、日本等发达国家竞相巨额投资,全面开展了相关的材料、物理和器件应用

研究,加速研发和生产相关重要产品。IBM 等公司在 2004 年已做到了 16 Mbit MRAM 演示器件,美国 Motorola 和 Freescale 公司在 2006 年已推出了 4 Mbit MRAM 标准器件产品并进入市场,美国 Headway 和 MagIC 公司生产的 4 Mbit MRAM 标准器件产品预计 2008 年将进入市场。高密度和高容量 MRAM 芯片的实现,以其低功耗、断电下信息不丢失、抗辐射、高速度、高稳定、使用寿命长等优点,将会使计算机科学和信息产业以及人们日常生活中使用的众多电器产品进入一个新的智能化时代。

因此,研究和发​​展自旋电子学材料、物理及其自旋相关器件,探索和研究新的人工磁电阻结构和功能材料及其器件应用,不仅是过去 20 年也是当前和今后一个相当长时期的国际研究热点和重要领域之一。新型和高性能的自旋电子学人工合成材料及其新的物理效应的进一步发现,能给自旋电子学材料及其自旋相关器件的研制,提供新的生长点,注入新的发展动力。正是在这样一个国内外热点研究持续发展的环境下,在国家自然科学基金委基金项目、国家科技部 973《自旋电子学材料、物理和器件研究》项目、中国科学院“知识创新工程”等相关项目的支持下,中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室有关研究人员,在巨磁电阻(GMR)材料、隧穿磁电阻(TMR)材料、钙钛矿锰氧化物庞磁电阻(CMR)薄膜材料、高自旋极化率材料和半金属 Husler 合金及其单晶材料的制备和功能特性等研究方面,开展了深入系统的研究工作,取得了丰硕的研究成果,通过十几年的努力和积累,目前建立了以自旋电子学材料的制备、微结构和磁结构表征、自旋相关输运性质研究、原理型器件设计为主要发展方向的研究基地和实验平台。

过去二十年来,作者所在实验室在以 GMR、TMR、CMR 等材料体系为发展主线的自旋电子学研究领域,取得了一系列有代表性的研究成果和显著进展,受到国内外同行的高度关注和积极评价,促进了国内外有关自旋电子学材料、物理和器件设计原理的研究工作的开展。文章仅以本实验室最近五年获得的一些有代表性的最新研究进展为例,达到抛砖引玉的目的。

1 高性能磁性隧道结材料的制备和性能优化

如何在大面积基片上获得均匀优质的磁性隧道结材料是目前磁性隧道结材料制备科学中的关键问

题之一,关系到磁性材料能否成功应用于自旋电子器件上.2003—2006年,基于国内现有条件和工艺技术,磁学室相关课题组可在4英寸硅衬底上直接沉积制备出隧穿磁电阻达20%—30%的非晶Al-O势垒磁性隧道结.结电阻与面积的积矢(RA)可调控在1—10 kΩμm²左右,磁电阻均匀性的误差可控制在10%以内,可以满足在4英寸衬底上研制MRAM存储单元演示器件的基本要求.利用深紫外光刻方法或者电子束曝光(EBL)方法及微加工制备工艺,并结合真空带磁场的热处理工艺,磁隧道结功能特性已达到:结面积在2μm×4μm和6μm×12μm(光刻)或者30nm×60nm和300nm×600nm(EBL)之间,室温下TMR=50%—80%,结电阻R_s≤10kΩμm²,反转场≤50 Oe,偏置场≥200 Oe.如图1所示,我们基于国内现有条件制备的Al-O势垒磁性隧道结材料,其中TMR磁电阻比值室温超过80%,4.2K超过100%的Co-Fe-B/Al-O/Co-Fe-B非晶磁性隧道结,其性能指标是目前国际上同类Al-O势垒磁性隧道结材料中获得的最好结果^[13,14].为基于国内现有条件研制和开发MRAM、磁逻辑器件、自旋晶体管等具有重要应用价值的自旋电子学原理型器件奠定了材料基础.

