

# 磁性隧道结的隧穿磁电阻效应及其研究进展\*

李彦波 魏福林<sup>†</sup> 杨正

(兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室 磁性材料研究所 兰州 730000)

**摘要** 文章概括地介绍了磁性隧道结(MTJs)的隧穿磁电阻(TMR)效应的产生机理和特点,主要用途和研究背景以及最近几年的研究进展和现状.对用 $Al_2O_3$ 和MgO做绝缘势垒层的MTJs进行了对比,指出用MgO做绝缘势垒层的MTJs的优点.文章还阐明了交换偏置自旋阀(EB-SV)型MTJs的问题和不足,以及新兴的赝自旋阀(PSV)型MTJs的优势.文章最后总结了用于MTJs的各种铁磁层和绝缘势垒层材料,并对TMR材料今后的研究和开发作了展望.

**关键词** 凝聚态物理学 隧穿磁电阻(TMR) 综述 磁性隧道结(MTJs) 交换偏置自旋阀(EB-SV) 赝自旋阀(PSV)

## Tunnelling magnetoresistance effects of magnetic tunnel junctions

LI Yan-Bo WEI Fu-Lin<sup>†</sup> YANG Zheng

(Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Materials of the Ministry of Education, Research Institute of Magnetic Materials, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The mechanism, characteristics, primary applications, background, and latest research on the tunnelling magnetoresistance effects of magnetic tunnel junctions (MTJs) are reviewed. Different types of junctions with  $Al_2O_3$  or MgO insulated barriers are compared, and the merits of the MgO barrier discussed. The problems and disadvantages of exchange-biased spin-valve MTJs as well as the advantages of the promising pseudo-spin-valve junctions are illustrated. Finally, a summary of the materials used for the ferromagnetic layer and insulated barrier is given, and the outlook for further research and development of tunnelling magnetoresistance materials is discussed.

**Keywords** condensed matter physics, tunnelling magnetoresistance, review, magnetic tunnel junctions, exchange-biased spin-valve, pseudo-spin-valve

## 1 引言

磁电阻(MR)效应是指在外磁场的作用下,材料的电阻率发生变化的一种物理现象.磁电阻值与饱和磁场强度的比值称为磁场灵敏度.磁电阻效应及其材料一直是凝聚态物理和材料科学领域的研究热点之一.

早在1975年,Julliere<sup>[1]</sup>就在Co/Ge/Fe基磁性隧道结(MTJs)中观察到了隧穿磁电阻(TMR)效应.但是,这一发现当时并没有引起人们的重视.在这之后的十几年内,TMR效应的研究进展十分缓慢.1988年,巴西学者Baibich<sup>[2]</sup>在法国巴黎大学物理

系Fert教授领导的科研组中工作时,首先在Fe/Cr多层膜中发现了巨磁电阻(GMR)效应.TMR效应和GMR效应的发现导致了凝聚态物理学中新的学科分支——磁电子学的产生.20年来,GMR效应的研究发展非常迅速,并且基础研究和应用研究几乎齐头并进,已成为基础研究快速转化为商业应用的国际典范.随着GMR效应研究的深入,TMR效应开始引起人们的重视.

金属多层膜尽管可以产生很高的GMR值,但强

\* 兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室开放基金资助项目  
2008-10-18收到初稿,2009-01-05收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人,Email:weifl@lzu.edu.cn

的反铁磁耦合效应导致饱和场很高,磁场灵敏度很小,从而限制了 GMR 效应的实际应用. MTJs 中两铁磁层间不存在或基本不存在层间耦合,只需要一个很小的外磁场即可将其中一个铁磁层的磁化方向反向,从而实现隧穿电阻的巨大变化,故 MTJs 较金属多层膜具有高得多的磁场灵敏度.同时,MTJs 这种结构本身电阻率很高、能耗小、性能稳定,因此,MTJs 无论是作为读出磁头、各类传感器,还是作为磁随机存储器(MRAM),都具有无与伦比的优点,其应用前景十分看好,引起世界各研究小组的高度重视.

## 2 TMR 效应的产生机理和特点

在铁磁材料中,由于量子力学交换作用,铁磁金属的 3d 轨道局域电子能带发生劈裂,使费米(Fermi)面附近自旋向上和向下的电子具有不同的态密度.

在 MTJs 中,TMR 效应的产生机理是自旋相关的隧穿效应.MTJs 的一般结构为铁磁层/非磁绝缘层/铁磁层(FM/L/FM)的三明治结构.饱和磁化时,两铁磁层的磁化方向互相平行,而通常两铁磁层的矫顽力不同,因此反向磁化时,矫顽力小的铁磁层磁化矢量首先翻转,使得两铁磁层的磁化方向变成反平行.电子从一个磁性层隧穿到另一个磁性层的隧穿几率与两磁性层的磁化方向有关<sup>[3]</sup>.如图 1 所示,若两层磁化方向互相平行,则在一个磁性层中,多数自旋子带的电子将进入另一磁性层中多数自旋子带的空态,少数自旋子带的电子也将进入另一磁性层中少数自旋子带的空态,总的隧穿电流较大;若两磁性层的磁化方向反平行,情况则刚好相反,即在一个磁性层中,多数自旋子带的电子将进入另一磁性层中少数自旋子带的空态,而少数自旋子带的电子也将进入另一磁性层中多数自旋子带的空态,这种状态的隧穿电流比较小.因此,隧穿电导随着两铁磁层磁化方向的改变而变化,磁化矢量平行时的电导高

