

NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合*

姜宏伟¹⁾ 李明华²⁾ 王艾玲¹⁾ 郑 鹤^{1)†}

¹⁾ 首都师范大学物理系, 北京 100037)

²⁾ 北京科技大学材料物理系, 北京 100083)

(2003 年 3 月 26 日收到, 2003 年 7 月 4 日收到修改稿)

采用平面霍尔效应测量方法, 对 NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合进行了研究. 结果表明, 在 NiFe/FeMn 体系中不存在 spin-flop 模型给出的单轴各向异性场. 而导致交换耦合场可逆与不可逆测量结果之间较大差异的原因是反铁磁颗粒的不稳定性或铁磁层的分畴现象.

关键词: 反铁磁/铁磁双层膜, 交换偏置场, 可逆与不可逆测量

PACC: 7550R, 7360D

1. 引 言

在合适的条件下, 包含反铁磁/铁磁 (AFM/FM) 界面的体系中, 由于铁磁、反铁磁之间的交换耦合作用会在铁磁材料中产生一个单方向的各向异性. 在磁滞回线中表现为中心对零点的漂移, 亦即反铁磁材料给铁磁材料一个单方向的钉扎场. 这一现象最早是在 CoO/Co 颗粒中发现的^[1]. 由于这种交换各向异性效应在自旋阀结构中的重要应用, 因此得到了人们的重视和研究^[2-4].

实验上通常都采用测磁滞回线(外场平行于交换偏置方向)的方法来测量交换偏置场, 但这有可能对 AFM/FM 之间的交换耦合作用产生破坏. 为避免测量对反铁磁/铁磁之间的交换耦合作用的破坏, Miller 和 Dahlberg^[5]采用了一种可逆测量方法来测 AFM/FM 之间的交换偏置场. 所谓的可逆测量方法即是对样品施加一个小的磁场, 以使铁磁层磁矩相对于交换偏置方向产生小的偏离. 他们发现, 采用可逆测量方法测得的交换偏置场与用磁滞回线方法(不可逆测量)测得的交换偏置场有很大的差别. Schulthess 和 Butler 认为^[6], 这种差别是由 AFM/FM 界面的 spin-flop 交换耦合所导致的单轴各向异性存在的证据. 但是, Stiles 和 McMichael 的结果却显示^[7], 这种差别有可能来源于一些反铁磁颗粒的不

稳定性. 在上述实验中, 由于铁磁层磁矩对交换偏置方向的偏离角度太小, 所以不可能分清楚单轴各向异性和单向各向异性的贡献, 而且反铁磁颗粒的不稳定性也不可能发生在铁磁层磁矩只有小的转动角的情况下. 因此, 无法弄清两种不同实验方法测得交换偏置场有很大差别的原因.

搞清楚造成可逆、不可逆测量结果差异的原因, 一方面可以深化我们对 AFM/FM 体系交换耦合物理机制的认识, 另一方面可以为改善自旋阀的应用性能提供新的途径.

本文采用了一种有效且简单的方法——平面霍尔效应 (PHE), 对 NiFe/FeMn 膜的交换耦合进行了研究并得到了物理意义明确的结果.

2. 实验方法

2.1. 样品制备

采用磁控溅射方法制备了一系列不同 FeMn 厚度的多层膜样品 Ta (7 nm)/NiFe (15 nm)/FeMn (t)/Ta (9 nm), 其中 $t = 1.8, 3.6, 5.4, 7.2, 9.0, 10.8, 12.6$ nm. 系统的本底真空优于 2×10^{-5} Pa, 工作气体为高纯氩气, 工作气压为 5×10^{-1} Pa, 基片采用水冷. 在制备过程中沿平行基片的表面方向加一大约 20 kA/m 的磁场. 各种材料的溅射速率均为 0.1 nm/s 左右.

* 北京市教育委员会科技发展基金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: jhwgao@sina.com

2.2. 测量条件

将制备好的薄膜样品光刻成标准的具有六端引线的长条状样品. 样品条的宽度为 $100 \mu\text{m}$, 测量的两端之间的距离为 1 mm . 测量是在室温下进行的, 测量电流为 1 mA 且平行于钉扎场方向. 磁场可在平面内任意旋转, 磁场强度范围为 $\pm 240 \text{ kA/m}$.

