

垂直场下磁性薄膜中的铁磁共振现象*

顾文娟 潘靖 胡经国†

(扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2011年10月26日收到; 2012年2月13日收到修改稿)

将铁磁共振频率看成外磁场的函数, 讨论了垂直场下磁性膜中的铁磁共振现象. 结果显示: 当外磁场平行于膜面, 并考虑磁膜具有垂直磁晶各向异性情形时, 其磁共振频率随外磁场的变化分为高频支和低频支两种情况, 具体的依赖关系取决于磁膜内磁晶的各向异性; 当外磁场垂直于膜面, 其磁共振频率随外磁场的关系仅存在一支, 一般地, 磁共振频率随外磁场的增加单调地非线性减小, 但当立方磁晶各向异性场 H_{k1} 与单轴磁晶各向异性场 H_a 之比值介于 $2/3 < |H_{k1}/H_a| < 1$ 时, 其磁共振频率随外磁场的增加单调增加, 这与相关的实验结果一致. 研究结果表明: 磁薄膜中有无垂直于膜面的磁各向异性可以通过其磁共振谱的测量进行辨析.

关键词: 铁磁共振, 高频支, 低频支

PACS: 75.30.GW, 76.20.+q, 76.50.+g

1 引言

人类社会步入信息化时代后, 信息量的快速增长要求信息存储密度迅速提高. 目前的主流信息存储方式包括磁记录技术以及光存储等, 其中磁记录技术受到广泛关注^[1]. 磁记录技术的发展也经历了从纵向到垂直磁记录的转变, 即磁化强度分别平行和垂直于介质平面^[2]. 垂直磁记录的出现与发展源于传统的纵向记录介质面临诸多挑战, 如硬盘面记录密度的进一步提高, 要求单个记录位的面积进一步减小, 而随着其尺寸的进一步减小, 热扰动的影响显得尤为重要, 材料的剩磁比会大幅下降直至为零, 出现超顺磁现象. 因此, 当前硬盘存储数据主要采用的是垂直磁记录方式, 同时被誉为“打开 Tbit 级别存储大门的钥匙”, 在工业界受到了广泛的关注. 在实验和理论上, 研究人员对垂直磁记录材料已进行了大量研究, 并取得了不少的成果^[3-11].

铁磁共振法是研究磁性薄膜物理性质的基本方法之一, 是获得磁弛豫以及磁膜中磁化分布的重要手段^[12-14]. 因此, 研究磁性薄膜中的铁磁共振现象与其磁化参量(如磁晶各向异性、外磁场等)之间的关系显得非常有意义^[15-25]. 特别是研究垂

直场下磁性薄膜中的铁磁共振现象的特征, 能为垂直磁记录材料的研究在实验和应用中提供理论指导.

本文模型中, 铁磁层具有单轴磁晶各向异性、立方磁晶各向异性和垂直磁晶各向异性, 基于 Smith 和 Beljers 理论^[24,25] 推导了其磁共振频率的解析表达式, 研究了铁磁单层膜系统的铁磁共振现象. 着重讨论了垂直场下磁晶立方各向异性、垂直各向异性、面内单轴各向异性等对其铁磁共振频率的影响.

2 模型及解析结果

对铁磁单层膜, 定义膜面为 $x-y$ 平面, z 轴垂直于膜面. 采用球坐标系, 其中 θ, ϕ 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. 本文首先讨论外磁场 H 沿着 z 轴方向的情况, 即外磁场垂直于膜面的情形, 其铁磁单层膜单位面积上的总能量可以写为

$$E = (-2\pi M_s^2 + K_{\perp}) \sin^2 \theta + \frac{K_{\parallel}}{4} (\sin^2 2\theta + \sin^4 \theta \sin^2 2\phi)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 10974170)和国家自然科学基金青年基金(批准号: 11104239)资助的课题.

