

DOI: 10.7652/xjtuxb201407023

电场调制 FeCoSi/PZT 驱动器磁性研究

韩学梦, 郭晓斌, 王真, 左亚路, 席力

(兰州大学物理科学与技术学院磁学与磁性材料教育部重点实验室, 730000, 兰州)

摘要: 采用射频磁控共溅射方法在玻璃衬底上制备了具有面内单轴各向异性的 FeCoSi 磁性薄膜。使 FeCoSi 磁性薄膜初始易磁化方向(称为初始易轴)与 PZT 驱动器应力方向(长轴方向)平行进行粘接得到 FeCoSi/PZT 驱动器异质结,用于研究通过电场来调制磁性薄膜的磁矩转动及各向异性场的场强,并利用微聚焦磁光克尔效应测量了不同电压下 FeCoSi 磁性薄膜初始难磁化方向(称为初始难轴)的磁滞回线。结果表明:当给 PZT 驱动器施加正电压时,异质结在张应力的作用下薄膜的易磁化方向保持不变,但各向异性场变大,各向异性场随电压的变化关系约为 0.12 Oe/V,从而实现了电场对各向异性场场强的调制;当给 PZT 驱动器施加负电压时,异质结在压应力的作用下使磁矩偏离初始易轴,而磁矩从初始易轴方向转到初始难轴方向所需施加的电压为 -80 V,从而实现了电场对磁性薄膜磁矩转动的调制。文中实现的通过电场对 FeCoSi 磁性薄膜磁矩转动和各向异性场的调制有望在低功耗微波器件中得到应用。

关键词: 压电驱动器;电场调制;磁电耦合;磁矩翻转

中图分类号: O469 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0136-05

Study on the Magnetism of Electric-Field Modulated FeCoSi/PZT Actuator

HAN Xuemeng, GUO Xiaobin, WANG Zhen, ZUO Yalu, XI Li

(Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Materials of Ministry of Education, School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: FeCoSi magnetic thin film with in-plane uniaxial anisotropy was fabricated on glass substrate by RF magnetron co-sputtering. A FeCoSi/PZT actuator heterojunction was obtained through a parallel bonding with magnetic film's original easy-magnetization axis along the PZT actuator's length direction, which is the main direction for stress generating, and the heterojunction was used to investigate the magnetic moment switching of electric-field modulated magnetic film and the intensity of anisotropic field. The hysteresis loops of FeCoSi film in hard-magnetization axis direction were measured under various voltages via micro-focus magneto-optical Kerr effect. Results showed that when a positive voltage was applied to the PZT actuator, the magnetic moment along the original easy axis maintained unchanged if the heterojunction was under a tensile stress, and the intensity of anisotropic field increased with the tensile stress at a rate of around 0.12 Oe/V. While under negative voltage, the magnetic moment deviated from the original easy axis direction under the compressive stress. The switching of magnetic moment from original easy axis direction to hard axis direction could be achieved under a negative voltage of -80 V. The electric-field controlled magnetic moment switching and anisotropic field modulation

收稿日期: 2013-11-17。 作者简介: 韩学梦(1988—),女,硕士生;席力(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51171076,51101079);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(Lzujbky-2012-27)。

网络出版时间: 2014-04-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140415.1152.001.html>

may get potential applications in low-power microwave devices.

Keywords: PZT actuator; electric-field modulation; magnetoelectric coupling; magnetic moment switching