3. 实验结果及讨论

所谓 PHE, 即是将磁场加在电流和电压的同一平面内. 其他则都与测量霍尔效应一样.

在铁磁薄膜中进行各向异性磁电阻 (AMR) 测量时, 其电场可表述如下^[8]:

$$E_x = j\rho_{\perp} + j(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})\cos^2\theta, \quad (1)$$

$$E_y = j(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})\sin\theta\cos\theta, \quad (2)$$

式中 j 为电流密度, 方向为沿 x 轴方向; θ 为薄膜磁矩 (单畴样品) 与 x 轴的夹角; ρ_{\parallel} 和 ρ_{\perp} 分别是平行和垂直于磁化强度方向上的电阻率.

由各向异性导致的横向电压称为平面霍尔电压. 从方程 (2) 可以看出, 如果电阻无各向异性则不存在平面霍尔电压. 当 $\theta = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$ 时, 随外磁场变化的 PHE 电压的绝对值应该出现极大值 V_{max} . 这一点可以从方程 (2) 中看出.

在确定初始位置时 ($\theta = 0^\circ$ 时), 我们采用如下方法: 调节磁场方向, 并在 $0-240 \text{ kA/m}$ 范围内进行扫描. 当 PHE 电压在整个扫描范围内基本不变时, 我们认为此时磁场的方向和偏置场的方向是一致的. 即为测量起始方向 $\theta = 0^\circ$. 理论上, $\theta = 0^\circ$ 时, PHE 电压应该为零. 但在实验中由于光刻产生的误差, 如霍尔测量端并未严格对齐或所刻图形的长方向与偏置场方向不严格平行等, 都会使 PHE 电压不为零.

对于霍尔测量端未严格对齐造成的影响, 我们在进行数据处理时进行了修正. 方法为: 将测量曲线平移至使测量值的正负极值相对于零为对称的位置. 见图 1 中与横轴平行的虚线. 两条虚线到横轴的距离相等. 而对于由所刻图形的长方向与偏置场方向不严格平行造成的测量电流与偏置方向产生的夹角, 我们可以通过方程 (2) 求得.

其实在单畴模型下, 铁磁层磁矩与测量电流之间的夹角 θ 可以通过方程 (2) 直接获得,

$$\theta = (n\pi + (-1)^n \arcsin(V/V_{\text{max}}))/2, \quad n = 0, \pm 1. \quad (3)$$

这里, n 取值的原则是保持 θ 取值光滑连续.

图 1 是样品 Ta(7 nm)/NiFe(15 nm)/FeMn(12.6 nm)/Ta(9 nm) 的 PHE 测量曲线. 从图中可以看出: 当 $\theta = 0^\circ$ 时, PHE 电压不为零, 利用 (3) 式求得测量电流与偏置方向的夹角 $\theta = 1.8^\circ$. 当 $\theta = \pm 90^\circ$ 时, 实验曲线基本不存在回滞现象, PHE 电压都能达到正负极值. 这时可以把铁磁层看成是单畴的, 即铁磁层的磁矩随外场的转动是一致的. 因此我们可以利用 (3) 式来求铁磁层磁矩与偏置场方向的夹角 α 随外磁场的变化.