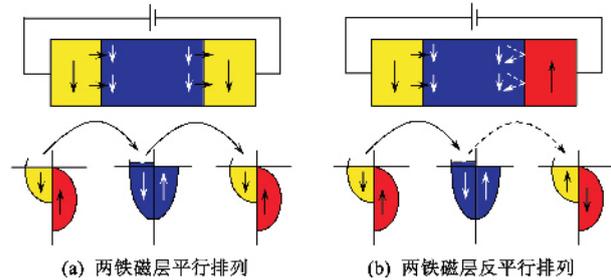


图 1 TMR 效应的产生机理示意图

于反平行时的电导.通过施加外磁场可以改变两铁磁层的磁化方向,从而使得隧穿电阻发生变化,导致 TMR 效应的出现.

MTJs 中两铁磁层电极的自旋极化率定义为

$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}}, \quad (1)$$

式中  $N_{\uparrow}$  和  $N_{\downarrow}$  分别为铁磁金属费米面处自旋向上和自旋向下电子的态密度.

由 Julliere<sup>[1]</sup>模型可以得到

$$\text{TMR 值} = \frac{\Delta R}{R_A} = \frac{R_A - R_P}{R_A} = \frac{2P_1P_2}{1 + P_1P_2}, \quad (2)$$

或者

$$\text{TMR 值} = \frac{\Delta R}{R_P} = \frac{R_A - R_P}{R_P} = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2}, \quad (3)$$

式中  $R_P$ 、 $R_A$  分别为两铁磁层磁化方向平行和反平行时的隧穿电阻, $P_1$ 、 $P_2$  分别为两铁磁层电极的自旋极化率.显然,如果  $P_1$  和  $P_2$  均不为零,则 MTJs 中存在 TMR 效应,且两铁磁层电极的自旋极化率越大,TMR 值也越高.

在文献报道中,不同的学者对 TMR 值的定义不同,有的学者采用(2)式的定义,但最近几年,大部分学者都采用(3)式的定义.

## 3 TMR 效应的应用

TMR 效应由于具有磁电阻效应大、磁场灵敏度高、独特优势,从而展示出十分诱人的应用前景.概括来说,TMR 材料主要用于计算机硬盘的读出磁头、MRAM 和各类磁传感器.

目前,高密度、大容量和小型化已成为计算机存储的必然趋势.上世纪 90 年代初,磁电阻型读出磁头在硬磁盘驱动器中的应用,大大促进了硬磁盘驱动器性能的提高,使其面记录密度达到了  $\text{Gb}/\text{in}^2$  的量级.十几年来,磁电阻磁头已从当初的各向异性磁电阻磁头发展到 GMR 磁头和 TMR 磁头.TMR 磁头材料的主要优点是磁电阻比和磁场灵敏度均高于 GMR 磁头,而且其几何结构属于电流垂直于膜面(CPP)型,适合于超薄的缝隙间隔.

基于 TMR 效应制作的 MRAM 具有集成度高、非易失性、读写速度快、可重复读写次数大、抗辐射能力强、功耗低和寿命长等优点,它既可以做计算机的内存储器,也可以做外存储器.作为内存储器,与市场上通用的半导体内存储器相比,它的优点是易失性、存取速度快、抗辐射能力强,作为外存储器,

它比 Flash 存储器存取速度快 1000 倍,而且功耗小,寿命长.与硬磁盘相比,它的优势是无运动部件,使用起来与 Flash 存储器一样方便.

TMR 材料还可以做成各种高灵敏度磁传感器,用于检测微弱磁场和对微弱磁场信号进行传感.由于此类传感器体积小,可靠性高,响应范围宽,在自动化技术、家用电器、商标识别、卫星定位、导航系统以及精密测量技术方面具有广阔的应用前景.

#### 4 TMR 材料的研究背景

由表 1 可以看出<sup>[14, 5-29]</sup>,由于受制备条件的限制,从发现一直到 1995 年,MTJs 的 TMR 效应研究

进展缓慢,获得的 TMR 值也很低.1995 年,Miyazaki 等<sup>[12, 13]</sup>发现 Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe 基 MTJs 在室温下的 TMR 值高达 18%,低温下为 30%,磁场灵敏度为 8%/Oe,从此揭开了 TMR 效应研究史上新的一页.在此之后的几年内,世界各个研究小组开始集中研究用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 做绝缘势垒层的隧道结.

