

应力对铁磁薄膜磁滞损耗和矫顽力的影响*

郭子政[†] 胡旭波

(华南农业大学理学院应用物理系, 广州 510642)

(2012年9月28日收到; 2012年10月14日收到修改稿)

改进了 JA-SW 混合模型, 使之能处理具有两种单轴各向异性的磁体. 数值研究了面内应力对铁磁薄膜磁滞损耗和矫顽力的影响. 结果表明, 磁滞损耗和矫顽力与应力强度和应力施加方向以及外场取向有关. 磁滞损耗或矫顽力随应力强度变化的关系曲线并不完全是单调增加的, 比如当外场与易轴方向平行时会出现弯曲. 另外, 应力会造成矫顽力随外场取向角关系曲线的峰值偏移. 结果与文献资料进行了广泛对比并对其差异进行了解释.

关键词: JA-SW 混合模型, 磁滞损耗, 矫顽力, 应力

PACS: 75.30.Gw, 75.60.Ej, 75.80.+q

DOI: 10.7498/aps.62.057501

1 引言

应力对磁性材料的物理性能如各向异性^[1]、磁致伸缩^[2]、磁电阻^[3]、铁磁共振^[4]、自旋波^[5]等有很大影响, 因而近年吸引了很多人的注意. 其中, 磁性薄膜的应力效应是许多学者关注的重点之一. 在这方面已经有许多有意义的结果报道.

在实验方面, Gareial 等^[6]、Stobiecki 等^[7]采用应力生长技术, 研究了应力对 CoFeB, FeB, CoSiB 等薄膜磁畴结构的影响, 发现应力对各向异性、对于薄膜的磁矩取向有较强的诱导作用. Minor 等^[8]的研究则表明, 在应力作用下, FeCoB 薄膜的磁致伸缩系数、矫顽力和各向异性场都会发生明显的变化, 随着张应力的增加, FeCoB 薄膜矫顽力略微增加, 磁致伸缩系数增加. Mandal 等^[9]研究了张应力作用下 FeB 薄膜、CoSiB 薄膜、FeB/CoSiB 双层膜以及 FeB/Cu/CoSiB 多层膜在不同方向的矫顽力, 发现对正磁致伸缩系数的 FeB 薄膜, 沿应力方向矫顽力最小, 而垂直于应力方向矫顽力最大, 对于负磁致伸缩系数的 CoSiB 薄膜, 情况则正好相反.

理论方面, Callegaro 等^[10]针对应力对 Ni 铁磁薄膜矫顽力的影响建立了磁畴转动的回线模型, 研究了在磁畴转动的磁化机理中应力对 Ni 铁磁薄

膜磁滞回线以及磁特性的影响规律. 为了研究应力对畴壁位移磁化机理的影响, 在 Jiles-Atherton (JA) 模型^[11]的基础上, Garikepati^[12]、Sablik^[13-15]、Jiles 等^[16-18]将应力作用纳入到总的等效场中, 并对畴壁钉扎系数进行修正, 研究了应力对铁磁薄膜磁特性如磁滞回线、矫顽力、磁化率等的影响规律, 研究结果表明, 对于正磁致伸缩系数的铁磁材料, 当施加张应力时, 矫顽力下降. Zou 等^[19]采用微磁学的方法, 研究了应力、晶体结构和具有条状磁畴结构或 ripple 磁畴结构的软磁薄膜磁性能的关系, 结果表明, 应力和软磁薄膜磁性能之间的关系依赖于薄膜的成分、结构、晶粒尺寸、薄膜厚度等因素. Braun^[20]针对由于晶格不匹配产生应力的磁性金属薄膜, 将磁弹各向异性和形状各向异性纳入到总的磁各向异性中, 利用磁各向异性最小化方法建立了一个磁矩重取向临界厚度的数学模型. Zhu 等^[21]利用 LLG 方程数值计算了 Ni 单晶铁磁薄膜中应力作用下薄膜的反磁化过程, 发现矫顽力随压应力的增加而增加, 剩磁随张应力的增加而降低. Hu 等^[22]的计算也给出了类似的结论. Shu 等^[23]建立了考虑应力作用和磁致伸缩的微磁学模型, 该模型可以精确地计算应力作用下铁磁薄膜单元的磁畴模式和磁滞回线. 但是, 上述微磁学的计算大多没有强调应力施加方向对结果的重要影响.