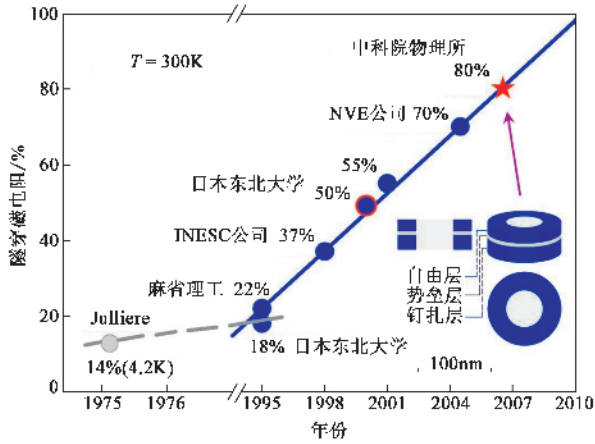


图1 国际上基于非晶Al-O势垒且采用不同Fe、Co、Ni-Fe、Co-Fe、Co-Fe-B等铁磁电极材料制备磁性隧道结材料的发展历程

相关课题组还与英国牛津大学 Roger. C. C. Ward 教授的课题组合作,利用英方的分子束外延生长设备和中方的微加工制备技术,制备出微米和亚微米长方形或椭圆形的单晶磁性隧道结 Fe(001)/MgO(001)/Fe(001),室温隧穿磁电阻为170% (低温为318%)的单晶磁性隧道结,如图2所示,这样的结果达到国际同类材料的先进水平[日本 AIST 课题组, TMR = 188% (低温为247%);法国 LPM

课题组, TMR = 185% (低温为330%)]^[15-18]. 研究发现,单晶 Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)体系的 TMR 温度依赖关系,平行态电阻随温度基本没有变化,而反平行态电阻随温度降低迅速增加.平行态型电导在正负0.4V范围内基本是平的,但反平行态电导呈现典型的抛物线型偏压依赖关系.基于两电极铁磁无序的温度依赖关系以及它们对自旋相关隧穿的影响,提出一个新模型来描述 TMR 比值和电阻的这种温度依赖关系,该模型与实验数据符合得很好.该项工作为今后基于国内条件开展相关 MgO(001)单晶磁性隧道结材料与物理研究,积累了必要的经验和关键技术知识^[19].

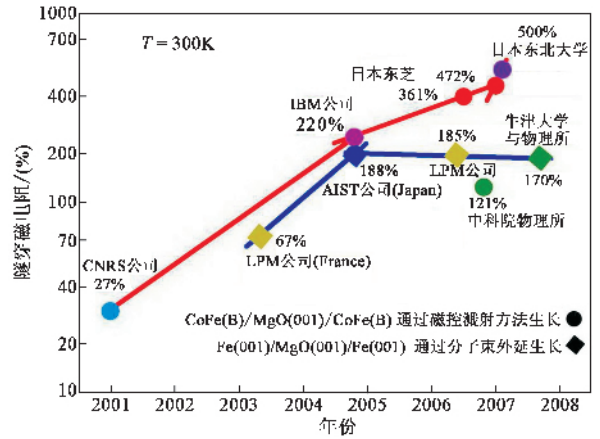


图2 国际上基于单晶 MgO(001)势垒且采用不同 Fe、Co、Co-Fe 和 Co-Fe-B 等铁磁电极材料制备磁性隧道结材料的发展历程

2 FePt 垂直磁记录介质和新型反铁磁钉扎材料的设计和制备

FePt 薄膜目前是发展 100 Gbit/inch² 以上高密度垂直磁记录介质的重要候选材料组成部分之一.降低有序化温度是实现 FePt 薄膜材料作为超高密度磁记录介质必须克服的三大难题之一.磁学室研究人员提出并利用相干生长的多层膜中有序-无序转变过程的彼此关联作用,将 FePt 薄膜的有序转变温度降低了200度以上,为 FePt 薄膜的低温有序化开辟了一条新途径^[20].

磁学室研究人员在层状反铁磁钉扎材料方面也不断获得重要进展,发现 L1₀ 有序相 CrPt 反铁磁作为钉扎层的交换偏置体系表现出前所未有的温度与化学稳定性,其钉扎截止温度比目前常规反铁磁钉扎材料的最高值高出200度;并通过界面原子层调控使其室温交换偏置作用增强了4倍,达到目前实

用反铁磁钉扎体系的最好值,具有很好的稳定性^[21].在反铁磁 CrPt 的基础上,再次研发出了一种拥有更强的交换配置效应、极高的钉扎截止温度且制备过程非常简单的 L1₀ 相有序结构三元反铁磁钉扎材料 (Cr₂₅Mn₂₅)Pt₅₀,比现有常规反铁磁钉扎材料 (Mn₅₀Pt₅₀) 的钉扎作用几乎大了 50%,温度稳定性高出 250 度,同时该材料是一种与高性能 MgO 磁性隧道结所需的高温处理过程 (360 度或以上) 完全一致的反铁磁钉扎材料,可望成为磁电子和自旋电子材料及器件工业中新的钉扎材料.

