

铁磁共振法测磁各向异性*

顾文娟 潘靖 杜薇 胡经国†

(扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2010年8月23日收到; 2010年9月3日收到修改稿)

采用铁磁共振方法,研究了铁磁/反铁磁双层膜系统中,因交换耦合以及磁晶各向异性而产生的有效各向异性场.结果表明:被测系统有无交换偏置场以及其正负号性质等均能在共振谱中得到辨析.结果还显示:沿着不同结晶方向施加外磁场,共振场的行为与磁晶各向异性以及铁磁/反铁磁交换耦合作用而诱发的单向各向异性等密切相关.将共振频率的变化看成外磁场(包括其方向和大小)的函数,研究得到了单向各向异性,立方各向异性等对共振频率的影响,并同实验结果做了很好的比较.

关键词: 铁磁/反铁磁双层膜, 交换耦合, 铁磁共振, 单向各向异性

PACS: 76.50.+g, 76.30.er, 75.30.Gw

1. 引言

铁磁/反铁磁层间交换耦合作用可使铁磁/反铁磁双层膜的磁滞回线沿磁场方向偏离原点,其偏离量被称为交换偏置场,它可以等效成叠加在外加磁场中的交换异性场 H_E . 这种现象最早是 Meiklejohn 和 Bean 在 Co-CoO 铁磁/反铁磁混合系统中发现的^[1-4]. 如今具有交换偏置现象的铁磁/反铁磁双层膜在工业技术上有着广泛的应用,如用在基于自旋阀结构的高密度磁性记录读取头器件中^[5-7].

铁磁共振法是获取磁晶各向异性以及磁弛豫等信息的有效手段,对共振场的直接测量,可获得各向异性场和退磁场等^[8-15]. 迄今对铁磁/反铁磁双层膜中铁磁共振现象的研究已有很多的报告^[16-19]. 晶体中原子排列的各向异性会导致许多物理、化学性能的各向异性. 磁性也是其中之一,称为磁晶各向异性. 由于磁晶各向异性的存在,晶体沿不同晶轴方向上的磁化性质以及其磁化强度随磁场的变化等都有明显差别. 因此,对各向异性的测量尤其对单向各向异性的测量就显得特别重要. 本文研究了铁磁共振的方法检测铁磁/反铁磁双层膜中的磁各向异性场的特点,并通过其磁共振谱辨析被测系统有无交换偏置场以及其正负号性质等.

本文基于 Smith 和 Beljers 理论研究了铁磁/反铁磁双层膜系统的铁磁共振现象^[20,21]. 本模型中铁磁层具有单轴磁晶各向异性和立方磁晶各向异性;而反铁磁层非常薄,其能量被忽略,反铁磁层对铁磁层的钉扎作用仅考虑界面交换耦合. 研究给出了共振频率的解析表达式,并着重讨论了磁晶立方各向异性,外磁场方向以及界面交换耦合等对铁磁共振频率的影响.

2. 模型及解析结果

对铁磁/反铁磁双层膜,假定界面为非补偿面,并定义在 x - y 平面, z 轴垂直于界面. 采用球坐标系,其中 ϕ_{FM} , θ_{FM} 分别表示磁化方向与 z 轴夹角的极角和与 x 轴夹角的方位角,外磁场 H 与 x 轴的夹角为 β ,则铁磁/反铁磁双层膜单位面积上的总能量可以写为

$$E_T = (K_{\perp} - 2\pi M_s^2) \sin^2 \phi_{FM} + \frac{K_{\parallel}}{4} (\sin^2 2\phi_{FM} + \sin^4 \phi_{FM} \sin^2 2\theta_{FM}) + K_u \sin^2 \phi_{FM} \sin^2 \theta_{FM} - J_{im} \sin \phi_{FM} \cos \theta_{FM} - HM_s \sin \phi_{FM} \cos(\beta - \theta_{FM}). \quad (1)$$