* 广东省高等学校人才引进专项资金项目和华南农业大学校长科学基金资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: phzzguo@126.com

综上所述,理论和实验结果表明磁性随应力变化复杂,需进一步研究.文献中应力对铁磁薄膜磁性能的影响的研究主要集中在对矫顽力的影响上.而计算矫顽力的通常方法是找出磁滞回线与横轴的交点.在这方面,Preisach模型^[24]、JA模型^[11]、Stoner–Wohlfarth (SW)模型^[25]等经典磁滞模型经常被使用.

Preisach模型等磁滞模型已经研究了很多年,它们的特点是计算简单、稳定.但是,由于每种计算模型只重点考虑某种机理,不能全面考虑各个方面因素的影响,因而都有其局限性.比如,Preisach模型通过描述多个单畴单元的不可逆转动来获得体系在外磁场下的磁行为,SW模型只考虑单畴颗粒中磁矩的可逆和不可逆转动过程,而JA模型则只考虑畴壁钉扎对磁滞的贡献.另外,JA模型是标量模型,不能反映各向异性的效果.所以,很容易理解为什么许多作者给出的计算结果不能统一解释.修改磁滞模型,使之能反映综合机理是目前理论研究的一个重要方向.

另一方面,文献中应力对铁磁薄膜磁性能的影响的研究主要集中在对矫顽力的影响上,对磁滞损耗影响的研究报道较少.

如上所述,JA模型是标量模型,不能反映各向异性的效果.但JA模型基于简单常微分方程,易于动态仿真.最简单的矢量模型是基于静磁能量最小

化方程的SW模型,但SW理论不能解释涡流损耗和增加的能量损耗等现象.2006年,Dimitropoulos等^[26]将JA模型和SW模型结合而提出JA-SW混合模型的概念.这是将JA和SW模型优势互补而产生的一个矢量模型,通过这个模型可以方便考虑各向异性的影响.本文在此模型的基础上,通过数学变换方法引入等效各向异性的概念,从而使此JA-SW混合模型能够包括应力各向异性.利用修改后的模型,我们重点研究应力对磁滞损耗和矫顽力的影响.

2 计算模型

2.1 JA-SW 混合模型

根据JA模型,铁磁材料的总磁化强度可分成可逆分量(reversible component), M_{re} ,和不可逆分量(irreversible component), M_{ir} ,两部分组成,即

$$M = M_{re} + M_{ir}, \quad (1)$$

或者写成

$$M = cM_{ir} + (1-c)M_{an}, \quad (2)$$

其中 c 为可逆分量系数, M_{an} 为无磁滞磁化强度. M_{ir} 由下式决定^[26]:

$$\dot{M}_{ir} = \begin{cases} \left[-\frac{k_0}{2k_1} + \sqrt{\frac{k_0^2}{4k_1^2} + \frac{M_{an} - M_{ir}}{k_1} \cdot \dot{H}_E u((M_{an} - M_{ir}) \cdot \dot{H}_E)} \right] \frac{M_{an} - M_{ir}}{|M_{an} - M_{ir}|}, & (k_1 \neq 0), \\ \frac{M_{an} - M_{ir}}{k_0} \cdot \dot{H}_E u((M_{an} - M_{ir}) \cdot \dot{H}_E) \frac{M_{an} - M_{ir}}{|M_{an} - M_{ir}|}, & (k_1 = 0), \end{cases} \quad (3)$$