† E-mail: jghu@yzu.edu.cn

$$+ K_u \sin^2 \theta \sin^2 \phi - HM_s \cos \theta, \quad (1)$$

第一项是退磁能与垂直各向异性性能, 其中 $4\pi M_s^2$ 是垂直膜面的退磁常数, M_s 表示铁磁层的饱和磁化强度, K_{\perp} 为垂直于膜面方向各向异性常数; 第二项和第三项分别表示立方磁晶各向异性性能和面内单轴磁各向异性性能, K_{\parallel} 和 K_u 分别为立方磁晶各向异性常数和面内单轴磁各向异性常数; 最后一项为铁磁层在外加磁场 H 下的塞曼能.

根据平衡方程 $\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial E}{\partial \phi} = 0$, 得到其平衡态下的磁化状态 θ 与 ϕ 分别由下列方程决定:

$$\frac{H_{\text{uef}}}{2} \sin 2\theta + \frac{H_{k1}}{4} (\sin 4\theta + 4 \sin^3 \theta \sin^2 2\phi) + \frac{H_a}{2} \sin 2\theta \sin^2 \phi + H \sin \theta = 0, \quad (2)$$

$$\frac{H_{k1}}{4} \sin^4 \theta \sin 4\phi + \frac{H_a}{2} \sin^2 \theta \sin 2\phi = 0. \quad (3)$$

由 (3) 式可得 $\phi = \frac{\pi}{2}$ 是一个具有物理意义的解; 而决定磁化角 θ 的 (2) 式可化简为

$$H_{\text{uef}} \cos \theta + H_{k1} \cos 2\theta \cos \theta + H_a \cos \theta + H = 0. \quad (4)$$

根据文献 [26], 其系统的铁磁共振频率为

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M_s^2 t_F^2 \sin^2 \theta} [E_{\theta\theta} E_{\phi\phi} - E_{\theta\phi}^2], \quad (5)$$

其中 ω 是共振频率, γ 是回旋比. 将方程 (1) 代入方程 (5) 得

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = (H_{\text{uef}} \cos 2\theta + H_{k1} \cos 4\theta + H_a \cos 2\theta + H \cos \theta) \times (H_{k1} \sin^2 \theta - H_a), \quad (6)$$

其中 $H_{\text{uef}} = -4\pi M_s + \frac{2K_{\perp}}{M_s}$, $H_a = \frac{2K_u}{M_s}$, $H_{k1} = \frac{2K_{\parallel}}{M_s}$.

其次, 讨论外磁场 H 在膜面内沿着 y 轴方向, 垂直于单轴各向异性, 并考虑磁膜具有垂直磁晶各向异性情况, 则铁磁单层膜单位面积上的总能量可写为

$$E = (K_{\perp} - 2\pi M_s^2) \sin^2 \theta + \frac{K_{\parallel}}{4} (\sin^2 2\theta + \sin^4 \sin^2 \phi) + K_u \sin^2 \theta \sin^2 \phi - HM_s \sin \theta \sin \phi, \quad (7)$$

第一项是垂直各向异性性能与退磁能, 其中 K_{\perp} 为垂直于膜面方向各向异性常数, $4\pi M_s^2$ 是垂直膜面的退磁常数, M_s 表示铁磁层的饱和磁化强度; 第二项和第三项分别表示立方磁晶各向异性性能和面内单轴磁各向异性性能, K_{\parallel} 和 K_u 分别为立方磁晶各向异性常数和面内单轴磁各向异性常数; 最后一项

为塞曼能. 根据平衡方程, 即 $\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial E}{\partial \phi} = 0$, 发现 $\phi = \frac{\pi}{2}$ 是这个方程的解; 而磁化角 θ 由下式决定:

$$H_{\perp} \sin \theta + H_{k1} \cos 2\theta \sin \theta + H_a \sin \theta - H = 0, \quad (8)$$

其中 $H_{\perp} = \frac{2K_{\perp}}{M_s} - 4\pi M_s$.

将方程 (7) 代入方程 (5) 得

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = (H_{\perp} \cos \theta + H_{k1} \cos 4\theta + H_a \cos 2\theta + H \sin \theta) (H_{k1} \sin^2 \theta - H_a + H \sin \theta). \quad (9)$$

由 (6) 和 (9) 式可讨论上述两种情形下的铁磁共振行为特征.