第一项是退磁能,其中 $2\pi M_s^2$ 是垂直平面的退磁常数, M_s 表示铁磁层的饱和磁化强度, K_{\perp} 为垂直

* 国家自然科学基金(批准号:10974170)和教育部留学回国人员科研启动基金(批准号:2007/1108)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: jghu@yzu.edu.cn, panjing79@126.com

于平面方向的单向各向异性常数;第二项和第三项分别表示立方磁晶各向异性和单轴磁晶各向异性, K_{\parallel} 和 K_u 分别为立方磁晶各向异性常数和单轴磁晶各向异性常数,并假定 K_u 沿着 x 方向;第四项代表交换各向异性,它源于铁磁和反铁磁界面的交换耦合作用,即反铁磁层对铁磁层的钉扎作用, $J_{\text{int}} = H_E M_s$ 是交换耦合强度, H_E 表示交换各向异性场,它依赖于铁磁薄膜厚度,并与其成反比;最后一项为铁磁层在外加磁场 H 的塞曼能.

在平衡态时,自由能最小,由于退磁各向异性的作用使系统的磁化在平面 x - y 内,即 $\phi_{\text{FM}} = 90^\circ$;而磁化角 θ_{FM} 有下列方程决定:

$$H \sin(\beta - \theta_{\text{FM}}) - H_E \sin \theta_{\text{FM}} - \frac{1}{2} H_A \sin 2\theta_{\text{FM}} - \frac{1}{4} H_{\text{Kl}} \sin 4\theta_{\text{FM}} = 0, \quad (2)$$

其中 $H_E = \frac{J_{\text{int}}}{M_s}$, $H_A = \frac{2K_u}{M_s}$, $H_{\text{Kl}} = \frac{2K_{\parallel}}{M_s}$.

铁磁共振法是获取磁系统磁晶各向异性信息的有效手段之一. 根据文献[22]得系统的铁磁共振频率为

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M^2 t_F^2 \sin^2 \theta} [E_{\theta\theta} E_{\varphi\varphi} - E_{\theta\varphi}^2], \quad (3)$$

其中 ω 是共振频率, γ 是回旋比,将方程(1)代入方程(3)得

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = & [H \cos(\beta - \theta_{\text{FM}}) + H_E \cos \theta_{\text{FM}} \\ & + H_A \cos 2\theta_{\text{FM}} + H_{\text{Kl}} \cos 4\theta_{\text{FM}}] \\ & \times \left[H \cos(\beta - \theta_{\text{FM}}) - H_{\text{uef}} + H_E \cos \theta_{\text{FM}} \right. \\ & \left. - H_A \sin^2 \theta_{\text{FM}} + H_{\text{Kl}} \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{\text{FM}}\right) \right], \quad (4) \end{aligned}$$

其中, $H_{\text{uef}} = \frac{2(K_{\perp} - 2\pi M_s^2)}{M_s}$. 由(4)式可讨论铁磁/反铁磁双层膜中的磁共振行为特征.

3. 分析和讨论

由方程(4)我们可以分析该体系的铁磁共振频率与外加磁场 H 、立方各向异性、界面交换耦合(单向各向异性)以及单轴各向异性等的依赖关系. 本文着重讨论了立方各向异性、单向各向异性和外加磁场方向对铁磁/反铁磁双层膜系统的铁磁共振频率动态行为的影响.