3 纳米结构材料体系中自旋散射和翻转长度观测及量子阱共振隧穿效应的研究

如何有效地观测自旋翻转的长度 (spin-flip length) 既是自旋电子学中的一个非常重要的基本科学问题,也是人工设计自旋电子学材料结构和研制各种自旋电子学器件的基础.2006 年,相关研究人员发展出一种利用纳米尺度的自旋电子学器件有效观测自旋翻转长度可达微米量级的新方法,即通过高质量单势垒和双势垒隧道结的隧穿磁电阻,有效获取自旋翻转的信息,发现在 4.2K 温度下、位于双势垒隧道结两个双势垒层中间的厚度小于 1nm 的超薄 Cu 层中,测出电子自旋翻转的长度可达到 1—2μm 的量级,这个自旋翻转的长度比 Cu 层本身厚度大千倍以上,并且这个自旋翻转长度与声子对电子的散射相关 (如图 3).这种观测方法对各种非磁性金属具有普适性^[22].

相关研究人员还基于 KKR 方法的第一性原理计算程序,定量计算研究了自旋阀型双势垒磁性隧道结 Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) 中的量子阱以及量子阱共振隧穿效应.计算给出,随着双势垒磁性隧道结中间 Fe(001) (d nm) 自由层厚度 d 的变化而存在的上百个量子阱态,以及这些量子阱态与偏置电压之间的关系和量子阱共振隧穿下的高隧穿磁电阻效应^[23] (见图 4).上述准确观测和研究自旋翻转长度的方法以及量子阱共振隧穿效应的方法,对解决自旋电子学材料中的重要科学问题,进行自旋电子学异质结构层状功能材料的人工设计,特别是对当前设计和研制磁敏感传感器、磁随机存储器、自旋晶体管 and 磁逻辑等,具有重要的参考价值.

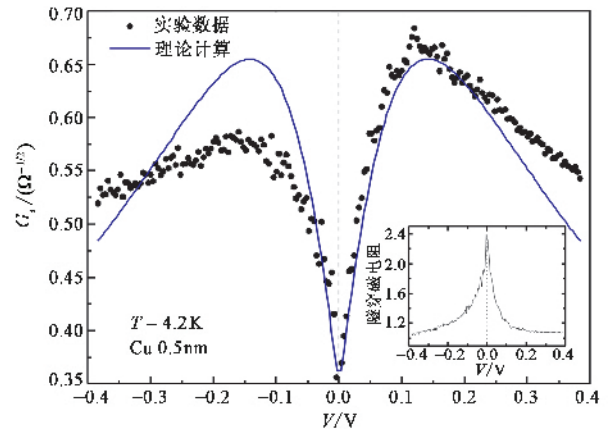


图 3 通过双势垒磁性隧道结的磁电运输性质测量得出中间隔离层中的自旋翻转散射电导 G_s 与温度和偏压的依赖关系,并进一步可以获得电子平均自由程和自旋翻转散射长度等自旋散射信息以及中间层的态密度和量子阱信息

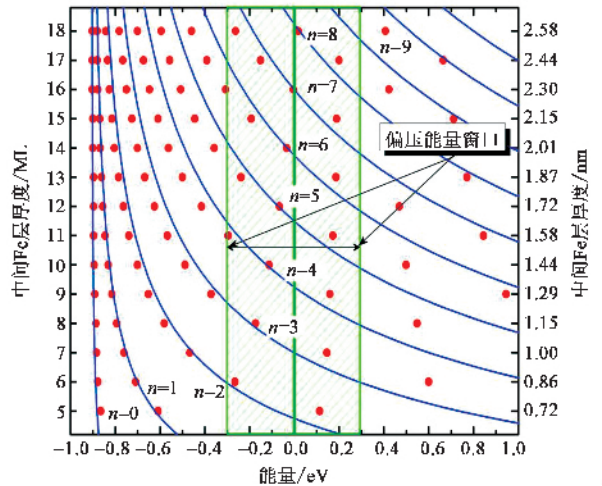


图 4 相对费米能级 $\Delta 1$ 和 1eV 范围中所计算出的多子带量子阱态的能级 (红色) 与 PAM 的拟合结果 (蓝色). 绿色区域表明该双势垒隧道结外加偏压为 0.6 V 时中间 Fe 层电子的输运能量窗口^[23]

4 锰氧化物电致磁电阻在高密度存储材料方面的应用特性

锰氧化物是典型的强关联电子体系,以庞磁电阻效应以及一系列与自旋、轨道、电荷相关的新物理效应引起人们的极大关注.2005 年,有关研究人员在经过强电流处理下的单层锰氧化物薄膜中获得了类 p-n 结行为,正向电阻远远小于反向电阻,偏压为 1 V 时整流比高达 1762 (见图 5).与此同时,薄膜的整流行为强烈依赖于外加磁场,磁场增加整流变弱.相关研究人员还发现,相反极性的电脉冲可以使锰氧化物薄膜电阻在两确定电阻态间可逆切换 (见图 6).