3 分析和讨论

由 (6) 和 (9) 式可以分析上述两种情形下铁磁共振频率与系统磁化参数的依赖关系, 着重讨论垂直各向异性、立方各向异性、单轴各向异性和外磁场对铁磁单层膜系统铁磁共振频率动态行为的影响.

首先讨论第一种情形, 即外磁场垂直于膜面情形下铁磁共振频率的行为特征. 本文中, 当立方各向异性场为负值时, 表明立方各向异性轴沿 $\langle 100 \rangle$ 方向; 反之, 立方各向异性场为正值时, 立方各向异性轴沿 $\langle 111 \rangle$ 方向.

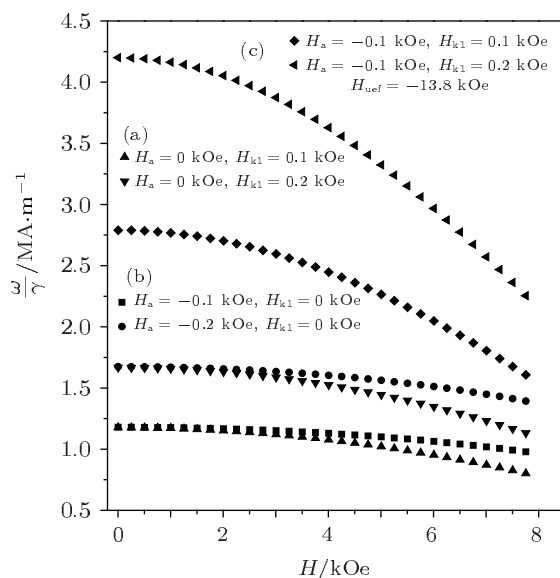


图1 具有不同磁各向异性的磁性单层膜系统中磁共振频率与外磁场的关系

图 1 显示具有 $\langle 100 \rangle$ 方向立方各向异性、面内单轴各向异性等的铁磁薄膜中, 其磁共振频率随垂直于膜面外磁场的变化关系. 曲线 (a) 仅存在沿着 y 轴方向的单轴各向异性, 曲线 (b) 仅存在 $\langle 100 \rangle$ 方向的立方各向异性, 曲线 (c) 同时存在 $\langle 100 \rangle$ 方向的立方各向异性和沿 y 轴方向单轴各向异性. 结果显示: 三种情况下其共振频率都随外磁场的增加均单调地非线性减小. 进一步研究发现: 对前两种情形, 其共振频率都随外磁场的增加总是单调地非线性减小, 其共振频率随各向异性的增强而增加; 但对第 3 种情形, 其共振频率随外磁场的变化依赖于立

方各向异性与单轴各向异性之比, 如图 2 所示.

图 2 给出了具有不同面内单轴各向异性和 $\langle 111 \rangle$ 方向立方各向异性的磁性单层膜系统中磁共振频率与外磁场的关系. 结果显示, 当立方磁晶各向异性场 H_{k1} 与单轴磁晶各向异性场 H_a 之比值近似在 $2/3 < |H_{k1}/H_a| < 1$ 时, 铁磁共振频率随外磁场增加而单调增加, 这与相关的实验结果一致 [26]; 当 $5/9 < |H_{k1}/H_a| < 2/3$ 时, 共振频率随外磁场增加出现先单调增加后单调减小的趋势, 若比值再减小则磁共振频率随外磁场的增加而单调减小; 但 $|H_{k1}/H_a| > 1$ 时, 只出现磁共振吸收.