近年来,随着垂直磁记录材料、巨磁电阻/隧道磁电阻磁头技术和电子设备小型化的不断发展,对器件功耗的控制要求越来越高,因此对低功耗下铁磁性薄膜磁化强度的可控翻转方法研究受到了人们的重视。目前,已有几种调控磁矩翻转的方法得到了广泛的应用,例如:由直流电流产生的磁场控制磁矩翻转^[1-2];由自旋极化电流产生的自旋矩效应引起的磁矩翻转^[3-4];光诱导的磁矩翻转^[5];通过电场改变应力来控制铁磁/压电驱动器磁性薄膜中的磁矩翻转^[6-9]。在铁磁/压电驱动器或铁磁/多铁双层膜中利用应力调控磁矩翻转,具有明显降低功耗的特点,目前已引起了人们的广泛关注,例如,在 $\text{Ni}^{[10]}$ 、 $\text{FeCo}^{[11]}$ 、 $\text{FeCoB}^{[12]}$ 、 $\text{LSMO}^{[13]}$ 、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4^{[14]}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4^{[15]}$ 等材料中都观察到了磁矩在电场调制下的转动现象。随着无线数据传输技术向高频不断发展,迫切需要提高软磁薄膜高频应用的截止频率,而磁性薄膜的自然共振频率受薄膜材料面内单轴各向异性的影响,因此调控软磁薄膜的单轴各向异性场也变得十分重要。本文利用 FeCoSi 具有高饱和磁化强度和大电阻率因而适用于高频应用的特点^[16],研究在 FeCoSi/PZT 驱动器中实现电场调制磁矩转动以及电场调制下各向异性场的变化规律。

1 实验

在本底真空为 6.4×10^{-5} Pa、Ar 气压力为 0.12 Pa 的条件下,对表面放有 7 片 Si 片 ($5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$) 的 76.2 mm (3 英寸) $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$ (原子数比为 65:35) 靶进行射频磁控共溅射,在玻璃基底上制备了 FeCoSi 薄膜样品。用能谱仪对 FeCoSi 薄膜的成分进行了测定,得出 Fe、Co 和 Si 的原子数比为 57:30:13。在溅射过程中基底温度冷却到 9.1°C ,并且施加平行于基底平面的 2.4 kA/m 磁场,以便在薄膜样品中诱导出良好的各向异性,使薄膜易磁化轴方向(简称易轴方向)朝着外加磁场的方向。FeCoSi 薄膜的厚度通过沉积时间和溅射速率控制,而薄膜的溅射速率则通过用表面轮廓测试仪 (Veeco Dektak8) 测量校准样品的厚度来确定。本实验使用的 FeCoSi 薄膜的厚度约为 26 nm。使用一个长为 18 mm、宽和高均为 6 mm 的商用 PZT 压电驱动器来产生所需的应力,用数字电压表 (Keithley 236) 为

PZT 驱动器提供电压。图 1 为 PZT 压电驱动器的相对伸长率随电压的变化关系曲线。当给驱动器提供正电压时,会沿长方向产生拉伸作用,导致在长方向产生张应力;相反,当提供负电压时,会产生收缩作用,因而产生压应力。由图 1 还可以看出,随着外加电压的变化,PZT 压电驱动器的形变也相应发生变化,但存在滞后现象,这是铁电材料特有的一种现象。将尺寸约为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 FeCoSi 薄膜用 502 胶水粘到 PZT 驱动器侧面,使薄膜易磁化方向与驱动器产生应力的方向平行形成 FeCoSi/PZT 异质结。

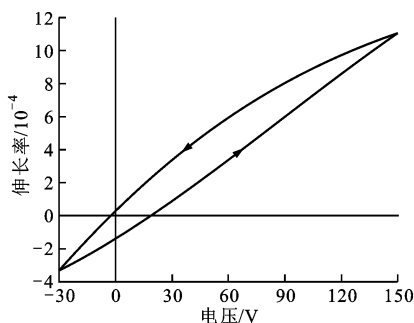


图1 PZT 驱动器形变方向伸长率与电压的关系

利用磁光克尔效应能够无损且高精度地探测局部磁矩变化,这项技术已在磁性薄膜或超薄磁性薄膜的磁性测量中得到了越来越广泛的应用。本实验中通过使用 Durham Nano MOKE™ 2 系统测量 FeCoSi 薄膜的纵向克尔效应来得到薄膜的磁滞回线,MOKE 系统的扫描频率和波长分别为 10 Hz 和 630 nm。