图1描述了磁共振频率随外加磁场方向变化的关

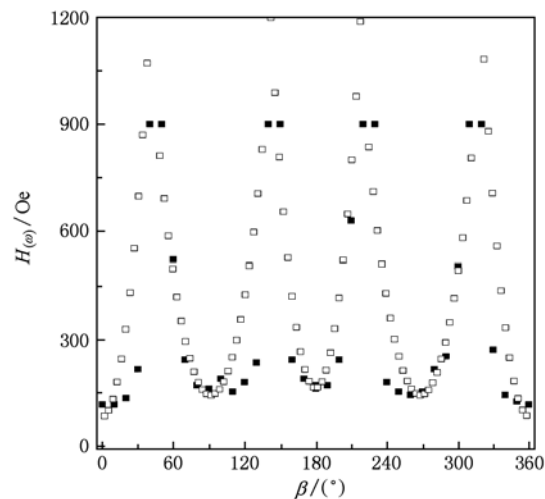


图1 铁磁共振场和外磁场方向的关系(其中: $H_E = -0.01 \text{ kOe}$, $H_{\text{Kl}} = 0.56 \text{ kOe}$, $H_A = 0.0 \text{ kOe}$, $H_{\text{uef}} = -65.0 \text{ kOe}$ ($1 \text{ Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$))

系. 其中,图中实心符号表示实验观测的结果,空心符号表示理论计算的结果,本文其他图中的符号标志情况与之相同. 图1显示,当相关参数 $H_E = -0.01 \text{ kOe}$, $H_{\text{Kl}} = 0.56 \text{ kOe}$, $H_A = 0.0 \text{ kOe}$ 和 $H_{\text{uef}} = -65.0 \text{ kOe}$ 时,我们的理论结果同实验很好地符合[22]. 在本文的讨论中,这些参数值是相关参数选取的基本量. 图1中磁共振场峰值和谷值所在方向分别对应着立方磁晶各向异性的难轴和易轴方向. 但各处的峰值和谷值并不相等,即在易轴、难轴方向上出现了明显的不对称,如易轴 $\beta = 180^\circ$ 方向比 $\beta = 0^\circ$ 方向更易磁化,而难轴方向 $\beta = 225^\circ$ 方向比 $\beta = 45^\circ$ 方向易磁化. 这种不对称性称为单向磁晶各向异性,它缘于铁磁/反铁磁界面交换耦合. 其中 $\beta = 180^\circ$ 方向比 $\beta = 0^\circ$ 方向易磁化,表现在实验上可观察到负交换偏置现象. 反之,如 $\beta = 0^\circ$ 比 $\beta = 180^\circ$ 易磁化,可表现在实验上观察到正交换偏置现象.

为了进一步了解外加磁场对系统磁化性质的影响,我们计算了其磁化方向随外加磁场方向变化的情况. 图2中表明磁化角度随着外加磁场角度的变化成阶梯型式跳跃,并且每一个阶梯随着外加磁场角度的增加都有线性的缓慢增加,这种现象源于外加磁场和磁晶各向异性竞争的结果. 当外场比较小而各向异性比较大时,各向异性的作用占优,磁化方向在磁易轴周围,随着外加磁场角度的增加,磁化成阶梯跳跃的不可逆过程;但在每个阶梯过程中磁化随外加磁场角度的增加呈缓慢的可逆增加过程. 其台阶数取

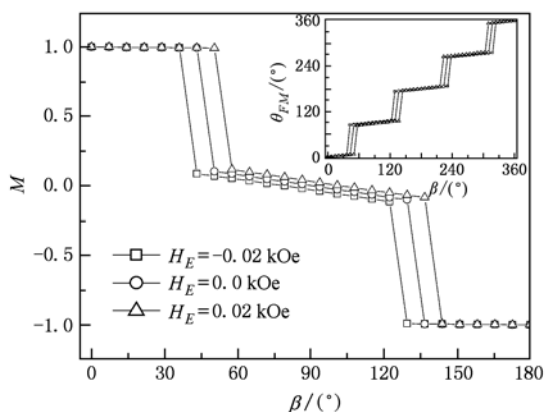


图2 铁磁层磁化强度及磁化方向(见插图)随外磁场方向变化的关系(其中, $H_E = -0.01$ kOe, $H_{K1} = 0.56$ kOe, $H_A = 0.0$ kOe, $H_{\text{eff}} = -65.0$ kOe, $H = 0.1$ kOe)

决于磁晶各向异性. 进一步的研究可以发现, 对立方磁晶各向异性系统, 如果系统没有单向各向异性 H_E , 系统的磁化在 $\beta = 45^\circ$ 时跳跃到下一台阶, 此时实验上观察不到交换偏置现象; 当系统有单向各向异性 H_E 并为正值时, 系统磁化将在 $\beta > 45^\circ$ 时跳跃到下一台阶, 表现在实验上可观察到正交换偏置现象; 而当系统磁化在 $\beta < 45^\circ$ 时就跳跃到下一台阶, 则表现为在实验上可观察到负交换偏置现象.