$$M_{ir} = 0 (k_1 = k_0 = 0), \quad (4)$$

其中 $\dot{M}_{ir} = \frac{dM_{ir}}{dt}$, $\dot{H}_E = \frac{dH_E}{dt}$, 参数 k 称为钉扎常数, $k = k_0 + k_1|\dot{M}|$, 而 $\dot{M} = \frac{dM}{dt}$. $u(x) = \begin{cases} 1, & (x \geq 0) \\ 0, & (x < 0) \end{cases}$ 是单位阶梯函数. 无磁滞磁化强度 M_{an} 可由下式计算:

$$M_{an} = L(|H_E + H_F|) \frac{H_E + H_F}{|H_E + H_F|} = M_s \frac{\beta |H_E + H_F|}{1 + \beta |H_E + H_F|} \frac{H_E + H_F}{|H_E + H_F|}, \quad (5)$$

这里 M_s 是饱和磁化强度, $L(\cdot)$ 代表Langevin函数,

$\beta \propto 1/T$, 其中 T 为绝对温度.

$$H_E = H + \alpha M \quad (6)$$

是计入畴相互作用后的有效场, α 是分子场系数.Dimitropoulos等^[26]认为,当磁体中存在单轴各向异性场时,该场对磁体的作用可等效为一个沿易轴(EA)方向的有效场,此有效场可写成

$$H_F = \frac{2K_u}{M_s^2} (M_{an} \cdot \hat{e}_u) \hat{e}_u, \quad (7)$$

它根据SW模型中的各向异性能 $E_u = -K_u \cos^2(\varphi)$ 得到,其中 K_u 是单轴各向异性常数, φ 是 M_{an} 和EA之间的夹角, \hat{e}_u 是EA轴的方向矢量.

2.2 改进的 JA-SW 应力模型

设有一强度为 K_σ 的应力场施加于磁体, 则磁体总的各向异性能应为单轴磁晶各向异性 and 应力各向异性之和, 各向异性引起的总的自由能密度可写成如下的约化形式:

$$E = E_u + E_\sigma = -K_u \cos^2 \varphi - K_\sigma \cos^2(\psi - \varphi), \quad (8)$$

其中 ψ 表示应力矢量与 EA 夹角. 如果选取 $\tan 2\varphi_0 = \frac{K_\sigma \sin 2\psi}{K_u + K_\sigma \cos 2\psi}$, 方程 (8) 可转换成 [27,28]

$$E = -K_u^* \cos^2(\varphi^*) + K_u^* \sin^2 \varphi_0 - K_\sigma \sin^2 \psi, \quad (9)$$

其中

$$K_u^* = \sqrt{K_u^2 + K_\sigma^2 + 2K_u K_\sigma \cos(2\psi)} \quad (10)$$

是等效各向异性常数, $\varphi^* = \varphi - \varphi_0$ 是等效各向异性场与 \mathbf{M}_{an} 的夹角 (见图 1). 定义等效各向异性场方向的单位矢量 \hat{e}_u^* 并用 K_u^* , \hat{e}_u^* 代替方程组 (1)–(7) 中的 K_u , \hat{e}_u 得到修正的 JA-SW 应变模型.

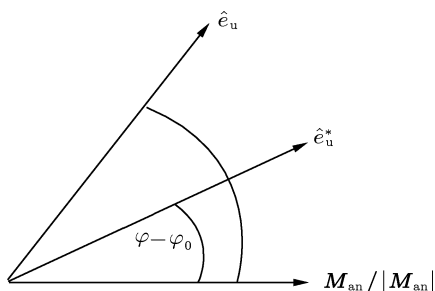


图 1 等效各向异性方向示意图

以上方法对具有两种单轴各向异性的系统都是适用的.