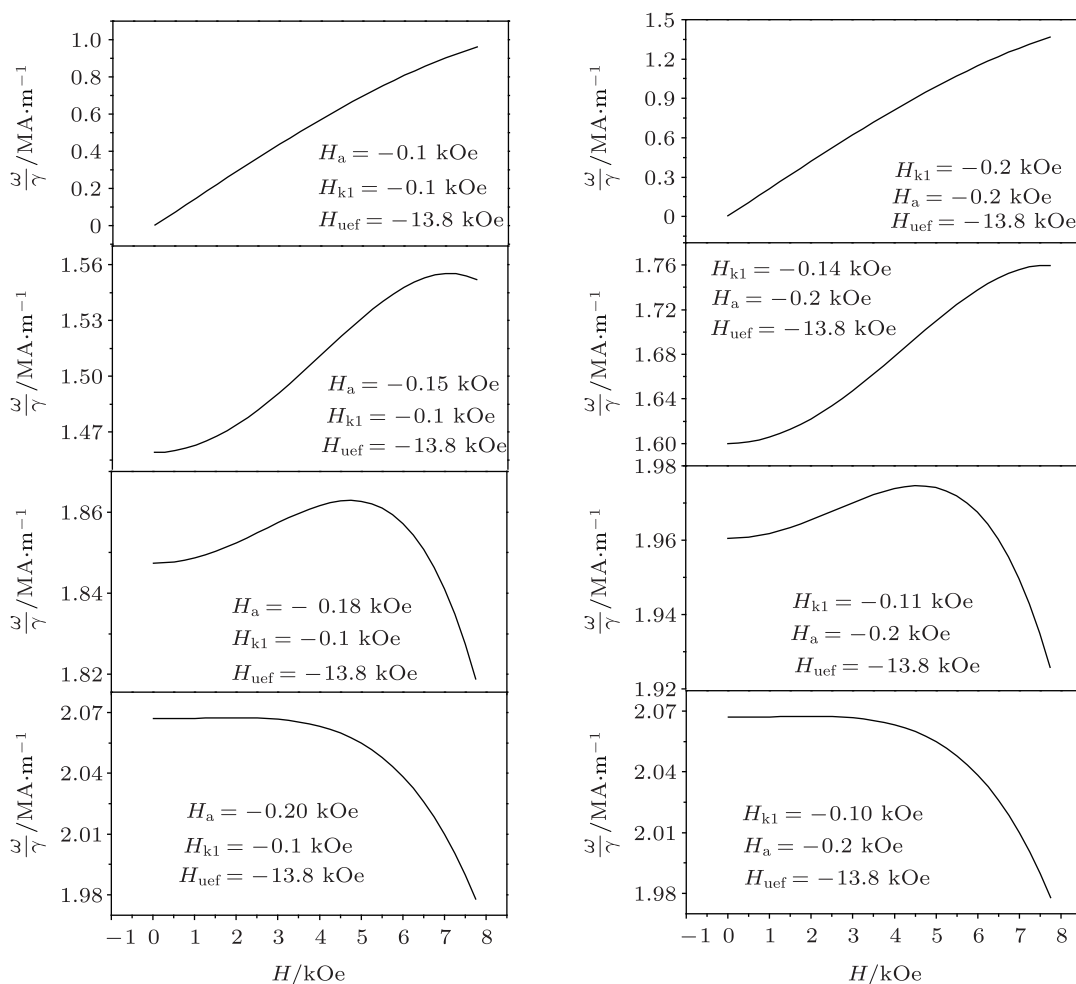


图 2 具有不同面内单轴各向异性和 $\langle 111 \rangle$ 方向立方各向异性的磁性单层膜系统中磁共振频率与外磁场的关系

为便于比较, 本文还讨论了当外磁场在膜面内且垂直于单轴各向异性, 并考虑磁性膜具有垂直磁晶各向异性时, 系统的磁共振频率随外磁场的变化情况.

图 3(a) 显示具有不同垂直各向异性的铁磁型薄膜中, 铁磁共振频率随膜面内外磁场的变化关系.

结果发现: 垂直各向异性对系统铁磁共振频率的影响与外磁场垂直膜面的情况有明显的不同. 由于垂直单轴各向异性场的作用, 系统中共振频率随膜面内外磁场的变化分为两支, 即高频支和低频支, 其高频支随外磁场的增加缓慢增加, 而低频支随外磁场的增加快速增加, 并且高频支总是存在, 而低频

支的存在依赖于垂直各向异性的大小. 垂直各向异性场较小或较大时, 铁磁共振仅存在高频支, 反之, 铁磁共振分为高频支和低频支两种情况. 进一步研究表明, 系统中磁共振出现高频支与低频支的原因是系统在该情况下其自旋磁化存在两种稳定状态, 如图 3(b) 所示. 其中, 相对比较稳定的磁状态激发了高频支, 而另一亚稳定的磁状态激发了低频支.

