

自旋阀中电流诱导磁化翻转行为的研究*

包 瑾 徐晓光 姜 勇†

(新金属材料国家重点实验室,材料科学与工程学院,北京科技大学,北京 100083)

(2009 年 3 月 23 日收到,2009 年 4 月 8 日收到修改稿)

通过实验研究了一种特殊的反对称自旋阀结构.研究发现,随着外加磁场的增大,该结构纳米器件表现出了一种由“逆 CIMS”向“正常 CIMS”的转变.这种现象是因为:该反对称自旋阀在不同的外加磁场下有不同的磁化取向,因而引起不同的 CIMS 行为.

关键词: CPP, ESPV, CIMS

PACC: 7570P, 7225, 7540G

1. 引 言

1988 年,人们在金属磁性多层膜中发现了巨磁电阻效应(GMR),即磁性多层膜的电阻值随外加磁场而发生巨大变化的行为^[1]. GMR 发现后不到十年,就被用做计算机硬盘的读出磁头材料,从而大幅度的提高了计算机硬盘的存储密度.此外,GMR 还被用在磁随机存储器(MRAM)^[2]中. MRAM 是最近兴起的一种新型信息存储器件,它主要是结合 GMR(或隧道磁电阻 TMR)^[3]和芯片集成技术,具有高速存取、不挥发等优良特性,被认为将最终取代目前被广泛运用的磁、光盘技术.目前为止,MRAM 的存储密度还不尽人意.因为随着磁性存储元件(即 GMR 或 TMR 器件)尺寸缩小到亚微米尺寸,磁性膜会产生巨大的退磁场,使得改变其磁化方向变得更加困难,即写入的能耗也大幅度增加,从而阻碍了存储密度的进一步提高.

Slonczewski^[4]和 Berger^[5]理论预测出,在纳米尺寸的单层铁磁体膜或纳米柱形状金属磁性多层膜中流过的极化电流能产生磁激发甚至引起磁化方向的翻转.这种电流诱导磁化翻转(CIMS)行为引起了人们广泛的兴趣.运用极化电流改变磁性膜的磁化方向的概念,很可能为我们提供了一系列“电流驱动”的纳米器件,即通过直接通过电流,而不是电流

导线产生的环形磁场来改变磁性纪录元件的记忆信号^[6].如果能在 MRAM 中应用 CIMS 技术,可以大大的降低 MRAM 的信息写入能耗和提高其存储密度.目前为止,绝大多数 CIMS 方面的研究工作都是围绕着最简单的铁磁体(FM)/铜(Cu)/FM 多层膜结构展开^[7-11].在通常的 FM/Cu/FM 结构中,能实现磁化翻转的临界电流值均在 10^7 A/cm² 左右.

最近,我们报道了在一种交换偏置自旋阀(ESPV)结构中观测到的 CIMS 现象^[12,13].该报道被认为具有很高的应用价值,因为在通常的磁记录元件中,人们用到的都是 ESPV,而不是简单 FM/Cu/FM 结构.这是因为 ESPV 的磁结构容易控制而且矫顽力也较低.该 ESPV 结构中能够实现磁化翻转的临界电流为 1.6×10^8 A/cm².这样高的临界电流值实际上阻碍了 CIMS 技术在磁性存储元件(例如 MRAM)中的应用,因为过高的写入电流可以轻易的破坏磁性存储单元.理论研究表明,只有当临界电流密度降低到 10^6 A/cm² 量级,CIMS 技术才能投入实际应用.因此,如何有效的降低 CIMS 的临界电流密度已经成为当今物理、材料以及电子领域的研究前沿之一.研究发现,利用金属钌层(Ru),可以将 ESPV 结构的临界电流有效地降低到 10^7 A/cm² 量级^[12].进一步,在我们设计的一种“反对称结构”ESPV 中,临界电流密度被成功的降低到了 10^6 A/cm²^[13-15]这种临界电流的实质性降低,使得 CIMS 技术很有可能被

* 国家自然科学基金(批准号:50831002,50701005),教育部科学技术研究重大项目(批准号:309006),科技部重大研究计划(批准号:2007CB936202),高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20070008024)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: yjiang@mater.ustb.edu.cn