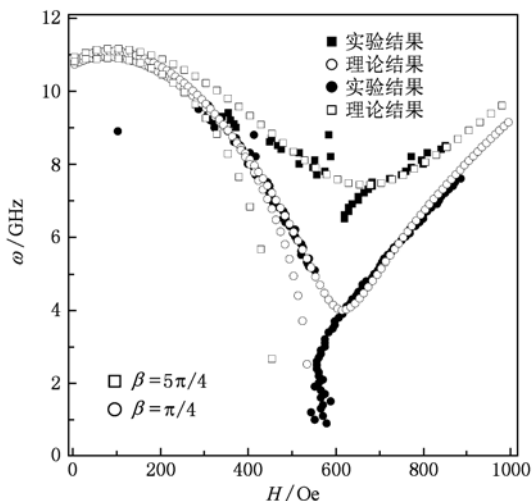


图3 不同外磁场角度下系统铁磁共振频率随外磁场变化的关系(其中, $H_E = -0.01$ kOe, $H_{K1} = 0.56$ kOe, $H_A = 0.0$ kOe, $H_{\text{eff}} = -65.0$ kOe)

图3 讨论了外磁场沿难轴 $\beta = \frac{\pi}{4}$, $\beta = \frac{5\pi}{4}$ 方向时, 共振频率随外磁场 H 大小变化的情况. 理论结果表明: 铁磁/反铁磁双层膜系统的铁磁共振行为

随外磁场的变化可分为两类. 第一类行为在外磁场下都存在磁共振现象; 第二类行为铁磁共振现象仅在低磁场区, 在强外磁场区磁共振现象消失. 将共振频率极小处所对应的外磁场作为区分强场和弱场的临界场 H_{crit} . 结果发现: 在小于临界场的弱外磁场下, 铁磁共振模式存在两类, 两类共振频率都随外磁场的增大而非单调性减小; 在大于临界场的强场下, 铁磁共振模式只有第一类, 其共振频率随外磁场的增大呈单调非线性增大. 有趣的是, 相同大小的外加磁场沿难轴不同方向所激发的铁磁共振频率不同, 这也很好地符合我们的实验结果^[22]. 进一步地研究表明: 其差异缘于铁磁/反铁磁交换耦合作用而诱发的单向各向异性, 对负交换偏置场, 沿 $\frac{5\pi}{4}$ 方向的铁磁共振频率高于沿 $\frac{\pi}{4}$ 方向的; 反之, 对正交换偏置场, 沿 $\frac{\pi}{4}$ 方向的铁磁共振频率高于沿 $\frac{5\pi}{4}$ 方向的.