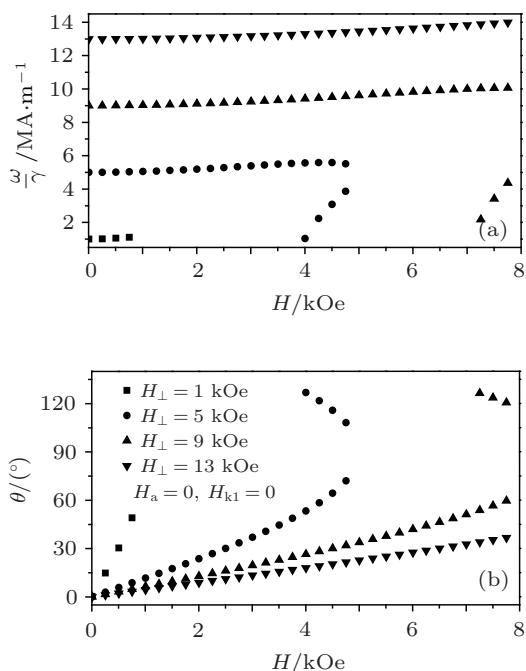


图 3 垂直各向异性对系统铁磁共振频率及磁化性质的影响 (a) 铁磁共振频率; (b) 磁化性质

为便于比较, 本文还讨论了面内各向异性对系统磁共振频率及磁化性质的影响, 如图 4 和图 5 所示.

图 4 为面内单轴各向异性对系统磁共振频率及磁化性质的影响. 图 4(a) 表明, 当垂直各向异性占优势时, 随着面内单轴各向异性场的增加磁共振频率曲线出现两支, 即高频支与低频支, 并且铁磁共振频率的两支都随外磁场单调增加. 其中, 高频支随面内单轴各向异性场的增加缓慢增加, 而低频支增加显著. 但当面内单轴各向异性占优势时, 表现出的磁共振频率的特征与文献 [18, 22] 的研究结果一致. 图 4(b) 表明系统中磁共振出现高频支与低频支的行为依赖于其自旋磁化状态.

图 5 显示了面内立方各向异性对系统铁磁共振频率及其磁化性质的影响. 结果发现: 当垂直各向异性占优势时, 立方各向异性对铁磁共振频率的影响与面内单轴各向异性的相似, 但较图 4 的变化

趋势明显. 并且高频支在外磁场较小时, 随着立方各向异性场的增加, 铁磁共振频率显著减小; 而在较大外磁场下, 其铁磁共振频率趋于相同. 图 5(b) 为其相应系统的磁化行为.