1995—2000 年期间,MTJs 的 TMR 效应研究进展相对较快,但没有大的突破.1996 年 9 月,Xiao Gang 等<sup>[17]</sup>发现 La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>/La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> 基 MTJs 在 4.2K 时的 TMR 值高达 83%.同年 10 月,Platt 等<sup>[18]</sup>在 Fe/HfO<sub>2</sub>/Co 基 MTJs 中也发现了 R 效应,温度为 30K 时的 TMR 值为 31%.1997 年 9 月,Sato 等<sup>[21]</sup>首次处理对 TMR 效研究

表 1 MTJs 的 TMR 效应研究背景

年·月	隧道结	TMR 值/%		作者	参考文献
		低温	室温		
1975	Fe/Ge/Co	14 (4.2K)		Julliere	[1]
1982	Ni/NiO/Ni Ni/NiO/Co Ni/NiO/Fe	0.5 (1.5K) 2.5 (4.2K) 1.0 (2.5K)		Maekawa 等	[4]
1987	Ni/NiO/Co		0.96	Suezawa 等	[5]
1990	Fe - C/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe - Ru		1.0	Nakatani 等	[6]
1991	82Ni - Fe/Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co	3.5 (77K)	2.7	Miyazaki 等	[7]
1992	Gd/GdO <sub>x</sub> /Fe Fe/GdO <sub>x</sub> /Fe	5.6 (4.2K) 7.7 (4.2K)		Nowak 等	[8]
1993	82Ni - Fe/Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co	5.0 (4.2K) 3.5 (77K)	2.7	Yaoi 等	[9]
1994	81NiFe/MgO/Co		0.2	Plaskett 等	[10]
1995	50 FeCo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co	7.2 (4.2K) 8.5 (4.2K)	3.5 3.3	Tezuka 等	[11]
1995	Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe	30 (4.2K)	18	Miyazaki 等	[12, 13]
1995	CoFe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co	24 (4.2K) 20 (77K)	11.8	Moodera 等	[14]
1996.4	CoFe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co	25.6 (4.2K)	18	Moodera 等	[15]
1996.7	Co/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CoFe	32 (77K)	18	Moodera 等	[16]
1996.9	La <sub>0.67</sub> Sr <sub>0.33</sub> MnO <sub>3</sub> /SrTiO <sub>3</sub> /La <sub>0.67</sub> Sr <sub>0.33</sub> MnO <sub>3</sub>	83 (4.2K)		Lu 等	[17]
1996.10	Fe/HfO <sub>2</sub> /Co	31 (30K)		Platt 等	[18]
1997.4	81Ni - Fe/Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co		22	Gallagher 等	[19]
1997.4	Fe/MgO/Co	20 (77K)		Platt 等	[20]
1997.9	Co/Al - AlO <sub>x</sub> /Co		24*	Sato 等	[21]
1998.6	Co/Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CoFe		24	Sun 等	[22]
1998.10	CoFe/Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CoFe		22.7 36.7*	Sousa 等	[23]
1999.1	CoFe/Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CoFe		27.3	Sun 等	[24]
1999.9	Co <sub>82</sub> Fe <sub>18</sub> /Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co <sub>82</sub> Fe <sub>18</sub>		29 40*	Cardoso 等	[25]
2000.1	Co <sub>82</sub> Fe <sub>18</sub> /Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co <sub>82</sub> Fe <sub>18</sub>		41*	Cardoso 等	[26]
2000.5	Co <sub>74</sub> Fe <sub>26</sub> /Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co <sub>74</sub> Fe <sub>26</sub>		42*	Kikuchi 等	[27]
2000.5	Co <sub>75</sub> Fe <sub>25</sub> /Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Co <sub>75</sub> Fe <sub>25</sub>	69.1 (4.2K)*	49.7*	Han Xiu-feng 等	[28]
2000.11	(211)Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>50</sub> Co <sub>50</sub> (110)Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>50</sub> Co <sub>50</sub> (100)Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>50</sub> Co <sub>50</sub>	42 (2K) 32 (2K) 13 (2K)	26	Yuasa 等	[29]

\* 表示经热处理后的 TMR 值

了热应的影响,发现用适当的温度进行退火处理有利于增大 TMR 值,并在经过 300℃ 热处理后的 Co/AlO<sub>x</sub>/Co 基 MTJs 中获得高达 24% 的室温 TMR 值. 2000 年 1 月,Cardoso 等<sup>[26]</sup>报道,经 300℃ 热处理后的 CoFe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoFe 基 MTJs 的室温 TMR 值达 41%. 同年 5 月,Han Xiu-Feng(韩秀峰)等<sup>[28]</sup>将经过 300℃ 热处理后的 CoFe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoFe 基 MTJs 的室温 TMR 值提高到 49.7%,4.2K 时达到 69.1%. 同年 11 月,Yuasa 等<sup>[29]</sup>在单晶 MgO 基片上生长出 Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>基 MTJs,发现铁电极层也是单晶膜,并且 TMR 具有各向异性.

## 5 TMR 材料最近几年的研究进展

2001 年,Butler 和 Mathon 等<sup>[30,31]</sup>通过第一性原理计算从理论上预言,外延生长的单晶 Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)基 MTJs 的 TMR 值可能超过 1000%. 这是 TMR 材料研究进程中的一大理论突破,大大鼓舞了世界各个研究小组对 TMR 效应的进一步研究.