为了进一步考察铁磁共振模式分为两类的原由, 我们研究了铁磁层磁化角度 θ_{FM} 、铁磁层磁化强度以及系统铁磁共振频率随外加磁场的变化关系. 图4(a), (b) 是无单向各向异性场 H_E 的情况, 图4(c), (d) 为有 H_E 的情况. 图4(a)和4(c)表明: 随着外磁场的增加, 在外磁场方向上的磁化几乎成线性增加, 直至饱和(图4中的插图所示). 其磁化方向 θ_{FM} , 随着外磁场的增加分别从 $\theta_{\text{FM}} = 0^\circ$ 和 $\theta_{\text{FM}} = 90^\circ$ 最终将趋于外磁场方向. 应当指出由于铁磁层具有立方各向异性, 所以 $\theta_{\text{FM}} = 0^\circ$ 和 $\theta_{\text{FM}} = 90^\circ$ 都是铁磁层磁化的平衡态. 相应的铁磁共振行为分为两类, 其原因在于铁磁层具有立方各向异性, 但其两类行为在单向各向异性的作用下, 其差异变得明显. 同时, 铁磁共振行为如图4(b)和(d)所示又分为两支, 即弱磁场支与强弱磁场支. 比较图4可以发现: 区分强、弱磁场支的临界场为铁磁层磁化刚达到饱和时的外加磁场. 非常有意义的是图4(c)中, 磁化方向 $\theta_{\text{FM}} = 0^\circ$ 的一类, 随外磁场的增加在靠近临界场处, 不再连续地趋于外磁场方向, 出现了跳跃现象, 这源于交换单向各向异性的作用. 进一步的分析发现: 若在磁化方向 $\theta_{\text{FM}} = 0^\circ$ 的一类有跳跃现象, 表现为系统具有负交换偏置场; 反之, 若在磁化方向 $\theta_{\text{FM}} = 90^\circ$ 的一类有跳跃现象, 表现为系统具有正交换偏置场.

图5 描述的是外磁场方向沿难轴方向 $\beta = \frac{\pi}{4}$

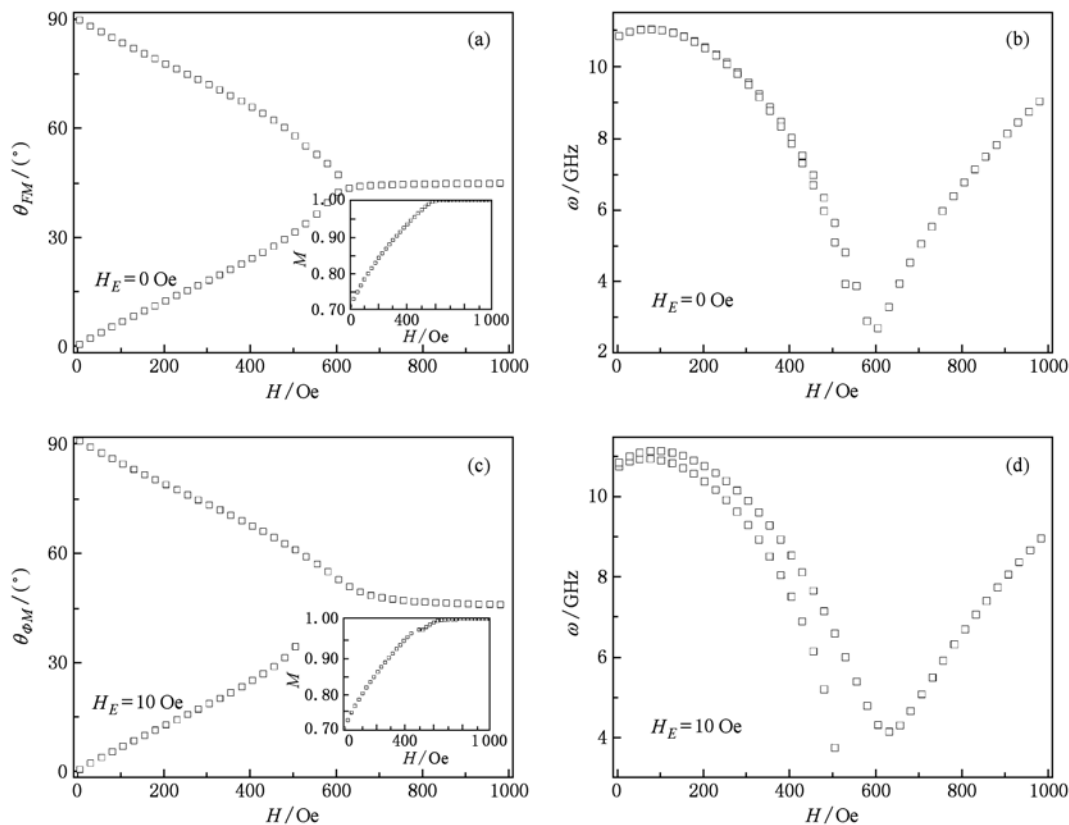


图4 铁磁层磁化角度 θ (插图为磁化强度)、系统铁磁共振频率随外磁场大小的变化的关系 (a),(b)不存在交换各向异性;(c),(d)存在交换各向异性,且 $\beta = \pi/4, H_{K1} = 0.56$ kOe, $H_A = 0.0$ kOe, $H_{\text{eff}} = -65.0$ kOe