3 应力对磁滞损耗的影响

下面计算中, 我们把一个各向异性磁体看成是一个处于附加的有效场 \mathbf{H}_F 之中的各向同性磁体. 由于对称性, 平衡时的磁矩会位于易轴和外加磁场所构成的平面上. 设此平面为 xy 平面并在此平面上讨论问题.

考虑一铁磁 (FM) 薄膜系统, 这时, φ 为 FM 层磁化方向相对 EA 的取向角, K_u 是 FM 层的单轴各向异性常数. 我们作如下假设: 1) 系统为单畴系统; 2) 薄膜平面为 xy 平面; 3) 只考虑面内 (in-plane) 应力, 用 σ 表示应力强度, λ_s 表示饱和磁致伸缩系数, M_s 表示饱和磁化强度, 这

时, (8) 式中 $K_\sigma = \frac{3\lambda_s \sigma}{2M_s}$. 为计算简便起见, 我们不考虑 λ_s 的符号, 也不考虑 σ 的正负 (即不区分张应力和压应力), 而只考虑 $\lambda_s \sigma > 0$ 的情况; 4) 设 \mathbf{M}_{an} 沿 $\hat{e}_x = [1, 0, 0]$ 方向, 则 EA 方向的单位矢量 $\hat{e}_u = [\cos \varphi, \sin \varphi, 0]$, 有效 EA 的单位矢量为 $\hat{e}_u^* = [\cos \varphi^*, \sin \varphi^*, 0] = [\cos(\varphi - \varphi_0), \sin(\varphi - \varphi_0), 0]$; 5) 外场沿 $\hat{e}_x = [1, 0, 0]$ 方向施加, 则 φ 即外场与 EA 之间的夹角, φ 改变相当于外场取向的改变.

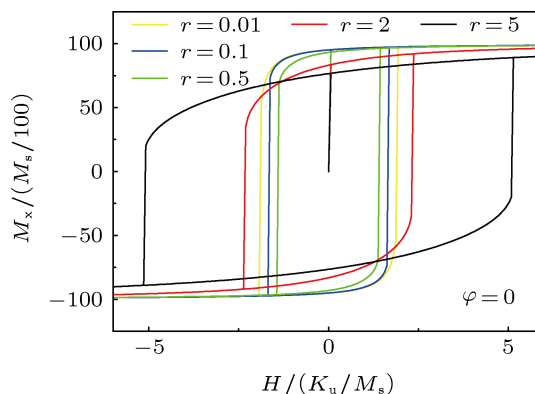


图 2 $\varphi = 0$ 时不同应力强度下的磁滞回线

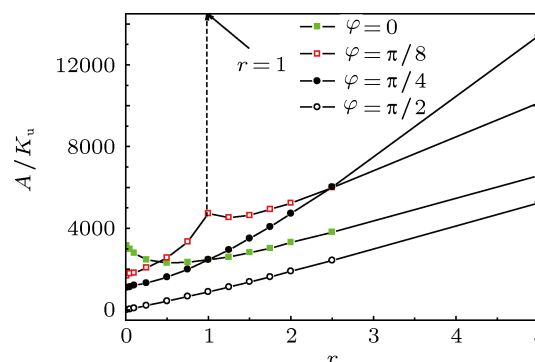


图 3 磁滞损耗 A (单位 K_u) 随应力强度的变化

图 2 中 $M_x = \mathbf{M} \cdot \hat{e}_x$, $H = |\mathbf{H}|$. 其他参数取为 $\beta = 10$, $M_s = 100$, $\hat{e}_u = [1, 0, 0]$ ($\varphi = 0$), $k_0 = k_1 = \alpha = 0$, $K_u = 100$. 外场参数 $H_x = H_0 \sin(2\pi ft)$, $H_0 = \frac{10K_u}{M_s}$, $f = 1$, 积分步长 $\Delta t = \frac{1}{1000f}$.