用 MgO 做绝缘势垒层开辟了研究 MTJs 的新局面. 2003 年 6 月,Faure-Vincent 等<sup>[32]</sup>用分子束外延方法制备的 Fe/MgO/Fe 基 MTJs 的室温 TMR 值高达 67%,80K 时高达 100%. 2004 年 4 月,Yuasa 等<sup>[33]</sup>用分子束外延方法制备的单晶 Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)基 MTJs 的 TMR 值在室温下达到 88%,20K 时达到 146%. 同年 10 月,这一研究小组<sup>[34]</sup>又将单晶 Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)基 MTJs 的室温 TMR 值提高到了 180%. 同年同月,Parkin 等<sup>[35]</sup>用溅射法制备的多晶 CoFe/MgO/CoFe 和 CoFe/MgO/CoFeB 基 MTJs 的 TMR 值在室温下分别达到 168% 和 220%.

与外延生长法相比,磁控溅射法制备样品简便易行,成本低. 因此,用磁控溅射法制备室温下具有高 TMR 值的 MTJs 有巨大的实际应用价值,并有望早日实现工业化批量生产.

2004 年 11 月,Zhang 和 Butler<sup>[36]</sup>又通过第一性原理计算从理论上预言,bcc Co(100)/MgO(100)/bcc Co(100)基及 FeCo(100)/MgO(100)/FeCo(100)基 MTJs 的 TMR 值将比 Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)基 MTJs 大数倍. 这是对 TMR 效应研究的又一次推进.

2005 年 2 月,Diayaprawira 等<sup>[37]</sup>用磁控溅射法制备出 CoFeB/MgO/CoFeB 基 MTJs,经 360℃ 热处

理后,其 TMR 值室温下高达 230%,20K 时高达到 294%,结面电阻(RA)值分别为 420Ωμm<sup>2</sup> 和 440Ωμm<sup>2</sup>,这使同时获得高 TMR 值和低 RA 值的 MTJs 的研究向前跨跃了一大步.

在用 MgO 做绝缘势垒层的 MTJs 的研究取得突破的同时,用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 做绝缘势垒层的 MTJs 的研究也取得了一定的进展. 2004 年 7 月,Wang 等<sup>[38]</sup>用溅射法制备的 CoFeB/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoFeB 基 MTJs,经 250℃ 热处理后的室温 TMR 值达到了 70%. 2007 年 4 月,中国科学院物理研究所的韩秀峰等<sup>[39]</sup>用溅射法制备的 CoFeB/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoFeB 基环形 MTJs 的室温 TMR 值达 81%,4.2K 时达 107%. 这是目前用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 做绝缘势垒层的 MTJs 中所能获得的最大 TMR 值.

## 6 TMR 材料的研究现状

2005 年,Coe<sup>[40]</sup>综合国际上的研究结果,对比了用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 做绝缘势垒层的 MTJs 的研究进展情况. 图 2 为各种绝缘势垒层的 MTJs 的研究进展情况,可以明显看出,用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 做绝缘势垒层的 MTJs 的 TMR 值远小于用 MgO 做绝缘势垒层的 MTJs 的 TMR 值,不能满足实际应用的要求.

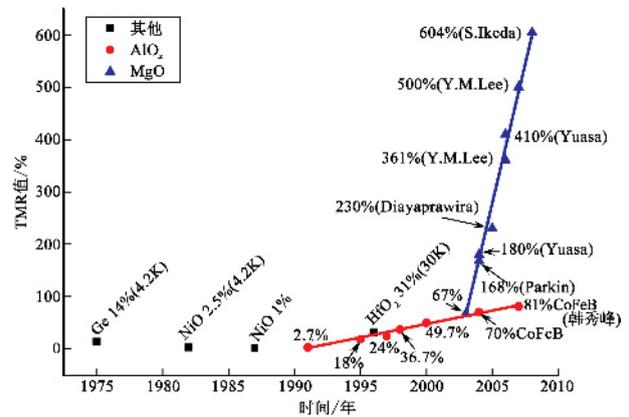


图 2 各种绝缘势垒层的 MTJs 的研究进展

由于 MgO 单晶绝缘势垒层对自旋极化电子有“过滤器”的作用,因此用 MgO 做绝缘势垒层的 MTJs 的 TMR 值明显高于用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 做绝缘势垒层的 MTJs. 此外,用 MgO 做绝缘势垒层的 MTJs 的热稳定性也比用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 做绝缘势垒层的 MTJs 高. 因此,目前大部分研究人员都将目光转向了用 MgO 做绝缘势垒层的 MTJs.