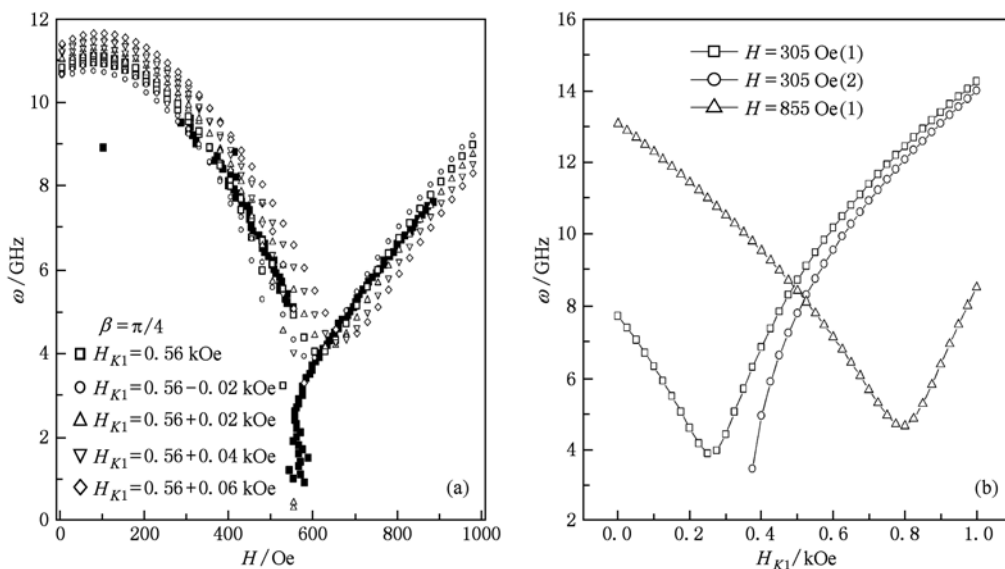


图5 (a)不同立方各向异性下系统铁磁共振频率随外场变化的关系;(b)磁共振频率随立方各向异性的变化关系 (其中, $H_E = -0.01$ kOe, $H_A = 0.0$ kOe, $H_{\text{eff}} = -65.0$ kOe)

时,不同立方各向异性场下,共振频率随外磁场变化的关系. 结果显示:总存在第一类磁共振模式的

激发,并且其磁共振的强、弱场两支的共振频率随立方各向异性场的增加均呈现先减小后增加的非

单调行为. 第二类磁共振模式仅在较大的立方各向异性场下得以激发, 其共振频率随立方各向异性场的增加单调地增加. 这进一步表明磁共振频率模式分为两类的缘由于立方各向异性场.

图 6 描述的是外磁场方向沿难轴方向, 即 $\beta = \frac{\pi}{4}$ 时, 在不同交换各向异性场下, 共振频率随外磁

场变化的关系. 结果显示: 对第一类磁共振模式, 其强、弱场支的共振频率均随交换偏置场大小的增加先单调减小后单调增加; 而第二类磁共振模式, 其相应的共振频率随交换偏置场变化的行为均同第一类的相反, 即随交换偏置场大小的增加其共振频率先单调增加后单调减小.