应用到将来的自旋电子器件中,给人们带来更低能耗、更高存储密度的新型存储器件。

为了进一步研究金属 Ru 层对 CIMS 行为的影响机理,我们将前面所研究的“反对称结构”ESPV 中的金属 Ru 层替换为金属 Ru/Cu 双层结构.研究表明,由于这种替代,ESPV 中的磁化取向在外加磁场下发生改变,使得自旋阀结构在不同的磁场下表现出明显不同的 CIMS 行为。

2. 实 验

本文所研究的自旋阀结构(由底层到顶层)为 Cu(80)/IrMn(10)/Co₉₀Fe₁₀(5)/Cu(6)/Co₉₀Fe₁₀(1)/Ru(0.45)/Cu(5.5)/Co₉₀Fe₁₀(5)/Cu(5)/Ta(2)(所标膜层厚度单位均为 nm).纳米柱形状的自旋阀样品的制备过程如下:首先在超高真空溅射系统中,在洁净的 Si/SiO₂ 基板上按照上述结构顺序溅射出自旋阀金属多层膜,然后利用电子束平版印刷、离子束刻蚀,将自旋阀做成尺寸为 280 nm × 90 nm 的椭圆形纳米柱器件.具体的制备过程已经另文发表^[12,13].电极的排列使得该自旋阀为电流垂直于平面构型(即 CPP).电阻值的测量是在室温下采用标准的四引线法进行,其中正电流方向是指电子由自旋阀的底电极流向顶电极.外加磁场由电磁铁提供,磁场沿着金属多层膜的易磁化轴方向。

3. 实验结果及讨论

图 1 所示为一个具有上述反对称结构和尺寸的交流偏置自旋阀器件在室温下的磁电阻行为.测试所采用的信号电流为 1 mA.该器件在室温下表现出明显的 GMR 效应.如果定义 $GMR = ((R_{AP} - R_P) / R_P) \times 100\%$,其中 R_{AP} 和 R_P 分别为器件在外加磁场下表现出的最高和最低磁电阻值,则这个器件室温下的 GMR 大约为 0.63%.这种巨磁电阻现象是因为器件中金属磁性膜的磁化取向随外加磁场变化而引起的.当各磁性膜的磁化取向一致的时候,器件表现出较低的电阻值,而当各磁性膜的取向反平行的时候,器件表现出较高的电阻值。

将外加磁场降到 -39.8 kA/m,然后缓慢增大磁场达到并保持为某个值 H ($0 \leq H \leq 39.8$ kA/m)后,实验测量了样品的电阻值与外加信号电流之间的变化关系.其中当 $H = 15.9$ kA/m 和 $H = 31.8$ kA/m

时,所测结果如图 2 所示。

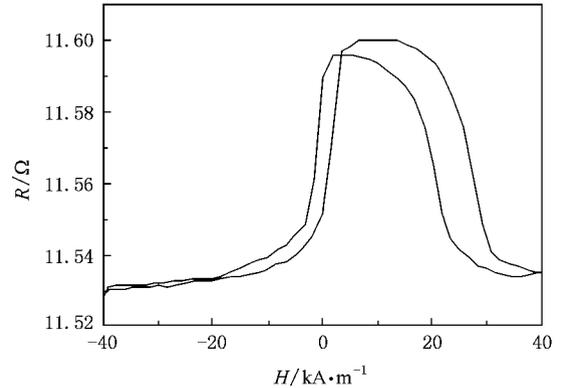


图 1 一个具有反对称结构的自旋阀纳米柱(在室温)