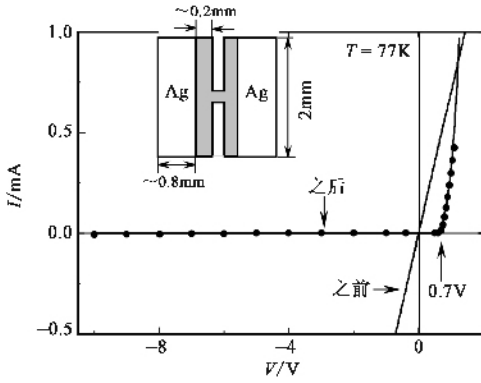


图 5 $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_3$ 薄膜电流处理前后的电流 - 电压特性曲线. 插图显示所示为电极分布. 正方向是处理电流方向 [24]

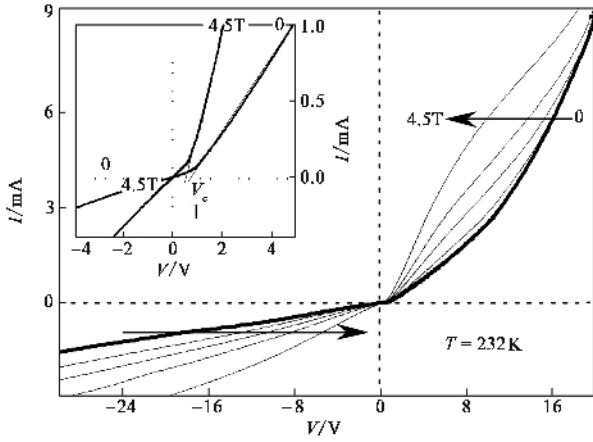


图 6 强电流处理后锰氧化物薄膜的电流 - 电压关系. 正向与反向电流表现出明显的不对称行为, 磁场导致上述不对称规律性变化, 从而产生方向依赖的磁电阻效应 [25]

上述单层氧化物薄膜的电致磁电阻特性与导电载流子的库仑阻塞、量子序的变化以及自旋极化电子在界面穿越势垒的输运行为有关, 不但具有深刻的物理内涵, 同时具有明确的应用前景, 在磁场、电场可控新型微电子材料/器件、电阻型随机存储器的设计与研制等方面具有广阔的发展空间, 为氧化物电子学等新型材料的实际应用奠定了基础 [24, 25].

5 自旋电子学材料的电子自旋共振谱的研究

很多自旋电子学材料, 如过渡金属氧化物, 由于同时存在电荷、自旋、轨道、晶格等多种自由度的关联与耦合, 表现出非常丰富的物理现象, 如庞磁电阻、金属 - 绝缘体转变、电荷/轨道有序等等. 电荷/自旋/轨道多种有序度的共存与竞争往往会导致局域的短程有序和相分离. 宏观的物性测量难以区分

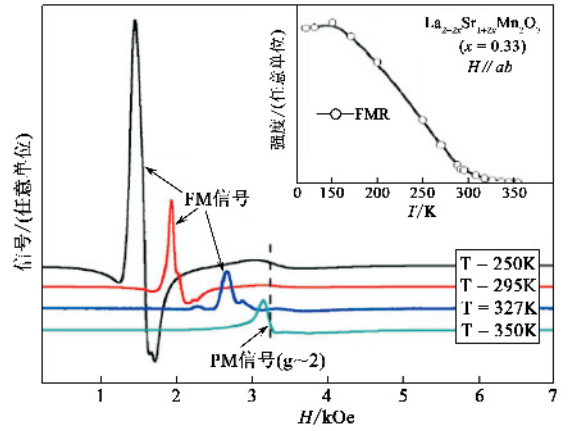


图 7 $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ 的电子自旋共振谱. 铁磁共振信号在居里温度以上很宽的温区内依然出现, 表明在顺磁态存在局域的铁磁关联, 形成 Griffiths 相

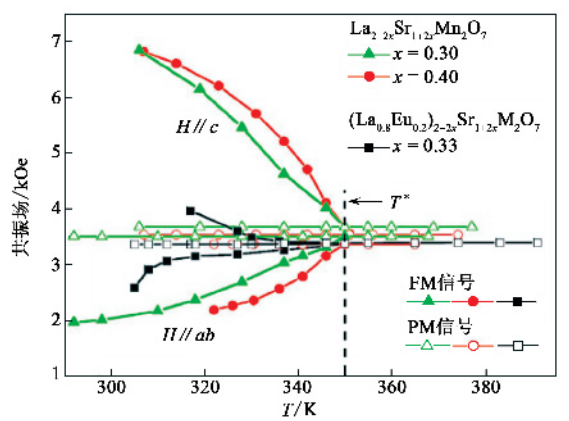


图 8 不同锰氧化物单晶样品的电子自旋共振场随温度的变化关系. 在顺磁态, 所有样品都出现两个共振峰, 铁磁共振峰一直延续到 350 K, 表明本征的相分离在锰氧化物中是普遍存在的