2 结果与讨论

图 2 为制备态 FeCoSi 薄膜的磁滞回线,从中可以看出:沿易轴方向展现为具有高剩磁比的方形回线,且矫顽力较其他磁性薄膜的小,约为 5.8 Oe;在与易轴夹角为 90° 方向上的回线几乎为一条斜线,表明该方向为样品的难磁化方向(简称难轴方向),各向异性场强为 15.6 Oe。这是具有面内单轴各向异性的软磁薄膜的典型磁滞回线,表明样品具有面内单轴磁各向异性。根据 Herzer 的随机各向异性模型^[17],晶粒尺寸越小,薄膜中越容易诱导出面内单轴磁各向异性。溅射过程中 Si 掺杂可以显著地

减小磁性薄膜中 FeCo 的晶粒尺寸^[18],使 FeCoSi 薄膜具有较好的面内单轴磁各向异性。

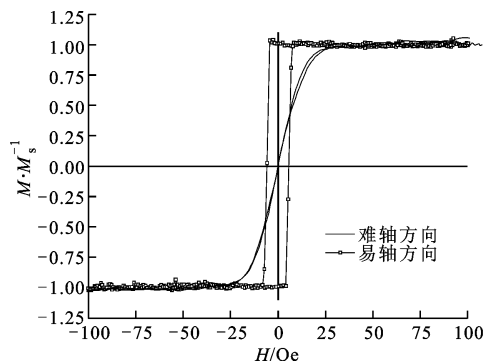


图2 FeCoSi 薄膜难轴和易轴方向的磁滞回线

根据本课题组以前的工作^[19],将 FeNi 磁性薄膜的难轴沿着 PZT 驱动器产生应力的方向进行粘贴,当给驱动器施加正向电压时,FeNi 薄膜受张应力作用导致其磁矩随外加正向电压的增加而逐渐由易轴向难轴方向偏转,因此可实现电场调制磁矩的翻转;当给驱动器施加负向电压时,FeNi 薄膜会受压应力作用而保持易轴方向不变。本文中依然利用磁电耦合效应,通过界面耦合使 PZT 压电驱动器产生的应力经由玻璃衬底传输到 FeCoSi 磁性薄膜上,由磁致伸缩效应调制磁矩翻转和调控各向异性。粘贴时使 FeCoSi 薄膜的初始易轴与 PZT 驱动器产生的应力方向平行,通过测量不同电压下的磁滞回线研究磁矩的转动。

图3为不同电压下 FeCoSi/PZT 异质结磁性薄膜初始难轴方向的磁滞回线随外加电压的变化,可以看出:零电压时回线的剩磁比较低;随着负向电压的增加,剩磁比随之增加,表明该方向上零磁场下的磁矩不断增强,即 FeCoSi 薄膜的磁矩在负向电压的作用下逐渐向薄膜的初始难轴方向转动。但是,受该 PZT 驱动器在负方向最大只能加 30 V 电压的限制,我们并未观察到在负向电压作用下磁矩由初始难轴向易轴的完全转变。随着正向电压的增加其剩磁比逐渐减小,曲线变得更加倾斜,表明在正向电压作用下初始难轴方向保持不变,但该方向上各向异性不断增强。由图3得到的各向异性场及剩磁比随电压的变化关系如图4和图5所示。

图4给出了各向异性场随电压的变化关系,从中可以看到:当电压为 0 V 时,各向异性场场强为 9.7 Oe,这个值比原始磁性薄膜的各向异性场场强要小,这可能是由于磁性薄膜粘贴过程中产生的应力使磁性薄膜的难轴发生了偏转、或者粘贴时初始