2006 年 7 月,Yuasa 等<sup>[41]</sup>用分子束外延方法制备出单晶 Co(001)/MgO(001)/Co(001) MTJs,其

TMR 值在室温下达到 410%。这是目前通过外延方法制备 MTJs 所能获得的最高室温 TMR 值,但与 Butler 等<sup>[30,31]</sup>的预言值仍相差很大。同年同月, Lee 等<sup>[42,43]</sup>用溅射法制备的 CoFeB/MgO/CoFeB 基 MTJs 的室温 TMR 值达到了 361%。

在此之前,世界各个小组研究的都是传统的 EB-SV 型 MTJs。这种 MTJs 具有铁磁层/非磁绝缘层/铁磁层/反铁磁层结构。最近的研究发现,EB-SV 型 MTJs 存在明显的缺点和不足。在 EB-SV 型 MTJs 中,由于反铁磁钉扎层中的 Mn 原子在高温退火时向相邻的铁磁电极层和绝缘势垒层扩散<sup>[44,45]</sup>,从而导致 TMR 值下降。

对此,为了在实验中进一步提高退火温度,得到更高的 TMR 值,研究人员提出并研究了非钉扎的 PSV 型 MTJs。

与 EB-SV 型 MTJs 相比,PSV 型 MTJs 结构上最明显的特征是没有反铁磁层,即为铁磁层/非磁绝缘层/铁磁层三明治结构。PSV 型 MTJs 中两铁磁层的矫顽力不同,通过外磁场来实现两铁磁层磁矩的平行与反平行排列,从而导致 TMR 效应的产生。PSV 型 MTJs 中硬磁层和软磁层一般采用相同的材料,但是厚度不同,矫顽力的差别正是通过厚度的变化来实现的。一般情况下,相对较厚的铁磁层矫顽力大一些,为硬磁层。

最近的实验研究结果也证实,在 PSV 型 MTJs 中,进一步提高退火温度后,由于消除了 Mn 原子的扩散,并且 MgO 绝缘势垒层能够形成更好的(100)取向的单晶,同时非晶 CoFeB 铁磁电极层也能够进一步晶化,从而得到了高的 TMR 值。

2007 年 5 月, Lee 等<sup>[46]</sup>用溅射法制备的 CoFeB/MgO/CoFeB 基 PSV 型 MTJs 的室温 TMR 值达到 500%,温度为 5K 时达到 1010%,其 RA 值为 280—700Ωμm<sup>2</sup>。2008 年 8 月,同一研究组的 Ikeda 等<sup>[47]</sup>又将溅射法制备的 CoFeB/MgO/CoFeB 基 PSV 型 MTJs 的室温 TMR 值提高到 604%,温度为 5K 时的 TMR 值提高到 1144%。这是目前所有类型 MTJs 中所能获得的最大 TMR 值,并且达到了 Butler 和 Mathon 等<sup>[30,31]</sup>的理论预言值。

除 TMR 值明显大于 EB-SV 型外,PSV 型 MTJs 的热稳定性也优于 EB-SV 型 MTJs,制备过程也较简便易行。这些优点均说明,PSV 型 MTJs 具有更好的应用前景,从而引起了研究人员的重视。

PSV 型 MTJs 的缺点是,其硬磁层的稳定性低于 EB-SV 型 MTJs 中被钉扎铁磁层的稳定性,从而大大

限制了 PSV 型 MTJs 的应用范围。

## 7 小结与展望

获得 TMR 值高且其他性能优良的 MTJs 有两个关键:一是寻找自旋极化率高的铁磁层材料;二是寻找优质的绝缘势垒层材料。

从 MTJs 的研究进程可以看出,铁磁层材料已经从最初的铁磁金属 Fe、Co、Ni 及其合金 NiFe、FeCo 发展到其他掺杂合金 FeTaN<sup>[48]</sup>、CoFeB<sup>[37-39,42-47]</sup>、CoFeZr<sup>[49]</sup>、CoFeSiB<sup>[50]</sup> 和高自旋极化率的半金属材料 LaSrMnO<sub>3</sub><sup>[17,51-53]</sup>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub><sup>[51,54,55]</sup>、Co-Mn-Al<sup>[56]</sup>、Co<sub>2</sub>FeSi<sup>[57]</sup>、Co<sub>2</sub>MnSi<sup>[57]</sup>、Co<sub>2</sub>MnGe<sup>[58]</sup>、Co<sub>2</sub>FeAlSi<sup>[59]</sup>、CoCrFeAl<sup>[60]</sup> 等,其结构也从外延单晶拓展到多晶和非晶态。值得一提的是,目前世界各个研究小组对半金属材料中的 Heusler 合金研究也相对较多,并且获得了较高的 TMR 值。2007 年, Tezuka 等<sup>[59]</sup>制备的 CoFeAlSi/AIO/CoFe 基 MTJs 的室温 TMR 值达到 76%,温度为 4.2K 时达到 106%。同年, Marukame 等<sup>[60]</sup>制备的 CoCrFeAl/MgO/CoFe 基 MTJs 室温 TMR 值达到 109%,温度为 4.2K 时达到 317%。这一数值与 Lee 等<sup>[46,47]</sup>获得的 TMR 值相比仍相差很大。综合目前的实验结果可知,最佳的铁磁层材料是 CoFeB 合金。