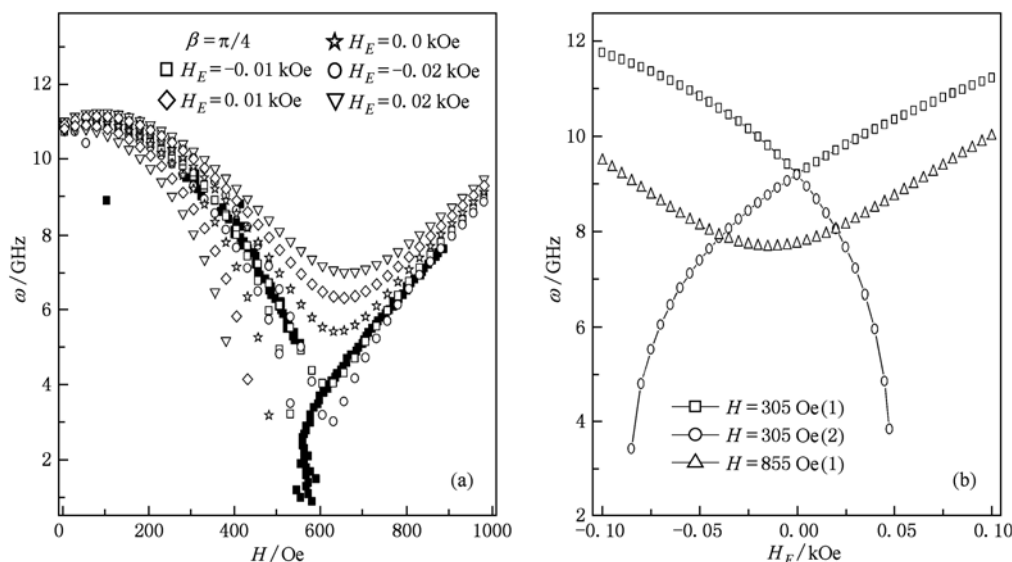


图 6 (a) 不同交换各向异性下系统共振频率随外场变化的关系; (b) 共振频率随交换各向异性的变化关系 (其中, $H_{K1} = 0.56$ kOe, $H_A = 0.0$ kOe, $H_{\text{eff}} = -65.0$ kOe)

4. 结 论

基于 Smith 和 Beljers 理论, 推导出了铁磁反铁磁双层膜系统共振频率的表达式, 讨论了铁磁/反铁磁双层膜的铁磁共振行为特征. 结果表明: 源于铁磁/反铁磁之间的交换耦合而诱发的单向各向异性场, 即交换偏置场, 在共振谱中得到了解析. 表现在铁磁共振场中同一各向异性轴的两方向上共振频率有差异, 如 0° 方向的频率低于 180° 方向的频率时, 交换偏置场为负, 反之, 交换偏置场为正. 另一方面, 通过检测磁化角度和外磁场方向的关系也可以分辨有无交换偏置场以及其正负特征. 存在立方各向异性时, 系统的磁化如果在外磁场小于 45° 时就跳跃到下一台阶, 系统存在负交换偏置场, 反之,

如果在外磁场大于 45° 时才跳跃到下一台阶, 系统存在正交换偏置场. 结果还发现: 铁磁/反铁磁双层膜系统的铁磁共振行为随外磁场的变化可分为两类. 第一类行为在外磁场下都存在磁共振现象, 其具体特征: 铁磁共振行为随外磁场的变化可分为两支, 其区分两支的外磁场称为临界场, 在小于临界场时磁共振频率随外磁场的增加非单调性减小; 在大于临界场时磁共振频率随外磁场的增加单调性增加. 第二类行为铁磁共振频率随外磁场强度的增加非单调性减少, 但外磁场强度达一定强度后磁共振现象消失. 进一步的研究表明: 铁磁共振行为随外磁场的变化分为两类的行为因系统存在单向各向异性而变得明显. 结果还显示: 磁共振频率随着立方各向异性场, 单向各向异性场等的增加都呈非单调型非线性变化.