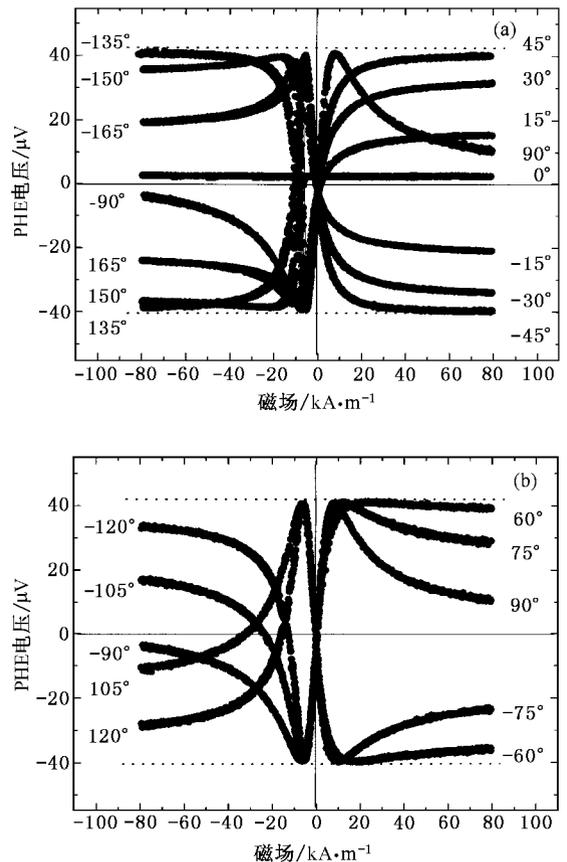


图 1 不同方向外场下 Ta(7 nm)/NiFe(15 nm)/FeMn(12.6 nm)/Ta(9 nm) PHE 测量曲线 (a) $\theta = 0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ$ (b) $\theta = \pm 60^\circ, \pm 75^\circ, \pm 90^\circ$

图 2 的曲线是外加磁场与偏置场方向垂直时, 即 $\theta = 90^\circ$ 时, 铁磁层磁矩与偏置场方向的夹角 α 随外磁场变化的曲线. 其中点线是实验曲线, 实线是理论拟合曲线.

由于 AFM/FM 双层膜中单位面积的铁磁层能量可以表述为^[6]

$$E = K_a t \sin^2\alpha - J \cos\alpha - HM_s t \sin\alpha, \quad (4)$$

式中 K_a 是 AFM/FM 耦合导致的有效单轴各向异性

能常数； J 是单向交换偏置耦合强度； H 是外加磁场； M_s, t 则分别为铁磁层的饱和磁化强度和厚度。

对(4)式求能量极小,即可得到 H 和 α 的解析式

$$HM_s t \cos \alpha = 2K_a t \sin \alpha \cos \alpha + J \sin \alpha. \quad (5)$$

图 2 中的理论拟合曲线即出自(5)式. 可以看出理论拟合曲线与实验曲线符合得相当好.

拟合的结果如下:单向交换偏置场 $J/M_s t = 9.04 \pm 0.02$ kA/m,有效的单轴各向异性场 $2K_a/M_s = 0.079 \pm 0.003$ kA/m. 这表明,在 NiFe/FeMn 体系中不存在 spin-flop 模型给出的单轴各向异性场,这与 NiFe/NiMn 体系中的状况相类似^[9]. 通常 FeMn/NiFe 的偏置场都在 32 kA/m 以上,但由于我们考虑增强 PHE 信号而加厚了 NiFe 的厚度(比做自旋阀时厚了 4 倍),因此实验测得的以及拟合的数据都较小.

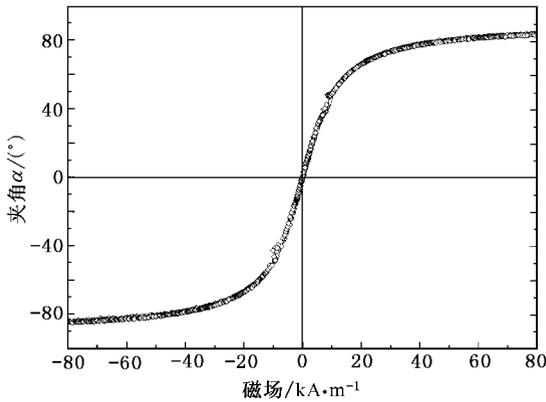


图 2 铁磁层磁矩与偏置场方向的夹角 α 与外磁场的关系

对 FeMn 厚度小于 7.2 nm 的样品,由于钉扎效果变差致使我们无法准确测定 $\theta = 0^\circ$ 的位置. 故而未做 PHE 测量.

图 3 是 FeMn 厚度为 12.6 nm 样品的磁滞回线,从中得到样品的交换偏置场为 6.7 kA/m. 而 PHE 测量同一样品得到的单向交换偏置场为 9 kA/m,要大于磁滞回线测得的结果. 其原因可能是反铁磁颗粒

的不稳定性或铁磁层的分畴现象.

