

# 磁性隧道结 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ 的制备和物性\*

陈 M 杜军 吴小山 潘明虎 龙建国 张维 鹿牧

(南京大学物理系 固体微结构物理国家重点实验室 南京 210093)

翟宏如

(南京大学现代分析中心 南京 210093)

胡安

(南京大学物理系 固体微结构物理国家重点实验室 南京 210093)

**摘要** 用等离子体氧化形成绝缘层的方法,重复性地制备出了  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  磁性隧道结.样品的隧道磁电阻(TMR)比值在室温下最高可达 6.0%,翻转场(switch field)可低于 800 A/m,平台宽度约 2400 A/m.结电阻的变化范围从几百欧姆到几百千欧.

**关键词** 磁性隧道结,隧道磁电阻

## PREPARATION AND PROPERTIES OF $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ MAGNETIC TUNNEL JUNCTIONS

CHEN Jing DU Jun WU Xiao-Shan PAN Ming-Hu LONG Jian-Guo ZHANG Wei Lu Mu

(Department of Physics, State Key Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093)

ZHAI Hong-Ru

(Center for Materials Analysis, Nanjing University, Nanjing 210093)

HU An

(Department of Physics, State Key Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract** With plasma oxidization to create an insulating layer of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , we have repeatedly fabricated  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$  magnetic tunnel junctions which show obvious tunneling magnetoresistance (TMR) effect. At room temperature, the maximum TMR ratio reaches 6.0%. The switch field can be less than 800 A/m with a relative step width of about 2400 A/m. The junction resistance changes from hundreds of ohms to hundreds of kilohms.

**Key words** magnetic tunnel junction, tunneling magnetoresistance

磁性隧道结(magnetic tunneling junction, MTJ)是一种“磁性金属/非磁绝缘体/磁性金属”(F/M/I/FM)结构.由于其中的隧道磁电阻(TMR)效应的丰富物理内涵及重要的应用,很快成为近年来的热点.

TMR效应是一种与自旋极化输运过程相关的现象.众所周知,磁性金属的3d以至4s电子能带会发生按自旋方向的交换劈裂,使正自旋子带和负自旋子带中电子数不等.费米面上正负自旋电子数不等将导致铁磁金属中的传导电子流的自旋极化.在磁性隧道结(MTJ)中,中间绝缘层的作用是提供一个势垒并隔开铁磁层,这样铁磁电极之间的导电就是一种隧穿效应.隧穿电流由两种自旋电子流组成.

对于MTJ中的上下两层铁磁电极,当它们的矫顽力不同(或一种铁磁层被钉扎)时,它们的磁化方向随着外场的变化可呈现出平行或反平行两种状态.由于多数自旋子带与少数自旋子带费米面态密度不同,故在上述两种情况下隧穿几率不一样,因此在磁场作用下就会产生结电阻的变化,这就是通常所说的隧道磁电阻(TMR)效应.在本文中我们定义  $\text{TMR} = (R_A - R_P) / R_P$ ,其中  $R_A$  是两个电极磁化方

\* 国家自然科学基金重大项目、高等学校博士点基金、95国家攀登计划项目资助项目

1999-06-18收到初稿,1999-08-31修回

向反平行时的电阻,  $R_p$  是磁化方向平行时的电阻.

Julliere<sup>[1]</sup>在不考虑隧穿过程中自旋翻转的条件下,导出了 TMR 与自旋极化度  $P$  的关系公式  $TMR = 2 P_1 P_2 / (1 - P_1 P_2)$ , 其中  $P_1$  和  $P_2$  分别对应于上、下两铁磁电极的自旋极化度. 但是 1995 年前的实验结果都与 Julliere 模型相差很大, 室温和低温 4.2 K 时最大值仅为 2.6% 和 7%. 自从 1995 年 Miyazaki<sup>[2]</sup> 和 Moodera<sup>[3]</sup> 等人独立地在 Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe 和 CoFe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co 样品中测得室温下 TMR 比值分别为 15.6% 和 11.8%, 4.2 K 下分别为 23% 和 24% 的结果之后, 利用低温沉积镀膜、预沉积 Si 缓冲层、加诱导磁场诱发单轴各向异性、退火改善界面等技术下, 已可以得到越来越多与 Julliere 模型相符合的结果.

国内外已有很多的研究组在制备与研究 MTJ, 但能很好地掌握其制备技术的并不多. 从 TMR 的机制来看, 制备 MTJ 的首要条件是获得一个厚度恰当、致密、无针孔的绝缘间隔层, 以获得良好的势垒; 其次为了得到高 TMR 比值, 要求层与层之间具有良好的界面; 此外两个铁磁电极要能够形成尽可能好的自发磁化方向反平行和平行状态. 任何一方面的不足, 都将影响 MTJ 的制备和性能.