[1] Meiklejohn W H, Bean C P 1956 *Phys. Rev.* **102** 1413

[2] Meiklejohn W H, Bean C P 1957 *Phys. Rev.* **105** 904

- [3] Stamps R L 2000 *J. Phys.* D **33** R247
- [4] Pan J, Tao Y C, Hu J G 2006 *Aata. Phys. Sin.* **55** 3032 (in Chinese) [潘靖、陶永春、胡经国 2006 物理学报 **55** 3032]
- [5] Dieny B 1994 *J. Magn. Magn. Mater* **136** 335
- [6] Heim D E, Fontana Jr R E, Tsang C 1994 *IEEE Trans. Magn.* **30** 316
- [7] Daughton J M, Chen Y J 1993 *IEEE Trans. Magn.* **29** 2705
- [8] Noguès J, Schuller I K 1999 *J. Magn. Magn. Mater* **192** 203
- [9] Xi H, White R M 2000 *Phys. Rev. B* **61** 80
- [10] McMichael R D, Stiles M D, Chen P J, Egelhoff W F 1998 *Phys. Rev. B* **58** 8605
- [11] Mathieu C, Bauer M, Hillebrands B, Fassbender J, Guntherodt G, Jungblut R, Kohlhepp J, Reinders A, 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 2863
- [12] Miltenyi P, Gruyters M, Guntherodt G, Noguès J, Schuller I K 1999 *Phys. Rev. B* **59** 3333
- [13] Xi H, White R M, Rezende S M 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 4960
- [14] Wee L, Stamps R L, Malkinski L, Celinski Z 2004 *Phys. Rev. B* **69** 134426
- [15] Pechan M J, Bennett D, Teng N, Leighton C, Noguès J, Schuller I K 2002 *Phys. Rev. B* **65** 064410
- [16] Layadi A 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 1429
- [17] Pan J, Zhou L, Tao Y C, Hu J G 2007 *Aata. Phys. Sin.* **56** 3521 (in Chinese) [潘靖、周岚、陶永春、胡经国 2007 物理学报 **56** 3521]
- [18] Pan J, Zhou L, Hu J G 2009 *Aata. Phys. Sin.* **58** 6487 (in Chinese) [潘靖、周岚、胡经国 2009 物理学报 **58** 6487]
- [19] Hu J G, Jin G J, Ma Y Q 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 2180
- [20] Smit J, Beljers H G 1955 *Philips Res. Rep.* **10** 113
- [21] Morrish A H 1980 *The Physical Principles of Magnetism* (New York:Krieger)
- [22] Kennewell K J, Ji X, Hu J G, Krishnan K M, Stamps R L 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 09E518

Measurement of magnetic anisotropy by ferromagnetic resonance*

Gu Wen-Juan Pan Jing Du Wei Hu Jing-Guo[†]

(College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

(Received 23 August 2010; revised manuscript received 3 September 2010)

Abstract

The effective magnetic field caused by exchange coupling between a ferromagnetic and an antiferromagnetic bilayer and its magnetic anisotropy have been investigated by means of ferromagnetic resonance. It was shown that the exchange bias phenomenon occurrence and its positive or negative characteristic for ferromagnetic/antiferromagnetic bilayer can be identified from its magnetic resonance spectrum. In addition, when the field was applied along different crystalline directions, the behavior of magnetic resonance field will be changed, and is closely dependent on the magnetocrystalline anisotropy and unidirectional anisotropy induced by the interface coupling in ferromagnetic/antiferromagnetic bilayer. Anomalies in the ferromagnetic resonance frequency studied as functions of applied field, including its orientation and strength, are interpreted as evidence for the four fold anisotropy and unidirectional anisotropy. Our conclusions are in good agreement with the related experiments.

Keywords: ferromagnetic/antiferromagnetic bilayer, exchange coupling, ferromagnetic resonance, unidirectional anisotropy

PACS: 76.50.+g, 76.30.er, 75.30.Gw

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974170) and the Scientific Research Launching Foundation of Ministry of Education for Returned Overseas Scholar (Grant No. 2007/1108).

[†] Corresponding author. E-mail: jghu@yzu.edu.cn, panjing79@126.com