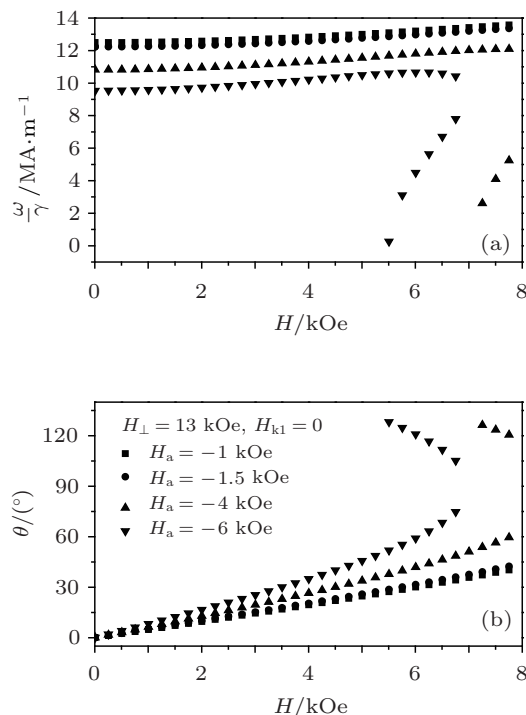


图 4 面内单轴各向异性对系统铁磁共振频率及磁化性质的影响 (a) 铁磁共振频率; (b) 磁化性质

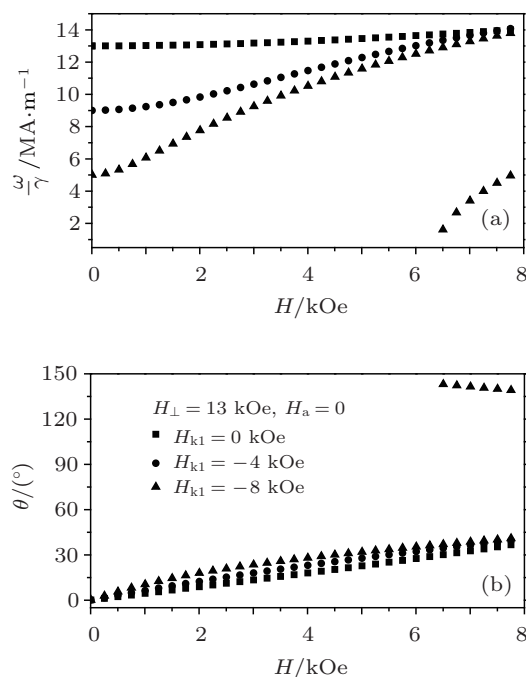


图 5 面内立方各向异性对系统铁磁共振频率及磁化性质的影响 (a) 铁磁共振频率; (b) 磁化性质

4 结论

基于 Smith 和 Beljers 理论, 讨论了垂直场下铁磁单层膜的铁磁共振行为特征, 并推导出铁磁单层膜系统磁共振的解析式. 结果显示: 对外磁场垂直于膜面的情形, 其磁共振频率随外磁场的关系仅存在一支情况. 具体地, 当系统仅具有单轴磁晶各向异性或立方磁晶各向异性的情形时, 其共振频率都随外磁场的增加总是单调地非线性减小, 共振频率随各向异性的增强而增加, 但当系统同时具有单轴各向异性和立方各向异性时, 其共振频率随外磁场的变化依赖于立方各向异性与单轴各向异性之比, 即在立方各向异性场和单轴各向异性的场的比值近似介于 $2/3$ — 1 时, 系统中的磁共振频率随外磁场的增加单调增加; 在其比值近似为 $5/9$ — $2/3$ 时, 其

共振频率随外磁场的增加出现了先单调增加后单调减小; 而其他情况下, 系统中的磁共振频率都随外磁场的增加单调地非线性减小, 但其磁共振频率都随各向异性场的增加单调增加. 当外磁场在膜面内且垂直于单轴各向异性, 考虑磁性膜具有垂直磁晶各向异性情形时, 其磁共振频率随外磁场的变化是非单调性的, 并且分高频支和低频支两种情况. 其中, 各向异性场变化时, 高频支一直存在, 而低频支的存在由各向异性场与外磁场共同决定. 为了进一步考察磁共振模式出现两支的物理机理, 本文还研究了系统的磁化行为, 发现其磁共振行为分为高频支和低频支的根源在于系统磁化角度随外磁场的变化分为两支. 磁各向异性对磁共振行为的不同影响表明, 磁薄膜中有无垂直于膜面的磁各向异性可以通过其磁共振谱的测量得以辨析.