由于 MTJs 中的绝缘势垒层材料直接影响电子的隧穿行为,要改善 MTJs 的性能就必须制备性能优良的绝缘势垒层材料,因此,有关绝缘势垒层材料的研究越来越引起人们的关注和重视。到目前为止,人们研究的绝缘势垒层材料包括氧化物、氮化物和半导体三类:氧化物除了常见的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 外,还有 NiO<sup>[20]</sup>、CoO<sup>[20]</sup>、HfO<sub>2</sub><sup>[18,20]</sup>、TaO<sub>x</sub><sup>[20,61]</sup>、ZrO<sub>x</sub><sup>[62]</sup>、ZrAlO<sub>x</sub><sup>[63]</sup>、HfAlO<sub>x</sub><sup>[64]</sup>、TiAlO<sub>x</sub><sup>[49]</sup>、YO<sup>[65]</sup>、SrTiO<sub>3</sub><sup>[17,51-53]</sup>、CaTiO<sub>3</sub><sup>[53]</sup> 等;氮化物有 AlN<sup>[48,66]</sup>;半导体有 EuS<sup>[67]</sup>、AlGaAs<sup>[68]</sup>、ZnS<sup>[69]</sup>、AlAs<sup>[70]</sup>、ZnSe<sup>[71,72]</sup>。用半导体做绝缘势垒层,可以有效地降低 MTJs 的 RA 值,并使绝缘势垒层厚度不致于太薄而造成针孔等缺陷,从而有利于实现磁电阻器件的数据高速传输和噪音降低。此外,有的研究人员还在 MTJs 的电极层和绝缘势垒层之间加入一层添加层,如 FeZr 合金<sup>[73]</sup>、单晶 Ca(001)<sup>[74]</sup>、有机物 Alq<sub>3</sub><sup>[75]</sup> 等来改善 MTJs 的性能。就目前的实验结果来看,最佳的绝缘势垒层材料是 MgO。

虽然 PSV 型 MTJs 的 TMR 值很高,热稳定性也

很好,但是其 RA 值较高,仍然不能满足实际应用的要求.就用于计算机读磁头来说,要想使 MTJs 型的 TMR 读磁头在读取速率和噪声两方面均优于当前的自旋阀型 GMR 读磁头,MTJs 的 RA 值则应低于  $4\Omega\mu\text{m}^2$ <sup>[76,77]</sup>目前所能获得的最佳 PSV 型 MTJs 的 RA 值比这一数值仍然高出 2 个数量级.

据文献报道<sup>[77,78]</sup>通过采用电阻率低的金属材料做衬底层和在铁磁层与 MgO 绝缘势垒层之间插入非常薄的 Mg 层这两种方法,均可以有效地降低 EB-SV 型 MTJs 的 RA 值,并且已经达到了实际应用的要求.借鉴相似的方法,很可能、也很有希望将 PSV 型 MTJs 的 RA 值降低到数  $\Omega\mu\text{m}^2$ .

由于 TMR 材料同时具备工作磁场低、灵敏度高、热稳定性好等特性,因此,与 GMR 效应相比,TMR 效应具有更为广阔的应用前景.研究与开发室温 TMR 值高、热稳定性好、RA 值低、成本低的 TMR 材料将是今后磁电阻材料领域工作的重点和关键,其中低 RA 值的 PSV 型 MTJs 材料的研究和开发有望成为实现这一目标的突破口.