TMR 同金属多层膜以及自旋阀 (spin valve) 的巨磁电阻 (giant magnetoresistance, GMR) 效应有相似的应用, 但它比自旋阀具有更高的磁电阻比值及相似的翻转磁场, 因而可以有更大的灵敏度, 且有内阻高、功耗低、输出电压高等特点. 自旋阀工艺较为成熟, 并已经在传感器和超高密度磁记录读出头方面获得初步应用, 而 MTJ 制备工艺较为复杂, 但易与半导体平面工艺兼容, 故极有希望在磁随机存储器 (MRAM) 等方面获得成功应用. MRAM 与通常所用的 RAM 相比, 将具有非易失性、抗辐射、抗干扰、低功耗、长使用寿命、低成本等特点<sup>[4]</sup>.

在超高真空多靶磁控溅射仪中制备 MTJ 样品. 采用外部换掩膜 (shadow mask) 的方法在玻璃衬底上依次沉积了 3 条 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 电极、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层及最上面的一条 Co 电极. Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 电极与 Co 电极呈十字交叉形, 宽度均为 0.2 mm, 厚度分别是 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 23 nm 及 Co 15 nm. 电极电阻大约为 50 Ω. 溅射前背景气压小于  $1.0 \times 10^{-5}$  Pa ( $7.5 \times 10^{-8}$  Torr), 溅射时氩气 (Ar) 压为 1.2 Pa ( $9 \times 10^{-3}$  Torr). 并采用等离子体氧化的方法将 Al 层氧化成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 绝缘层, 氧化时氧气 (O<sub>2</sub>) 压为 9–10 Pa.

我们分别制备了 3 批不同 Al 层厚度、不同氧化

时间的样品, 采用标准四探针法对磁电阻进行测量. 大体上 Al 层厚度一定时, 氧化时间越长, 结电阻越大. 然而, 尽管结电阻的变化可达 3 个量级 (从几百欧到几百千欧), 绝大多数样品都表现出较明显的磁电阻效应, 说明 TMR 效应对结电阻的变化并不敏感.

此外, 当 Al 厚度为 2.0 nm、氧化时间介于 30–90 s 之间时, TMR 比值普遍较大, 均达到了 5.0%, 即有一个适中的氧化时间. 关于这个问题, Moodera<sup>[5]</sup> 指出, 在 Al 层厚度一定的情况下, 若氧化不充分而存在剩余的 Al 覆盖于下电极铁磁金属 (FM) 之上时, 由于 Al 层所提供的是无自旋极化或被诱导产生的低自旋极化电子, 从而降低下电极的总自旋极化度, 进而减小了 TMR 比值. 若 Al 层氧化过头, 即氧原子进入下电极层而将其氧化, 这一方面可能引进了新的势垒, 另一方面也增加了自旋散射, 因而也会导致 TMR 比值下降.

其次, 在氧化程度比较合适的条件下, 若 Al 层太薄, 可能产生针孔直接导电或由“桔皮”效应 (orange peel) 产生的铁磁耦合, 从而降低 TMR 效应. 若 Al 层太厚, 势垒宽度较大, 根据理论计算, 势垒宽度增大会导致 TMR 比值的减小.

从图 1 中可以看出, 当电流较小时,  $I-V$  关系基本符合欧姆定律; 当电流再增大时,  $I-V$  曲线开始偏离线性. 根据理论进行拟合, 可以计算出相应的势垒宽度和高度分别为  $d = 1.6$  nm,  $\phi_0 = 2.2$  eV.

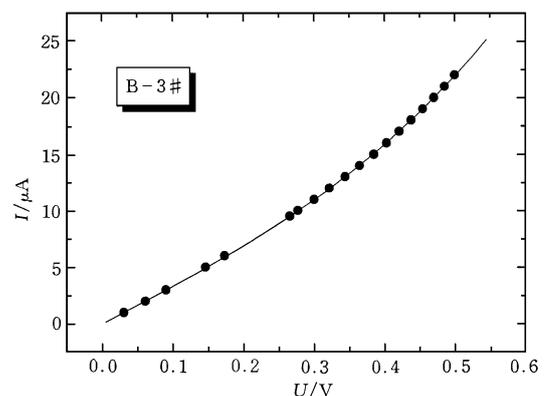


图 1 样品 B-3# 的结电流  $I$  与结偏压  $V$  的实验与拟合曲线 (• 为实验值; — 为拟合曲线)

我们用等离子体氧化形成中间绝缘层的方法重复性地制备出了具有 TMR 效应的 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co 磁性隧道结, 这在国内尚属首次. 样品的结电阻变化了约 3 个数量级, 但 TMR 比值改变不大, 室温下最高达 6.0%. 实验结果与理论模型能很好地符合.

(下转第 18 页)