- [1] Johnson K E 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 5365
- [2] Iwasaki S, Takemura K 1975 *IEEE Trans. Magn.* **11** 1173
- [3] Suzuki T, Zhang Z G, Singh A K 2005 *IEEE Trans. Magn.* **41** 555
- [4] Nakagawa H, Nemoto H, Honda Y, Ichihara T, Tanahashi K, Hosoe Y 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 8016
- [5] Victora R H, Shen X 2005 *IEEE Trans. Magn.* **41** 537
- [6] Suess D, Schrefl T, Dittrich R, Kirschner M, Dorfbauer F, Hrkac G, Fidler J 2005 *J. Magn. Magn. Mater.* **290** 551
- [7] Dobin A Y, Richter H J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 062512
- [8] Choi Y, Jiang J S, Pearson J E, Bader S D, Kavich J J, Freeland J W, Liu J P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 072509
- [9] Goll D, Breitling A, Gu L, Aken P A, Sigle W 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 083903
- [10] Goll D, Breitling A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 052502
- [11] Hu J F, Chen J S, Ding Y, Lim F B C, Phyoe W L, Liu B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 072504
- [12] Xiong C M, Sun J R, Wang D J, Liu G J, Zhang H W, Shen B G 2005 *Chin. Phys.* **14** 604
- [13] Layadi A 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 1429
- [14] Pan J, Ma M, Zhou L, Hu J G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 897 (in Chinese) [潘靖, 马梅, 周兰, 胡经国 2006 物理学报 **55** 897]
- [15] Pan J, Tao Y C, Hu J G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3032 (in Chinese) [潘靖, 陶永春, 胡经国 2006 物理学报 **55** 3032]
- [16] Pan J, Zhou L, Tao Y C, Hu J G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3521 (in Chinese) [潘靖, 周岚, 陶永春, 胡经国 2007 物理学报 **56** 3521]
- [17] Pan J, Zhou L, Hu J G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6487 (in Chinese) [潘靖, 周岚, 胡经国 2009 物理学报 **58** 6487]
- [18] Gu W J, Pan J, Du W, Hu J G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 7601 (in Chinese) [顾文娟, 潘靖, 杜薇, 胡经国 2011 物理学报 **60** 7601]
- [19] Hu J G, Jin G J, Stamps R L, Ma Y Q 2006 *J. Magn. Magn. Mater.* **301** 238
- [20] Hu J G, Jin G J, Hu A, Ma Y Q 2004 *Eur. Phys. J. B* **40** 265
- [21] Pan J, Tao Y C, Zhou L, Hu J G 2007 *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** 6613
- [22] Pan J, Hu J G 2006 *Phys. Lett. A* **358** 236
- [23] Hu J G, Stamps R L 2006 *Chin. Phys.* **15** 1595
- [24] Smit J, Beljers H G 1955 *Philips Res. Rep.* **10** 113
- [25] Morrish A H 1980 *The Physical Principles of Magnetism* (New York: Krieger)
- [26] Yi M, Chen Z F, Chen D X, Sukegawa H, Inomata K, Lai T S, Zhou S M 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 067501

Ferromagnetic resonance phenomenon of magnetic thin film under a perpendicular field*

Gu Wen-Juan Pan Jing Hu Jing-Guo[†]

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

(Received 26 October 2011; revised manuscript received 13 February 2012)

Abstract

Regarding ferromagnetic resonance frequency as a function of the perpendicular external magnetic field, the ferromagnetic resonance phenomenon is investigated. The results show that for the case where the external magnetic field is parallel to the its plane and the magnetic thin film has a perpendicular uniaxial magnetocrystalline anisotropy, magnetic resonance frequency is divided into two categories, i.e., low frequency branch and high frequency branch, their specific relation depends on the magnetic anisotropy of the magnetic film; when external magnetic field is perpendicular to the systemic plane, the magnetic resonance frequency displays only a branch with the change of external magnetic field. In general, the magnetic resonance frequency decreases with the increase of the external magnetic field nonlinearly and monotonically. However, when the ratio between the cubic magnetocrystalline anisotropic field H_{k1} and uniaxial magnetocrystalline anisotropic field H_a is about $2/3 < |H_{k1}/H_a| < 1$, the magnetic resonance frequency increases with the increase of external magnetic field, which is in good agreement with the experimental results. The results show that through magnetic resonance spectrum, the vertical magnetic anisotropy in magnetic thin film can be distinguished.

Keywords: ferromagnetic resonance, high frequency branch, low frequency branch

PACS: 75.30.GW, 76.20.+q, 76.50.+g

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974170) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11104239).

[†] E-mail: jghu@yzu.edu.cn