与探测局域的有序与相变, 需要利用微观的研究技术与方法. 相关课题组研究人员制备了高质量的单晶样品, 并利用电子自旋共振 (ESR) 技术对微观有序和各向异性的敏感性, 通过对 ESR 谱的共振场、共振线宽与线型、共振强度等参数随温度、角度变化的分析, 研究了一系列过渡金属氧化物中中程与短程的自旋/电荷/轨道有序相变、局域的自旋 - 晶格弛豫、自旋 - 自旋耦合、自旋 - 轨道耦合、相分离等等物理问题. 实验发现, 铁磁共振峰在超过居里温度以上很宽的温区内依然存在, 表明在顺磁态存在局域的铁磁耦合并形成 Griffiths 相 (图 7, 8). 而庞磁电阻效应的发生温区与 Griffiths 相的温区相吻合, 表明本征的电子相分离与庞磁电阻效应有着密切的关联. 此外, 还发展了利用电子自旋共振研究层状过渡金属氧化物中磁各向异性和层间耦合的方法. 首次实验观察到层状锰氧化物的面内自旋共振谱出现

光学模 表明存在反铁磁层间耦合. 光学模随温度的变化以及光学模与声学模的相对强度反映了层间耦合随温度的演化^[26]. 上述实验结果和方法表明, 电子自旋共振对研究自旋电子学材料中的重要物理问题, 特别是对宏观技术难以探测的微观的自旋结构和各向异性, 提供了重要的研究方法和手段.

6 高自旋极化率材料和铁磁形状记忆合金材料的研究

半金属材料特性在于其能带结构中自旋向上与自旋向下的电子具有不同的导电性质: 自旋向上的电子能带呈现金属的导电特性, 而自旋向下的电子能带则呈现半导体或绝缘体的特性. Heusler 合金为其特有的高有序结构, 成为开发新型半金属材料的重要材料体系.

相关课题组研究人员通过快淬甩带方法首次得到了 Fe_2CrSi 的高有序 L_{21} 单相, 并通过第一性原理计算和实验测量详细研究了它们的电子结构与磁性. 图 9 给出了 Fe_2CrSi 的能态密度图, 它表明 Fe_2CrSi 是一个很好的半金属材料, 其向下自旋能带在费米能级处有一个能隙, 而在向上自旋有态密度峰, 这使费米能级处的传导电子有完全的自旋极化. 计算表明, Fe_2CrSi 有 $2\mu_B/\text{f. u.}$ 的自旋磁矩, 与 5K 下的饱和磁矩 $2.05\mu_B/\text{f. u.}$ 符合很好. 其居里温度为 520K, 远高于室温. 同时能带计算表明, Fe_2CrSi 的自旋极化率对于晶格畸变与原子反占位不是十分敏感, 这有利于实际应用^[27].

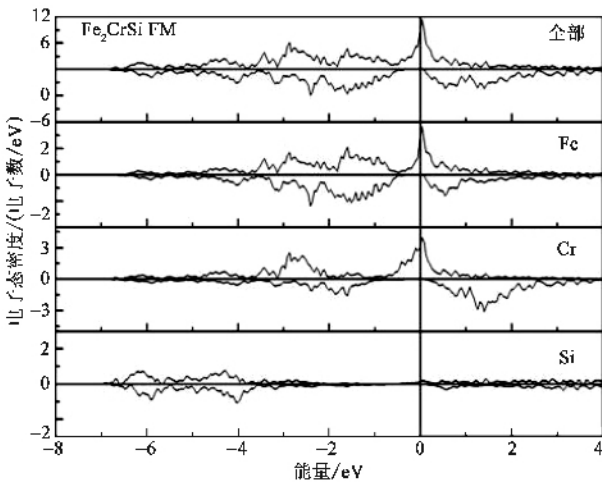


图 9 半金属材料 Fe_2CrSi 的电子结构表明它是一个很好的半金属材料, 费米能级处的传导电子有完全的自旋极化

2006 年初, 人们在 NiMnIn 掺 Co 后观察到了由磁场诱发的马氏体相变. 这是首次在数特斯拉磁场的范围内观察到马氏体相变温度的明显移动, 也是铁磁形状记忆材料领域的研究热点. 相关课题组研究人员采用提拉法和电弧炉熔炼的方法分别制备了高质量的 $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{In}_x$ 系列单晶和多晶样品. 在单晶 $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{In}_{16}$ 中得到了由磁场诱发相变带来的高达 80% 的磁电阻^[28] (见图 10).