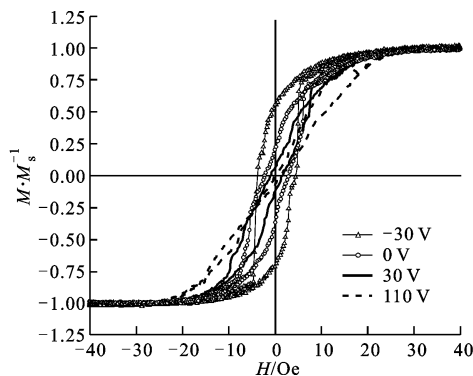


图3 FeCoSi/PZT 异质结在不同电压下难轴方向的磁滞回线

易轴并未严格平行于 PZT 驱动器产生应力的方向、或者在测量时并不是严格沿初始难轴方向而导致的;在电压从 110 V 减小到 -30 V 的过程中,各向异性场场强从 22 Oe 逐渐减小到 5 Oe。对这些数据进行线性拟合,根据线性拟合曲线可以得到各向异性场场强的变化率约为 0.12 Oe/V。将该线性拟合曲线进行外推,可以得到各向异性场场强为 0 时所需施加的负向电压约为 -80 V。

图5所示为 FeCoSi/PZT 异质结在外加电压作用下沿难轴方向的剩磁比随外加电压的变化关系曲线。由图中可以看出:随着正向电压的增加,剩磁比从 0 V 时的 0.2 逐渐减小到 60 V 时的 0.02,之后随电压的增加几乎保持不变;当施加负向电压时, -10 V 的电压就可使剩磁比增加到 0.48,之后随着负向电压的增加,剩磁比几乎是线性增加。值得注意的是,当将该线性变化外推到剩磁比接近 1 时,该负向电压也约为 -80 V,这和由各向异性场得到的结果相吻合,表明虽然受到 PZT 驱动器的限制,不能观察到磁矩在压应力作用下由易轴向难轴的转动,但却可以预测当负向电压达到 -80 V 时,磁矩将会发生从易轴向难轴的完全转动。

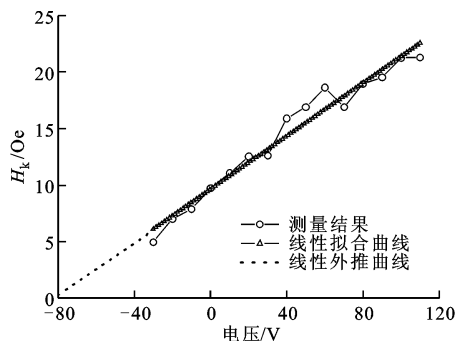


图4 FeCoSi/PZT 异质结各向异性场场强随电压的变化关系

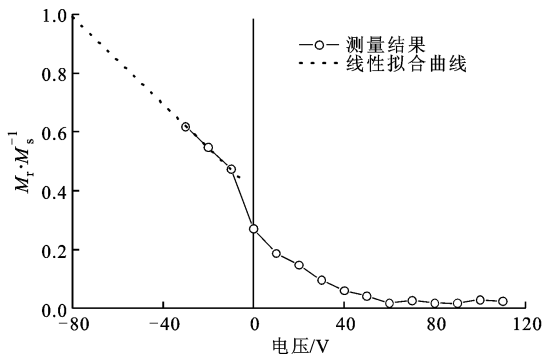


图 5 FeCoSi/PZT 异质结难轴方向剩磁比随电压的变化关系

3 结 论

采用射频磁控共溅射的方法制备了具有面内单轴各向异性的 FeCoSi 磁性薄膜。使 FeCoSi 磁性薄膜初始易轴方向平行于 PZT 驱动器的应力方向进行粘接,得到了 FeCoSi/PZT 驱动器异质结。当施加正向电压时,异质结在张应力的作用下使各向异性场变大,而当施加负向电压时,异质结中的磁矩在压应力的作用下偏向初始难轴,有效地实现了电场对磁性薄膜磁矩转动的调制,进而可调制各向异性场的大小。本文实现的通过电场对 FeCoSi 磁性薄膜磁矩转动和各向异性场的调控,符合低消耗的要求,并且对各向异性场的调制能够应用于调节磁性薄膜的自然共振频率,因此有望在低功耗微波器件中得到应用。

参考文献:

[1] GREULLET F, TIUSAN C, MONTAIGNE F, et al. Evidence of a symmetry-dependent metallic barrier in fully epitaxial MgO based magnetic tunnel junctions [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(18): 187202-187205.