### 参考文献

- [ 1 ] Julliere M, Phys. Lett., 1975, 54A :225
- [ 2 ] Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, 61 :2472
- [ 3 ] Prinz G A. Science, 1998, 282 :1660
- [ 4 ] Maekawa S, Gafvert U. IEEE Trans. Magn., 1982, 18 :707
- [ 5 ] Suezawa Y, Gondo Y. Proceedings of the International Symposium on Physics of Magnetic Materials( Sendai ). Singapore :World Scientific, 1987. 303 ;Suezawa Y, Gondo Y. J. Magn. Magn. Mater., 1993, 126 :524
- [ 6 ] Nakatani R, Kitada M. Abstracts of the Japan Institute of Metals, 1990, 394 ;Nakatani R, Kitada M. J. Mater. Sci. Lett., 1991, 10 :827
- [ 7 ] Miyazaki T, Yaoi T, Ishio S. J. Magn. Magn. Mater., 1991, 98 :L7
- [ 8 ] Nowak J, Rauluszkiewicz J. J. Magn. Magn. Mater., 1992, 109 :79
- [ 9 ] Yaoi T, Ishio S, Miyazaki T. J. Magn. Magn. Mater., 1993, 126 :430
- [ 10 ] Plaskett T S, Freitas P P, Barradas N P *et al.* J. Appl. Phys., 1994, 76 :6104
- [ 11 ] Tezuka N, Ando Y, Miyazaki T. J. Magn. Soc. Jpn., 1995, 19 :369
- [ 12 ] Miyazaki T, Yezuka N. J. Magn. Magn. Mater., 1995, 139 :L231
- [ 13 ] Miyazaki T, Yezuka N. J. Magn. Magn. Mater., 1995, 151 :403
- [ 14 ] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 74 :3273
- [ 15 ] Moodera J S, Kinder L R. J. Appl. Phys., 1996, 79 :4724
- [ 16 ] Moodera J S, Kinder L R, Nowak J *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69 :708
- [ 17 ] Lu Y, Li X W, Gong G Q *et al.* Phys. Rev. B, 1996, 54 :R8357
- [ 18 ] Platt C L, Diény B, Berkowitz A E. Appl. Phys. Lett., 1996, 69 :2291
- [ 19 ] Gallager W J, Parkin S S P, Lu Y *et al.* J. Appl. Phys., 1997, 81 :3741
- [ 20 ] Platt C L, Diény B, Berkowitz A E., J. Appl. Phys., 1997, 81( 8 ):5523
- [ 21 ] Sato M, Kobayashi K. IEEE Trans. Magn., 1997, 33 :3553
- [ 22 ] Sun J J, Sousa R C, Galvao T T P *et al.* J. Appl. Phys., 1998, 83 :6694
- [ 23 ] Sousa R C, Sun J J, Soares V *et al.* Appl. Phys. Lett., 1998, 73 :3288
- [ 24 ] Sun J J, Soares V, Freitas P P. Appl. Phys. Lett., 1999, 74 :448
- [ 25 ] Cardoso S, Gehanno V, Ferreira R *et al.* IEEE Trans. Magn., 1999, 35 :2952
- [ 26 ] Cardoso S, Freitas P P, de Jesus C *et al.* Appl. Phys. Lett., 2000, 76 :610
- [ 27 ] Kikuchi H, Sato M, Kobayashi K. J. Appl. Phys., 2000, 87 ( 9 ):6055
- [ 28 ] Han X F, Daibou T, Kamijo M *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39 :L439
- [ 29 ] Yuasa S, Sato T, Tamura E *et al.* Europhys. Lett., 2000, 52 ( 3 ):344
- [ 30 ] Mathon J, Umerski A. Phys. Rev. B, 2001, 63 :220403( R )
- [ 31 ] Butler W H, Zhang X G, Schulthess T C. Phys. Rev. B, 2001, 63 :054416
- [ 32 ] Faure-Vincent J, Tiusan C, Jouguelet E *et al.* Appl. Phys. Lett., 2003, 82 :4507
- [ 33 ] Yuasa S, Fukushima A, Nagahama T *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 2004, 43 :L588
- [ 34 ] Yuasa S, Nagahama T, Fukushima A *et al.* Nature Materials, 2004, 3 :868
- [ 35 ] Parkin S S P, Kaiser C, Panchula A *et al.* Nature Materials, 2004, 3 :862
- [ 36 ] Zhang X G, Butler W H. Phys. Rev. B, 2004, 70 :172407
- [ 37 ] Djayaprawira D D, Tsunekawa K, Nagai M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 86 :092502
- [ 38 ] Wang D X, Nordman C, Daughton J M *et al.* IEEE Trans. Magn., 2004, 40( 4 ):2269
- [ 39 ] Wei H X, Qin Q H, Ma M, Sharif R, Han X F. J. Appl. Phys., 2007, 101 :09B501
- [ 40 ] Coey M. Nature Materials, 2005, 4 :9
- [ 41 ] Yuasa S, Fukushima A, Kubota H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89 :042505
- [ 42 ] Ikeda S, Hayakawa J, Lee Y M *et al.* J. Appl. Phys., 2006, 99 :08A907
- [ 43 ] Lee Y M, Hayakawa J, Ikeda S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89 :042506
- [ 44 ] Hayakawa J, Ikeda S, Lee Y M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89 :232510
- [ 45 ] Wang Y, Zeng Z M, Han X F *et al.* Phys. Rev. B, 2007, 75 :214424
- [ 46 ] Lee Y M, Hayakawa J, Ikeda S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90 :212507
- [ 47 ] Ikeda S, Hayakawa J, Ashizawa Y *et al.* Appl. Phys. Lett.,

2008 , 93 :082508

[ 48 ] Wang J G , Cardoso S , Freitas P P *et al.* J. Appl. Phys. , 2001 , 89 :6868

[ 49 ] Song J O , Lee S R. J. Magn. Magn. Mater. , 2007 , 310 :1923

[ 50 ] Rhee J R , Hwang J Y , Kim S S *et al.* IEEE Trans. Magn. , 2005 , 41 :2685

[ 51 ] Ghosh K , Ogale S B , Pai S P *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1998 , 73 :689

[ 52 ] De Teresa J M , Barthélémy A , Fert A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1999 , 82 :4288

[ 53 ] O'Donnell J , Andrus A E , Oh S *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2000 , 76 :1914

[ 54 ] Park C , Shi Y M , Peng Y G *et al.* IEEE Trans. Magn. , 2003 , 39 :2806

[ 55 ] Yoon K S , Koo J H , Do Y H *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2005 , 285 :125