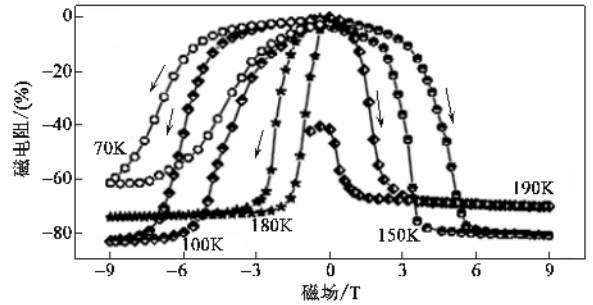


图 10 在单晶 $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{In}_{16}$ 中观测到的由磁场诱发相变带来的高达 80% 的磁电阻

7 磁性金属多层膜超高灵敏度反常霍尔效应

半导体霍尔器件已经广泛用于传感器中, 但是半导体的高电阻率、低工作频率 (MHz)、高的温度系数以及复杂的制备工艺都阻碍其进一步发展. 金属器件能很好地克服这些问题, 不过金属的载流子浓度很高, 其正常霍尔效应非常微弱. 磁性金属的反常霍尔效应 (EHE) 较正常金属的数值大 3 个数量级以上, 但其磁场灵敏度仍大大低于半导体霍尔器件的对应值. 相关课题组研究人员一方面利用了 Pt 基磁性多层膜界面附近非常有效的自旋-轨道散射, 获得较高的霍尔电阻率; 另一方面利用纳米多层膜的可调的表面或界面各向异性, 通过调节各层膜厚和周期数来调节界面各向异性和形状各向异性, 从而改变饱和场的大小, 最终大大增加了霍尔斜率以及灵敏度. 具体地说, 多层膜由厚度小于 0.5nm 的磁性金属层和厚度为 1nm 左右的 Pt 层交替周期生长而成. 对于 $[\text{CoFe}(2.8\text{\AA})/\text{Pt}(12\text{\AA})]_3$, 在室温下, 霍尔斜率达到 $545\mu\Omega\text{ cm/T}$, 灵敏度可以达到 1200V/A T , 这一结果使反常霍尔效应传感器的磁场灵敏度首次超过半导体霍尔器件的灵敏度. 进一步, 采用 CoFe/Pt 和 Fe/Pt 多层膜的组合结构, 通过调节膜厚和周期数, 还可以得到适用于不同磁场范围 (从 500e 到 1500e) 的霍尔器件^[29].

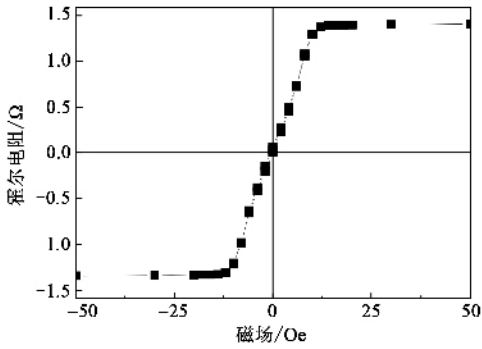


图 11 [CoFe(2.8 Å)/Pt(12 Å)]₃ 多层膜的霍尔斜率达到 545 μΩ cm/T, 灵敏度可以达到 1200 V/AT

8 新型纳米环磁随机存储器原理型器件的设计和研制

基于磁性隧道结作为存储单元的磁随机存储器(MRAM)是国际上近十年发展自旋电子学器件的最重要几个目标之一^[30]。鉴于 MRAM 具有断电情况下的数据非易失性、高集成度、高速读取写入的能力、重复可读写次数近乎无穷大的稳定性、功耗小、优异的抗辐照能力,成为新一代随机存储器(RAM 芯片)的最佳研发目标。有无能力和实力自主研发 MRAM,已成为当前衡量一个国家信息和功能材料及纳米微加工技术发展水平是否处于先进水平的重要标志之一。鉴于 MRAM 在计算机科学、信息科学和工业、民用、军事以及国防等方面的应用重要性,近十年研制磁随机存储器(MRAM)一直是自旋电子学材料和科学技术领域中的一个重点课题。