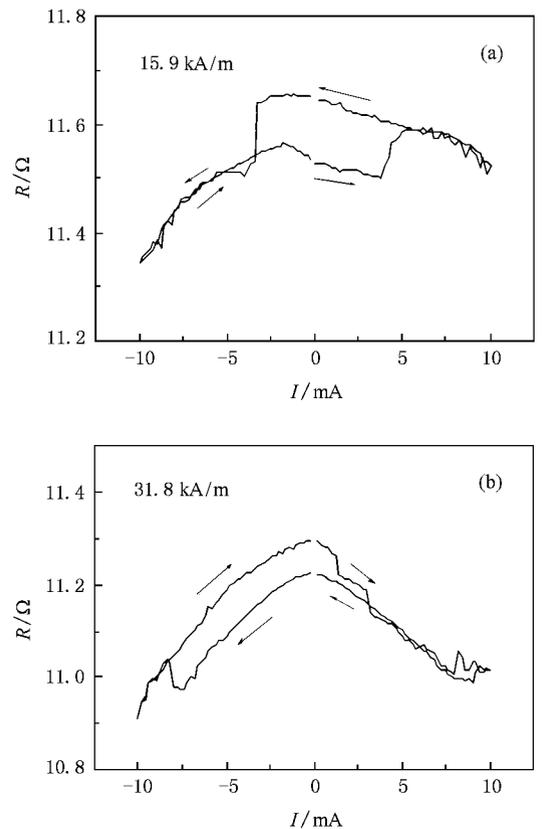


图 2 当不同外加磁场时器件的电阻值随信号电流变化曲线 (a) 15.9 kA/m (b) 31.8 kA/m

当外加磁场分别为 15.9 kA/m 和 31.8 kA/m 时,器件的电阻值均随着外加信号电流而变化,而且电阻随信号电流变化率与图 1 所示的 GMR 变化率一致.这说明在外加信号电流的作用下,器件中磁性膜的磁化取向发生了变化,即器件表现出了明显的 CIMS 行为.这种 CIMS 行为一般被解释为:当外加电

流穿过较厚的钉扎铁磁层时,电子的自旋方向被极化成钉扎铁磁层的磁化方向,这个被极化了的电流通过较薄的自由铁磁层时,就会对自由铁磁层的磁矩施加一个自旋矩 (spin-torque),从而改变自由层的磁矩取向,这个过程被称为自旋矩转换效应 (spin-torque transfer)^[41]. 根据 CIMS 的机理,当电子由钉扎层流向自由铁磁层时,自旋转换可以使得多层膜器件磁化取向趋向平行. 反之,则使得磁化取向变成反平行. 但是就本文所研究的自旋阀器件而言,由于正向电流中的电子是由底面的钉扎铁磁层 (5 nm 的 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$) 流向中间的自由铁磁层 (1 nm 的 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$), 根据自旋转换理论,正电流应该是使多层膜的反平行取向变成平行取向,即使得器件样品的电阻值由高变低. 而由图 2 可以看出,当磁场为 15.9 kA/m 时, CIMS 行为与理论预言的正好相反. 我们此时所观察到的是一种“逆 CIMS”行为. 而当外加磁场为 31.8 kA/m 时,器件又表现出与理论预言完全一致的正常 CIMS 行为.

如果我们将发生磁化翻转的起始电流值规定为临界电流. 用 $I_{\text{crit}}(\text{AP} \rightarrow \text{P})$ 表示发生磁化取向由反平行到平行状态的转变所需要的临界电流值; $I_{\text{crit}}(\text{P} \rightarrow \text{AP})$ 表示发生磁化取向由平行到反平行状态的转变所需要的临界电流值. 则该自旋阀器件在不同外加磁场下实验测得的临界电流值如图 3 所示.

可以看出,大约以 23.9 kA/m 外加磁场为分界点,器件表现出的 CIMS 行为发生了由逆 CIMS 到正常 CIMS 的转变. 该转变的机理在于不同磁场下器件中磁化组合状态的变化. 由于顶层耦合层 Cu 被 Ru 掺杂,大大的增加了自旋损耗,所以该器件的 GMR 信号主要来源于底组层 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 nm, 钉扎层) Cu (6 nm) $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (1 nm, 自由层) 的贡献. 当外加磁场较小的时候,中间和顶层的两个 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 膜的磁化方向均与底层 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 的磁化相反. 此时如果考