图 2 给出了 $\varphi = 0$ 时各种应力强度下的磁滞回线, 从中可以清楚地看到矫顽力先减小再增大的过程. 图 3 给出了不同 φ 值时磁滞损耗随应力强度的变化. 图 3 中, $\varphi = 0$ 的结果很有意思, 磁滞损耗随压力先减小后增大, 形成谷状曲线. Yamamoto 等 [29] 报道了一个类似的结果, 但他们的实验中压力垂直于磁体表面, 不同于我们的面内应力.

$\varphi = \pi/8$ 的结果与 $\varphi = 0$ 相反, A 先增加再减少, 形成峰值结构, 而且峰值恰在 $r = 1$ 处. $\varphi = \pi/4$, $\varphi = \pi/2$ 时磁滞损耗随外应力强度增加单调增加, 这个结果与 Yamamoto 等人的另一个实验 [30] 结果符合, 不过他们研究的是 Terfenol-D, 并非薄膜材料, 他们的压力方向是沿磁体的纵向.

应力对磁滞损耗的影响的研究报道很少, 图 3 反映了磁滞损耗随压力变化的复杂性. 特别是随着应力施加方向的改变, 磁滞损耗的表现会出现很多不同.

4 应力对矫顽力的影响

文献中许多作者都非常关注应力对矫顽力的影响, 并报道了他们的研究结果. 为方便与文献的比较, 下面我们计算矫顽力随应力强度和外加取向角的变化.

图 4 是相应于图 3 的矫顽力关系曲线. 由图 4 可知, 矫顽力的变化趋势与磁滞损耗一致. 我们注意到图 4 中 $\varphi = \pi/8$ 的曲线与文献 [21] 的图 3 很相似. 在我们的计算中只考虑了 $\lambda_s \sigma > 0$ 的情况, 没有区分张应力和压应力, 而文献 [21] 则分别讨论了张应力和压应力的影响. 所以, 图 4 中 $\varphi = \pi/8$ 的曲线中峰值的出现很可能与应力类型改变有关. 关于这一点还需要更深入的研究. 图 5 是不同 r 取值时矫顽力随外加取向角的变化关系曲线. $r = 0$ 是典型的 SW 模型的矫顽力关系曲线, $r = 1$ 时发生峰值偏移现象, 偏移角度 $\varphi_0 = \pi/8$. 这个角度可按如下方式算出: 取 $\psi = \pi/4$ (对应于晶格失配造成的双轴应变) 并令 $r = K_\sigma/K_u$, 可得 $\varphi_0 = (1/2) \tan^{-1} r$. 显然, 当 $r \rightarrow \infty$ 时, $\varphi_0 \rightarrow \pi/4$; 当 $r = 1$ 时, $\varphi_0 = \pi/8$.

文献 [31] 和 [32] 计算了应力对铁磁/反铁磁双层系统矫顽力和交换偏置场的影响. 在他们的计算中易轴、外场、应力也都处于面内, 与我们的计算条件相同. 因为在 $\alpha = 0$ 时, 本模型基本上退化成 SW 模型. 文献 [31] 没有给出矫顽力的结果. 在中等应力强度的条件下, 文献 [32] 的计算结果也显示出了矫顽力峰值的偏移现象 (见文献 [32] 图 3 中的第 3 和第 4 两图), 但他们没有说明这是等效易轴取向变化的结果, 只是认为这是一种“振荡现象”.

这里要注意的是, 应力强度在 $r = 1$ 附近的情况尤其复杂. 这个应力强度对应晶格失配所造成的内用力的范围. 比如, 在 SrTiO_3 衬底上生长 CoFe_2O_4 薄膜, CoFe_2O_4 和 SrTiO_3 的晶格常

数分别为 8.392 \AA (a_F) 和 3.905 \AA (a_S). 采用 (8) 式中的符号, 约化后的应力各向异性场强度可表示为 $K_\sigma = \frac{3\lambda_s \sigma}{2M_s} = \frac{3\lambda_s Y \epsilon}{2M_s}$ ($\epsilon = \left| \frac{a_S - a_F}{a_F} \right|$ 为晶格失配造成的应变). 磁晶各向异性场可表示为 $K_u = \frac{K_1}{M_s}$. 利用文献 [33] 中的参数 $\lambda_s = -590 \times 10^{-6}$, $Y = 1.5 \times 10^{12} \text{ dyn/cm}^2$ ($1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$), 以及 $K_1 = 3 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$), 可得 $r = K_\sigma/K_u \approx 1.0$.