[2] 王屹东,王蕾,潘礼庆,等. 用纵向磁光克尔效应观察 Co/Cu/Co 三层膜正交方向磁矩随磁场的翻转过程 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(7): 712-716.

WANG Yidong, WANG Lei, PAN Liqing, et al. Reversal process of magnetization of a Co/Cu/Co trilayer observed by longitudinal MOKE technique [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(7): 712-716.

[3] JIANG Y, NOZAKI T, ABE S, et al. Substantial reduction of critical current for magnetization switching in an exchange-biased spin valve [J]. Nat Mater, 2004 (3): 361-264.

[4] FUCHS G D, EMLEY N C, KRIVOROTOV I N, et

al. Spin-transfer effects in nanoscale magnetic tunnel junctions [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(7): 1205-1207.

[5] RADU I, VAHAPLAR K, STAMM C, et al. Transient ferromagnetic-like state mediating ultrafast reversal of antiferromagnetically coupled spins [J]. Nature, 2011, 472(7342): 205-208.

[6] KUKHAR V G, PERTSEV N A, KHOLKIN A L. Thermodynamic theory of strain-mediated direct magnetoelectric effect in multiferroic film-substrate hybrids [J]. Nanotechnology, 2010, 21(26): 265701(1-11).

[7] MA Jing, HU Jiamian, LI Zheng, et al. Recent progress in multiferroic magnetoelectric composites: from bulk to thin films [J]. Adv Mater, 2011, 23(9): 1062-1087.

[8] 杨展其,梁振伟,朱英豪. 多铁材料物理铋铁氧之磁电耦合与应用 [J]. 物理双月刊, 2009, 31(5): 468-475.

[9] 顾建军,刘力虎,岂云开,等. 复合薄膜 $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-BiFeO}_3$ 中的磁电耦合 [J]. 物理学报, 2011, 60(6): 067701(1-6).

GU Jianjun, LIU Lihu, QI Yunkai, et al. Magnetoelectric coupling in $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-BiFeO}_3$ composite films [J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(6): 067701(1-6).

[10] WEILER M, BRANDLMAIER A, GEPRAGS S, et al. Voltage controlled inversion of magnetic anisotropy in a ferromagnetic thin film at room temperature [J]. New J Phys, 2009, 11(1): 013021(1-16).

[11] LAHTINEN T H E, FRANKE K J A, VAN DIJKEN S. Electric-field control of magnetic domain wall motion and local magnetization reversal [J/OL]. Scientific Reports, 2012, 2. doi: 10.1038/srep00258.

[12] LEI N, PARK S, LECOEUR P, et al. Magnetization reversal assisted by the inverse piezoelectric effect in Co-Fe-B/ferroelectric multilayers [J]. Phys Rev: B, 2011, 84(1): 012404-012407.

[13] THIELE C, DORR K, BILANI O, et al. Influence of strain on the magnetization and magnetoelectric effect in $\text{La}_{0.7}\text{A}_{0.3}\text{MnO}_3\text{/PMN-PT}(001)$ ($\text{A}=\text{Sr}, \text{Ca}$) [J]. Phys Rev: B, 2007, 75(5): 054408-054415.

[14] ZAVALICHE F, ZHENG H, MOHADDES-ARDABILI L, et al. Electric field-induced magnetization switching in epitaxial columnar nanostructures [J]. Nano Lett, 2005, 5(9): 1793-1796.