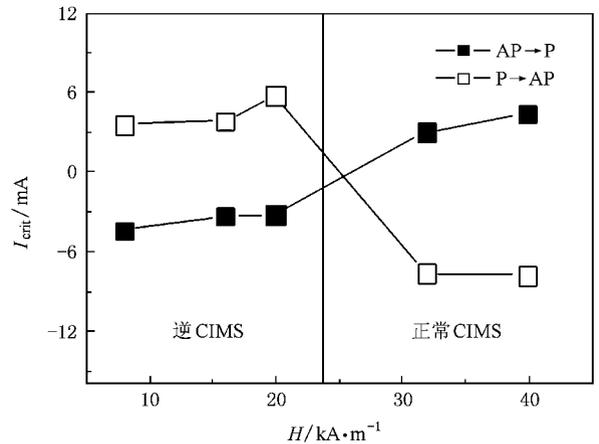


图 3 器件在不同磁场下发生 CIMS 的临界电流值

虑反向电流方向,即电子由顶电极流向底电极时,电子首先穿过顶层铁磁层而被自旋极化. 由于金属 Ru 和 Co 之间能够形成一种 Co/Ru 合金,与通常金属膜的性质恰恰相反,该合金强烈散射主自旋电子^[14]. 所以只有次自旋电子可以进入自由铁磁层,然后施加自旋矩迫使自由层的磁化取向改变为与底面的钉扎铁磁层呈平行排列. 此时自旋阀表现出逆 CIMS 行为. 而当磁场增大时,三层铁磁膜的磁化方向均平行. 此时,如果外加反向电流,由顶层流到自由层的次自旋电子改变自由层的磁化取向,使得自由层与钉扎层的磁化方向相反,表现出正常的 CIMS 行为.

4. 结 论

综上所述,本文研究了一种特殊的反对称自旋阀结构. 随着外加磁场的增大,该自旋阀器件表现出了一种由逆 CIMS 向正常 CIMS 的转变. 该现象可以被定性地解释为自旋阀在不同磁场中的不同磁化状态所致.

- [1] Baibich M N, Broto J M, Fert A, Dau F N V, Petroff F, Etienne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472
- [2] Peng Z L, Han X F, Zhao S F, Wei H X, Du G X, Zhan W S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 860 (in Chinese) [彭子龙、韩秀峰、赵素芬、魏红祥、杜关祥、詹文山 2006 物理学报 **55** 860]
- [3] Wang T X, Wei H X, Li F F, Zhang A G, Zeng Z M, Zhan W S, Han X F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3895 (in Chinese) [王天兴、

魏红祥、李飞飞、张爱国、曾中明、詹文山、韩秀峰 2004 物理学报 **53** 3895]

- [4] Slonczewski J C 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **159** L1
- [5] Berger L 1996 *Phys. Rev. B* **54** 9353
- [6] Inomata K 2001 *IEICE. Trans. Electron.* **E84-C** 740
- [7] Myers E B, Ralph D C, Katine J A, Louie R N, Buhman R A 1999 *Science* **285** 867

- [8] Tsoi M , Jansen A G M , Bass J , Chiang W C , Tsoi V , Wyder P 2000 *Nature* **406** 46
- [9] Katine J A , Albert F J , Buhman R A , Myers E B , Ralph D C 2002 *Phys. Rev. Lett.* **84** 3149
- [10] Mancoff F B , Dave R W , Rizzo N D , Eschrich T C , Engel B N , Tehrani S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1596
- [11] Urazhdin S , Birge N O , Pratt W P , Bass J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1516
- [12] Jiang Y , Abe S , Ochiai T , Nozaki T , Hirohata A , Tezuka N , Inomata K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 167204
- [13] Jiang Y , Nozaki T , Abe S , Ochiai T , Hirohata A , Tezuka N , Inomata K 2004 *Nature Materials* **3** 361
- [14] Jiang Y , Abe S , Nozaki T , Tezuka N , Inomata K 2004 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2874
- [15] Jiang Y , Yu G H , Wang Y B , Teng J , Ochiai T , Tezuka N , Inomata K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 192515

Current-induced magnetization switching in spin valves^{*}

Bao Jin Xu Xiao-Guang Jiang Yong[†]

(*The State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials , Department of Materials Science and Engineering ,
University of Science and Technology Beijing , Beijing 100083 , China*)

(Received 23 March 2009 ; revised manuscript received 8 April 2009)

Abstract

Recently , current-induced magnetization switching (CIMS) behavior in current-perpendicular-to-plane (CPP) exchange-biased spin valve (ESPV) nanopillars has been attracting great attention . In this paper , we experimentally study the CIMS in a special antisymmetric ESPV structure . With the increase of the external magnetic field , the device shows a transition from inverted CIMS to normal CIMS , which is possibly due to the different magnetic configuration in the antisymmetric ESPV .

Keywords : CPP , ESPV , CIMS

PACC : 7570P , 7225 , 7540G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50831002 50701005) , the Foundation for Key Program of Ministry of Education ,China(Grant No. 309006) , the National Basic Research and Development Program of China (Grant No.2007CB936202) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No.20070008024) .

[†] Corresponding author. E-mail : yjiang@mater.ustb.edu.cn