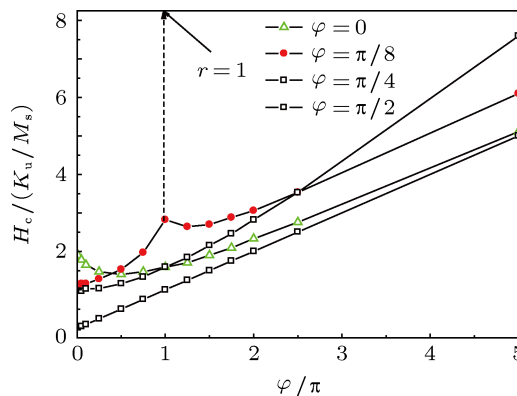


图 4 矫顽力 (单位 K_u/M_s) 随应力强度的变化

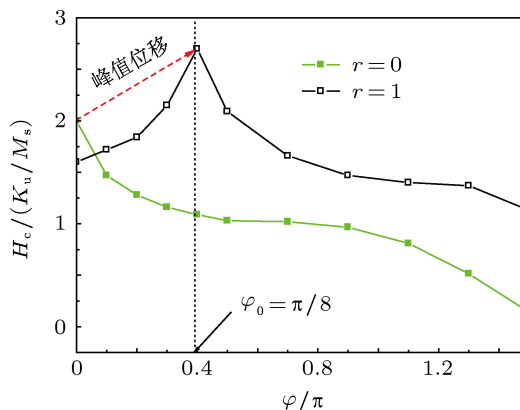


图 5 矫顽力 (单位 K_u/M_s) 随外加取向角度的变化

5 结论

本文改进了 JA-SW 混合模型, 使之能处理具有两种单轴各向异性的磁体. 数值研究了面内应力对铁磁薄膜磁滞损耗和矫顽力的影响, 并发现磁滞损耗和矫顽力与应力强度和应力施加方向以及外场取向有关. 本文结果指出, 磁滞损耗或矫顽力随应力强度变化的关系曲线并不完全是单调增加的, 比如当 $\varphi = 0$ 时会出现弯曲. 另外, 应力会造成矫顽力随外场取向角关系曲线的峰值偏移. 结果与文献

资料进行了广泛对比并对其差异进行了解释. 本文取得的新结果有二: 首次报道了 $\varphi = 0$ 时矫顽力随

应力强度曲线的谷状结构; 解释了矫顽力随外场取向角关系曲线的“振荡现象”^[32] 是峰值偏移的结果.