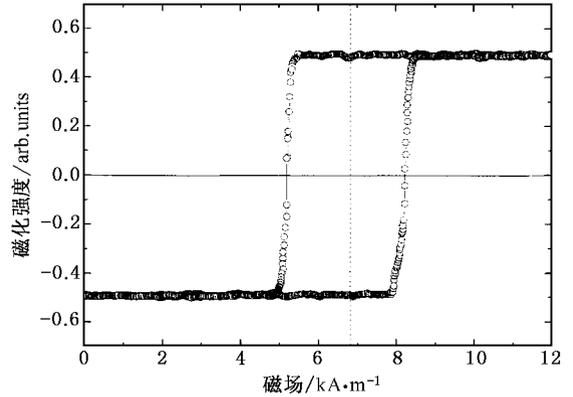


图 3 $Ta(7\text{ nm})/NiFe(15\text{ nm})/FeMn(12.6\text{ nm})/Ta(9\text{ nm})$ 的磁滞回线

从图 1 中可以看到,在可逆测量过程中,当外场方向与偏置场方向的夹角很大时($90^\circ < \theta < 270^\circ$),PHE 电压达不到正负极值(虚线标示的位置),说明在磁矩转动过程中出现了分畴现象. 而图 2 中 $\theta \neq 90^\circ$ 的实验曲线出现的回滞现象(磁场扫描时,升、降过程所测的曲线不完全重合)则是反铁磁颗粒的不稳定性造成的.

4. 结 论

PHE 测量对研究 AFM/FM 薄膜的交换耦合是一种有效的方法. 由于实验中铁磁层磁矩与偏置场方向的夹角 α 足够大,所以在一次可逆测量中,单轴各向异性和单向各向异性对总的各向异性的贡献就可以被清楚地分开了. 我们的结果表明,在 NiFe/FeMn 体系中不存在 spin-flop 模型给出的单轴各向异性场. 导致可逆与不可逆测量结果之间较大差异的原因是测量过程中铁磁层的分畴现象或者反铁磁颗粒的不稳定性.

[1] Meiklejohn W H , Bean C P 1956 *Phys. Rev.* **102** 1413 ;
Meiklejohn W H , Bean C P 1957 *Phys. Rev.* **105** 904
[2] Dieny B , Speriosu V S , Parkin S S *et al* 1991 *Phys. Rev. B* **43** 1297
[3] Li M H *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2230 (in Chinese) 李明华等 2001 物理学报 **50** 2230]
[4] Jiang H W *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1366 (in Chinese) 姜宏伟等 2002 物理学报 **51** 1366]
[5] Miller B H , Dahlberg D 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 3932
[6] Schulthess T C , Butler W H 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4516
[7] Stiles M D , McMichael R D 1999 *Phys. Rev. B* **59** 3722
[8] Thompson D A , Romankiw L T , Mayadas A F 1975 *IEEE Trans. Magn.* **MAG-11** 1039
[9] Li G H , Yang T , Hu Q *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 14

Exchange coupling in FeMn/NiFe bilayers^{*}

Jiang Hong-Wei¹⁾ Li Ming-Hua²⁾ Wang Ai-Ling¹⁾ Zheng Wu¹⁾

¹⁾ (*Department of Physics , Capital Normal University , Beijing 100037 , China*)

²⁾ (*Department of Material Physics , University of Science and Technology of Beijing , Beijing 100083 , China*)

(Received 26 March 2003 ; revised manuscript received 4 July 2003)

Abstract

Planar Hall effects in exchange biased FeMn/NiFe bilayers were measured under magnetic fields rotated in the film plane. Detailed magnetic anisotropy analysis shows that there is no additional uniaxial anisotropy induced by the interfacial coupling in this system, while the instability of anti-ferromagnetic grains or the formation of many domains in ferromagnetic layer may play an important role responsible for the difference between exchange biasing fields obtained by reversible and irreversible measurements.

Keywords : AFM/FM bilayers , exchange bias field , reversible and irreversible measurements

PACC : 7550R , 7360D

^{*} Project supported by the Science and Technology Development Foundation from Committee of Education of Beijing , China.