[ 56 ] Kubota H , Nakata J , Oogane M *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 2004 , 43 :L984

[ 57 ] Daibou T , Shinano M , Hattori M *et al.* IEEE Trans. Magn. , 2006 , 42 :2655

[ 58 ] Marukame T , Ishikawa T , Matsuda Ken-ichi *et al.* J. Appl. Phys. , 2006 , 99 :08A904

[ 59 ] Tezuka N , Ikeda N , Miyazaki A *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2007 , 310 :1940

[ 60 ] Marukame T , Ishikawa T , Hakamata S *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2007 , 90 :012508

[ 61 ] Rottlander P , Hehn M , Lenoble O *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001 , 78 :3274

[ 62 ] Wang J G , Freitas P P , Snoeck E *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001 , 79 :4387

[ 63 ] Wang J G , Freitas P P , Snoeck E. Appl. Phys. Lett. , 2001 , 79 :4553

[ 64 ] Wang J G , Freitas P P , Snoeck E *et al.* IEEE Trans. Magn. , 2002 , 38 :2703

[ 65 ] Dimopoulos T , Gieres G , Colis S *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 , 83 :3338

[ 66 ] Yoshimura S , Nozawa T , Shoyama T. J. Appl. Phys. , 2005 , 97 :10C920

[ 67 ] Moodera J S , Hao X , Gibson G A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1988 , 61 :637

[ 68 ] Chiba D , Akiba N , Matsukura F *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2000 , 77 :1873

[ 69 ] Guth M , Dinia A , Schmerber G *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001 , 78 :3487

[ 70 ] Pin L , Kyungsun M. Phys. Rev. B , 2001 , 64 :035201

[ 71 ] Gustavsson F , George J M , Etgens V H *et al.* Phys. Rev. B , 2001 , 64 :184422

[ 72 ] Jiang X , Panchula A F , Parkin S S P. Appl. Phys. Lett. , 2003 , 83 :5244

[ 73 ] Kyung-In J , Lee J H , Shin K H *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2005 , 286 :158

[ 74 ] Nagahama T , Yuasa S , Tamura E *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2005 , 95 :086602

[ 75 ] Santos T S , Lee J S , Migdal P *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007 , 98 :016601

[ 76 ] Nagasaka K , Seyama Y , Kondo R *et al.* Fujitsu Sci. Tech. J. , 2001 , 37 :192

[ 77 ] Tsunekawa K , Djayaprawira D D , Nagai M *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 :072503

[ 78 ] Ikeda S J , Hayakawa J , Lee Y M *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 2005 , 44 :L1442



· 物理新闻和动态 ·

## 浮冰架破裂物理的突破

在格陵兰和南极洲冰域漂浮的浮冰架会流向其周围的海洋,这些浮冰架最终会破裂成冰山,这个过程在科学上称之为“裂冰”(calving)。裂冰是一种需要慎重对待的自然过程。到目前为止,人们还没有建立起有关解释裂冰过程的物理图像。但随着全球气候的变暖,浮冰架的裂冰行为已成为科学界非常关注的课题,因为据联合国环境保护委员会报告,如果浮冰架都在南极洲发生融化,则海平面将上升60m以上。

最近,美国 Pennsylvania 大学的 R. Alley 博士和来自美国其他5个研究所的同事们共同开展了关于裂冰行为的物理研究。这项研究属于“断裂力学”的范围。R. Alley 博士指出,断裂力学是一个较困难的课题,它包括地震预测以及裂冰等问题。现在我们从一个简单的实例来探讨应如何开展研究。若放在桌子上的一个茶杯不慎落在地面,这时这个茶杯是会破裂呢?还是会安全地只是在地面上反弹一下?这个答案显然依赖于茶杯落到地面的高度,如果它是从1mm的高度落下,则茶杯将不会破裂,但若是从100m的高度落下,则茶杯必碎无疑。从这点可以看出,茶杯落下的高度是茶杯破裂的主要参数。因此研究裂冰过程也需要寻找与其对应的主要参数。为此,研究组作了一个简单的假定,即浮冰架冰面裂纹的扩展速度是产生裂冰的重要参数,特别是破裂的方向和趋势更为重要。这一点类似于茶杯落下的高度。根据以往裂冰数据的分析可归纳出:浮冰架的宽度与厚度都与裂冰有着重要的关联。如果处于两个山脊间的冰架比较窄,则山脊的边界将阻挠冰块,使冰架的运动变得缓慢而不易破裂,相反,较厚和较宽的冰架则破裂得快一些。而裂纹的扩展速度可以通过浮冰架的宽度与厚度的数据进行计算,这样就能简单地预测出浮冰架的裂冰。由于规则极其简单,因此在使用时还需要一个牵制点(pinning point),即海岛对浮冰架的稳定作用,如果没有这个稳定作用,那浮冰架就会成为不稳定的冰架并迅速地发生裂冰。总之,有关浮冰架的裂冰还有相当多的工作需要科学家们去关注和研究。

(云中客 摘自 Science , 28 November 2008 )