- [1] Ohnuma M, Yanai T, Hono K, Nakano M, Fukunaga H, Yoshizawa Y, Herzer G 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 093927
- [2] Zhang H, Zeng D C, Liu Z W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 067503 (in Chinese) [张辉, 曾德长, 刘仲武 2011 物理学报 **60** 067503]
- [3] Qian L J, Xu X Y, Hu J G 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2589
- [4] Rong J H, Yun G H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5483 (in Chinese) [荣建红, 云国宏 2007 物理学报 **56** 5483]
- [5] 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]
- [6] Garcia D, Munoz J L, Castano F J, Prados C, Asenjo A, Garcia J M, Vazquez M 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 4809
- [7] Mandal K, Vazquez M 2000 *IEEE Trans. Magn.* **36** 2912
- [8] Stobiecki T, Wrona J, Czapkiewicz M 2000 *J. Magn. Magn. Mater.* **215-216** 566
- [9] Minor M K, Crawford T M, Klemmer T J, Peng Y G, Laughlin D E 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 8453
- [10] Callegaro L, Puppini E 1997 *IEEE Trans. Magn.* **33** 1007
- [11] Jiles D C, Atherton D L 1984 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **17** 1265
- [12] Garikepati P, Chang T T, Jiles D C 1988 *IEEE Trans. Magn.* **24** 2922
- [13] Sablik M J, Kwun H, Burkhardt G L, Jiles D C 1987 *J. Appl. Phys.* **61** 3799
- [14] Sablik M J, Jiles D C 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 5402
- [15] Sablik M J, Jiles D C 1993 *IEEE Trans. Magn.* **29** 2113
- [16] Jiles D C 1995 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **28** 1537
- [17] Jiles D C, Devine M K 1994 *J. Appl. Phys.* **76** 7015
- [18] LO C C H, Kinser E, Jiles D C 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 6626
- [19] Zou P, Yu W, Bain A A 2002 *IEEE Trans. Magn.* **38** 3501
- [20] Braun A 2006 *Physica B* **373** 346
- [21] Zhu B, LO C C H, Lee S J, Jiles D C 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 7009
- [22] Hu R L, Soh A K, Zheng G P, Ni Yong 2006 *J. Magn. Magn. Mater.* **301** 458
- [23] Shu Y C, Lin M P, Wu K C 2004 *Mech. Mater.* **36** 975
- [24] Kedous-Lebouc A, Vernescu C, Cornut B 2003 *J. Magn. Magn. Mater.* **254-255** 321
- [25] Stoner E C, Wohlfarth E P 1948 *Philos. Trans. R. Soc. London* **240** 74
- [26] Dimitropoulos P D, Stamoulis G I, Hristoforou E 2006 *IEEE Sens. J.* **6** 721
- [27] Guo Z Z 2011 *Solid State Commun.* **151** 116
- [28] Braun D 2003 *J. Magn. Magn. Mater.* **261** 295
- [29] Yamamoto K, Yanase S 2011 *Przeegl Elektrotechniczny* **87** 97
- [30] Yamamoto K, Nakano H, Yamashiro Y 2003 *J. Magn. Magn. Mater.* **254-255** 222
- [31] 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]
- [32] Bai Y H, Yun G H, Narisu 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4962 (in Chinese) [白宇浩, 云国宏, 那日苏 2009 物理学报 **58** 4962]
- [33] Thang P D, Rijnders G, Blank D H A 2007 *J. Magn. Magn. Mater.* **310** 2621

Effects of stress on the hysteresis loss and coercivity of ferromagnetic film*

Guo Zi-Zheng[†] Hu Xu-Bo

(Department of Applied Physics, College of Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(Received 28 September 2012; revised manuscript received 14 October 2012)

Abstract

The JA-SW hybrid model is extended in order to include the strain or stress anisotropy. With this improved model, a simulation is carried out to study the effects of stress on magnetic hysteresis loss and coercivity of ferromagnetic film. It is shown that the hysteresis loss and coercivity are related to the external field orientation, the stress intensity and the stress direction. Hysteresis loss, or the coercive force does not entirely monotonically increase with the change of stress intensity. For example, when the external field is parallel to the easy axis, a valley appears in the curve. In addition, stress will cause the peak offset of the coercivity curve as the orientation angle of the external field changes. Extensive comparisons of results with literature data are made and the differences between them are explained.

Keywords: improved JA-SW model, hysteresis loss, coercivity, stress

PACS: 75.30.Gw, 75.60.Ej, 75.80.+q

DOI: 10.7498/aps.62.057501

* Project supported by the Guangdong Higher Educational Special Fund for the Introduction of Talents and by the Principal Science Foundation of South China Agricultural University.

† Corresponding author. E-mail: phzzguo@126.com