[15] YANG J J, ZHAO Y G, TIAN H F, et al. Electric field manipulation of magnetization at room temperature in multiferroic $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{/Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.7}\text{Ti}_{0.3}$ heterostructures [J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(21):

- 212504-212507.
- [16] XI Li, ZHANG Zhe, LU Jianmin, et al. The high-frequency soft magnetic properties of FeCoSi/MnIr/FeCoSi trilayers [J]. *Physica: B*, 2010, 405(2): 682-685.
- [17] HERZER G. Grain size dependence of coercivity and permeability in nanocrystalline ferromagnets [J]. *IEEE Transactions on Magnetism*, 1990, 26(5): 1397-1402.
- [18] XI Li, DU Jihong, ZHOU Junjun, et al. Soft magnetic property and magnetization reversal mechanism of Sm doped FeCo thin film for high-frequency application [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(16): 5421-5425.
- [19] XI Li, GUO Xiaobin, WANG Zhen, et al. Voltage-driven in-plane magnetization easy axis switching in FeNi/piezoelectric actuator hybrid structure [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(1): 015804(1-4).
- (编辑 葛赵青)
-
- (上接第 135 页)
- [4] 马双超, 臧朝平, 兰海波. 某航空发动机机匣的动力学模型修正 [J]. *航空动力学报*, 2013, 28(4): 878-884.
- MA Shuangchao, ZANG Chaoping, LAN Haibo. The dynamic model correction of aero-engine casing [J]. *Journal of Air Power*, 2013, 28(4): 878-884.
- [5] SEGALMAN D J. Modelling joint friction in structural dynamics [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13(1): 430-453.
- [6] CRAWLEY E F, AUBERT A C. Identification of nonlinear structural elements by force-state mapping [J]. *AIAA Journal*, 1986, 24(1): 155-162.
- [7] GAUL L, LENZ J. Nonlinear dynamics of structures assembled by bolted joints [J]. *Acta Mechanica*, 1997, 125(1/2/3/4): 169-181.
- [8] SEGALMAN D J. A four-parameter Iwan model for lap-type joints [J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 2005, 72(5): 752-760.
- [9] 李辉光, 刘恒, 虞烈. 粗糙机械结合面的接触刚度研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(6): 1-6.
- LI Huiguang, LIU Heng, YU Lie. Contact stiffness of rough mechanical joint surface [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(6): 1-6.
- [10] AHMADIAN H, JALALI H. Generic element formulation for modelling bolted lap joints [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(5): 2318-2334.
- [11] ERITEN M, KURT M, LUO G, et al. Nonlinear system identification of frictional effects in a beam with a bolted joint connection [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 39(1): 245-264.
- [12] BEHESHTI A, KHONSARI M M. Asperity micro-contact models as applied to the deformation of rough line contact [J]. *Tribology International*, 2012, 52(1): 61-74.
- [13] CARBONE G, BOTTIGLIONE F. Contact mechanics of rough surfaces: a comparison between theories [J]. *Mechanica*, 2011, 46(3): 557-565.
- [14] BOGRAD S, REUSS P, SCHMIDT A, et al. Modeling the dynamics of mechanical joints [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(8): 2801-2826.
- [15] IWAN W D. A distributed-element model for hysteresis and its steady-state dynamic response [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1966, 33(4): 893-900.
- [16] KRAGELSKY I V, DEMKIN N B. Contact area of rough surfaces [J]. *Wear*, 1960, 3(3): 170-187.
- [17] ARGATOR I I, BUTCHER E A. On the Iwan models for lap-type bolted joints [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2011, 46(2): 347-356.
- [18] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A Mathematical and Physical Sciences*, 1966, 295(1442): 300-319.
- [19] SEGALMAN D J, STARR M J. Relationships among certain joint constitutive models [R]. Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratories, 2004.
- [20] SMALLWOOD D O, GREGORY D L, COLEMAN R G. Damping investigations of a simplified frictional shear joint [R]. Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratories, 2000.
- (编辑 葛赵青)