2002—2006 年相关课题组研究人员首先设计、制备出了室温高性能的 100 nm 左右的小尺寸环状阵列式磁性隧道结;其次在小于正负 1mA 的电流反复驱动下,获得了 TMR 为 20%—50% 的接近长方形的电流驱动的磁电阻 TMR-*I* 或 *R*-*I* 曲线,从物理原理上证实了极化电流驱动 MRAM 的可靠性;最后研制出一种基于“1 个纳米环状磁性隧道结+1 个晶体管”结构的新型 4×4 bit MRAM 原理型演示器件,并成功实现了纳米环状磁性隧道结存储单元的读写操作和演示,证实了该项设计的合理性和实用性,这是 MRAM 原理型器件研制的一个有代表性的重要进展^[31,32]。利用纳米环状磁性隧道结存储单元及自旋极化电流驱动的 MRAM 设计和工作原理,可以克服目前常规 MRAM 设计上的缺陷和发展障碍,并在现有半导体工艺技术的基础上,有望实现密度

和容量可达 1—4 Gbit/inch² 以上的 MRAM 器件产品,并可以进一步得到提高。

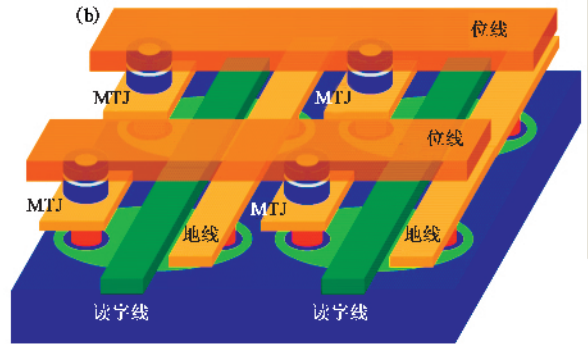
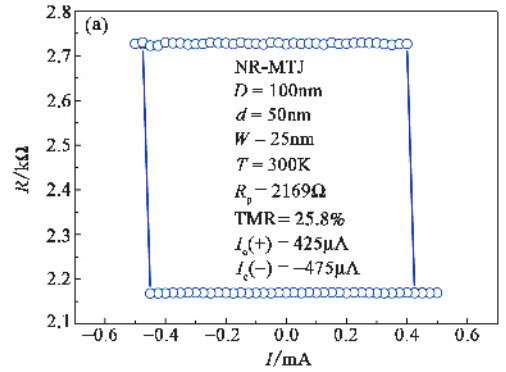


图 12 (a)在一个自旋极化脉冲 DC 电流驱动下得到的内外径分别为 50nm 和 100nm 的纳米环状磁性隧道结的 TMR-*I* 和 *R*-*I* 曲线 (*D* 为直径, *W* 为宽度, *T* 为温度, *R_p* 为平行状态电阻, TMR 为隧穿磁电阻, *I_c* 为临界电流) (b) 采用纳米环状磁性隧道结存储单元的 2×2 bit MRAM 原理结构示意图

9 结束语

对新型自旋电子学材料、物理和原理型器件的研究,不仅具有重大基础科学研究价值,而且由于其重要的功能特性和新技术应用特性,已超过十年连续推动了超高密度存储、微机电传感系统和自旋电子器件等领域的技术变革和飞速进步。该研究领域不但是目前国际上磁学、磁性材料和磁电阻功能材料及器件研究领域里的热点,也是整个凝聚态物理领域的重要研究方向。积极探索新型自旋电子学功能材料,并以新材料为重点开展广泛的磁特性、电子自旋、磁电、磁热、磁光效应和自旋量子调控等方面的应用基础研究,探索微观电子结构、自旋相关的微磁结构、交换耦合、表面和界面效应等对材料功能特性的影响,可以引领新型自旋电子学原理型器件的研制。新型的自旋电子学元器件及其构成的系统,对推动工业和信息产业发展,提高国民经济中低能耗—可环保—高效益产业链比例成分,改善国民文化

生活质量,保障国防安全和金融安全等具有重要的战略意义。开展高性能自旋电子学材料制备、相关物理实验和科学问题探索,推广这些先进的自旋电子学功能材料的应用,进行原理型、演示型、中试型磁电阻器件的研制,可以满足国家在科技和经济发展中对磁性功能材料的现实应用之需求以及中长期发展规划之储备。

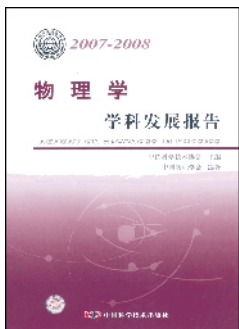
参 考 文 献

- [1] Baibich M N , Broto J M , Fert F *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1988 , 61 : 2472
 [2] Grünberg P , Schreiber R , Pang Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1986 , 57 : 2442
 [3] Binasch G , Grünberg P *et al.* Phys. Rev. B , 1989 , 39 : 4828
 [4] von Helmolt R , Wecker J , Holzapfel B *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1993 , 71 : 2331
 [5] Jin S , Tiefel T H , McCormack M *et al.* Science , 1994 , 264 : 413
 [6] Julliere M. Phys. Lett. A , 1975 , 54 : 225
 [7] Miyazaki T , Tezuka N. J. Magn. Magn. Mater. , 1995 , 139 : L231
 [8] Moodera J S , Kinder L R , Wong T M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1995 , 74 : 3273
 [9] Munekata H , Ohno H , von Molnár S *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1989 , 63 : 1849
 [10] Yamanouchi M , Chiba D , Matsukura F *et al.* Nature , 2004 , 428 : 539
 [11] Prinz G A. Science , 1998 , 282 : 1660
 [12] Wolf S A *et al.* Science , 2001 , 294 : 1488
 [13] Wei H X , Qin Q H , Ma M *et al.* J. Appl. Phys. , 2007 , 101 : 09B501
 [14] Wen Z C , Wei H X , Han X F. Appl. Phys. Lett. , 2007 , 91 : 122511

- [15] Butler W H , Zhang X G *et al.* Phys. Rev. B , 2001 , 63 : 054416
 [16] Parkin S S , Yang S H *et al.* Nature Materials , 2004 , 3 : 862
 [17] Yuasa S , Nagahama T , Fukushima A *et al.* Nature Materials , 2004 , 3 : 868
 [18] Lee Y M , Hayakawa J , Ikeda S *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2007 , 90 : 212507
 [19] Wang S G , Ward R C C , Du G X *et al.* submitted and in reviewing , " Temperature Dependence of Giant Tunnel Magnetoresistance in Epitaxial Fe/MgO/Fe(001) Magnetic Tunnel Junctions " .
 [20] Zhu Y , Cai J W. Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 : 032504
 [21] Dai B , Cai J W , Lai W Y *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 : 092506
 [22] Zeng Z M , Feng J F , Wang Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006 , 97 : 106605
 [23] Wang Y , Lu Z Y , Zhang X G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006 , 97 : 087210
 [24] Sun J R , Liu G J , Zhang S Y *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 , 86 : 242507
 [25] Xie Y W , Sun J R , Wang D J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2006 , 89 : 172507
 [26] Yang R F , Sun Y , He W *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2007 , 90 : 032502
 [27] Luo H Z , Zhu Z Y , Ma L *et al.* J. Phys. D : Appl. Phys. , 2007 , 40 : 7121
 [28] Yu S Y , Liu Z H , Liu G D *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2007 , 90 : 012104
 [29] Zhu Y , Cai J W. Appl. Phys. Lett. , 2007 , 90 : 012104
 [30] Daughton J M. J. Appl. Phys. , 1997 , 81 : 3758
 [31] Han X F , Wei H X , Peng Z L *et al.* Journal of Materials Sciences and Technology , 2007 , 23 : 304
 [32] Han X F , Wen Z C , Wei H X , J. Appl. Phys. , 2008 , 103 : 07E933

· 书评和书讯 ·

新书推荐



《物理学学科发展报告》由中国科学技术出版社出版, 234 页, 定价 40.00 元。直接向《物理》编辑部订购可以享受 7 折优惠, 即 28 元/本(免邮费)。

汇款方式:

(1) 邮局汇款 : 100190 ,

北京 603 信箱《物理》编辑部收;

(2) 银行汇款 : 户名 : 中国科学院物理研究所,

帐号 30948821 - 250101040005699 ,

开户行 : 农行北京科院南路支行。

咨询电话 : (010) 82649470 82649029

联系人 : 王进萍

内容简介:

《物理学学科发展报告》(2007—2008) 是中国物理学会组织专家组编写而成。该报告由五个部分组成。引言部分主要说明物理学的学科性质及物理学的地位与作用; 第一部分介绍当今物理学在向纵深、广度发展的一些特点; 第二部分介绍物理学中各分支学科近年来的进展, 物理学研究中一些大型实验设备的近况; 第三部分介绍我国物理学各分支学科近年来所取得的成绩, 我国物理学大科学工程方面的情况; 第四部分对我国物理学发展提出几点建议。

其中专题报告由 10 个报告组成, 分别是: 高能物理学, 原子核物理学, 等离子体物理学, 光学, 声学, 原子和分子物理学, 凝聚态物理学, 统计物理与复杂系统理论, 相对论、引力理论和宇宙学。另外还有物理学的交叉学科专题, 包括量子信息学、纳米科学技术中的基本物理问题以及物理学与生物学交叉的几个热点问题三个领域。每个专题报告都有详尽的参考文献。

该书适合所有的物理学科科研人员, 高校物理教师和学生, 科学技术管理人员等, 对于了解物理学和近年来物理学的发展态势以及中国物理学研究进展很有参考价值。