

文章编号:1005-0523(2009)06-0087-06

微扰场下 Ni 纳米圆环磁结构的微磁学研究

刘正方,伍清萍,陈爱喜

(华东交通大学 基础科学学院,江西 南昌 330013)

摘要:以微磁学理论为基础,采用三维动力学模型研究了 Ni 纳米铁磁圆环的微磁结构与体系结构参数的关系,以预测纳米铁磁圆环体系的磁特性。结果表明:在内外半径比一定的条件下,外半径较小时,体系的磁结构只是单一的“一致”态;外半径较大时,磁结构不仅有“涡旋”态和“洋葱”态,而且出现马蹄态以及特殊“洋葱”态。并对各种磁结构的反转形式以及反转速度进行了研究;在反磁化过程中,对于“一致”态、“涡旋”态以及特殊“洋葱”态磁结构,体系磁矩基本是沿厚度方向变化;而“洋葱”态磁结构,则沿三维空间变化(但始终保持磁矩在膜面内的分量基本不变)。另外,随外半径增大,“涡旋”态磁结构的反转时间变化微弱;“洋葱”态的反转时间迅速缩短;“马蹄”态随外半径增大,开关时间明显缩短。并对结果进行了定性的解释。

关键词:纳米圆环;微磁结构;微磁学;磁化反转

中图分类号:0482.52

文献标识码:A

自组结构由于其构造简单、廉价而且方法稳定近年来已引起了人们的广泛关注^[1]。而且由于纳米结构体系在自旋电子器件方面潜在的应用价值以及其有趣的现象,该体系已成为研究自组结构的主要模型;近年来纳米结构体系主要有交换耦合双相体系^[2,3]、磁纳米线^[4,5]、磁纳米管^[6]以及纳米铁磁圆环(Nano-ferromagnetic ring)^[7~9]等结构材料。而由于纳米铁磁圆环独特的磁畴结构以及磁特性,有望成为新一代的高密随机存储器(MRAM)。

在 MRAM 的设计中,最重要的是用来存储数据的剩磁状态必须是可重复的和简单的。而对纳米铁磁圆环体系的研究中,观察到两种稳定的磁结构——“O”态(onion states)和“V”态(vortex state)(图1)^[11,12]。这两种不同的磁结构间的转变,主要决定于“O”态的钉扎场;在器件的设计中,人们依靠铁磁圆环中的涡旋态的磁畴结构存储数据,一般以顺时针旋转的磁化状态对应“1”,逆时针旋转的磁化状态对应“0”。人们已制备出该体系并观察到了这预测由具有独特磁化结构的纳米铁磁圆环所制备的 MRAM 的存储密度有望达到 400 Gbits/in^[10]。

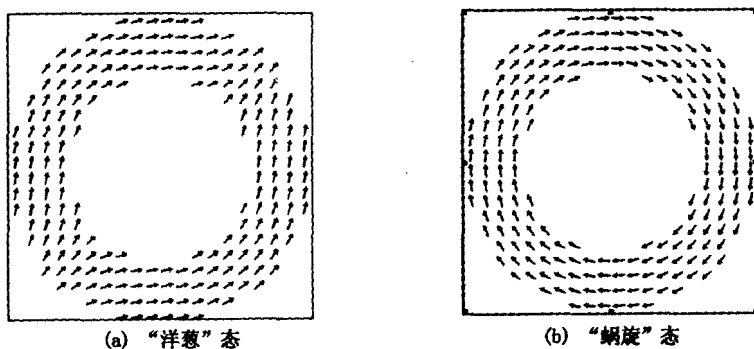


图1 Ni 纳米铁磁圆环体系的磁化反转过程

收稿日期:2009-09-08

基金项目:江西省教育厅科研项目(GJJ09504);江西省井冈之星项目(2008DQ00400);华东交通大学科学技术研究项目(01307142)

作者简介:刘正方(1974-),男,山西定襄人,硕士,讲师,研究方向为磁性材料以及光子晶体。

尽管人们已对该体系进行了大量的研究,但主要是在膜面内施加磁场,而且对于体系磁结构以及反磁化过程与体系结构的关系却研究的也比较少。而实际上垂直膜面的磁场以及体系的尺度对体系磁特性的也是不容忽略的。另外,人们已采用微磁学理论对磁纳米体系进行了一系列的研究^[13~16];因此,本文采用微磁学理论对 Ni 纳米铁磁圆环的磁结构以及反磁化过程在垂直膜面的微扰磁场作用下随体系厚度及环半径的变化关系进行了研究。研究结果显示体系磁结构以及反磁化过程随体系厚度及环半径的变化表现出了复杂的关系,这将有助于人们研究其它的自旋电子学课题(如磁电阻、磁传感器等)。

1 模型和方法

如图 2 是纳米铁磁圆环的结构示意图。

在微磁学理论中,自由能的表达式为

$$E_t = E_{an} + E_{ex} + E_H + E_{demag} \quad (1)$$

式中: E_{ex} 是交换作用能; E_k 是磁晶各向异性能; E_H 是外磁场能; E_{demag} 是退磁能;其中 E_{ex} 由软硬磁层间交换能、软磁层内交换能与硬磁层内交换能三部分组成。磁矩从一个稳定状态到另一个稳定状态的变化过程遵循 Landau - Lifshitz - Gilbert (LLG) 动态方程:

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\omega}{1+\alpha^2} M \times H_{eff} - \frac{\alpha\omega}{(1+\alpha^2)M_s} M \times (M \times H_{eff}) \quad (2)$$

其中: M 是磁化强度矢量; ω 是旋磁比; α 是阻尼系数,

有效场 H_{eff} 定义为自由能的变分, $H_{eff} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_t}{\partial M}$ 它提

供作用在磁化强度矢量上的实际力矩。模拟基于有限差分的思想,把材料进行适当的网格划分,假定每个网格内磁矩分布是均匀的,给定一初始的磁矩分布,计算每个网格内的有效场并求解 Gilbert 方程,得到磁化强度矢量的动力学变化过程,从而获得磁体的微磁结构分布(计算中只考虑最近邻相互作用,计算过程选择了自由边界条件)。

2 模拟结果及讨论

模拟过程中采用的样品为 Ni 纳米铁磁圆环,交换耦合常数 $A = 0.9 \times 10^{-11} (\text{J} \cdot \text{m}^{-1})$ 、饱和磁化强度 $M_s = 0.49 \times 10^6 (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

每一剖分单元的长、宽和高分别为 5 nm、5 nm 与 2.5 nm;模拟中保持体系内外半径比(r_i/r_o)不变(≈ 0.3),然后在不同的磁层厚度(h)下,通过改变体系内外半径来观察体系在反磁化过程中磁结构的变化。体系初始磁化强度矢量方向都沿外场(z 轴),且外场(100 mT)开始沿 $o-z$ 正方向,然后逐渐沿 z 轴方向变化到 $o-z$ 轴负方向,最后再变到 $o-z$ 正方向。(以下各磁结构图是 $x-y$ 平面的俯视图)

当外半径较小时,体系的反磁化形式只是单一的一致可逆反转;这是由于此时铁磁圆环相当于纳米线,其两端具有较强的退磁场,导致体系磁矩反转时必须克服这一势垒,因而形成一致的可逆反转^[4]。但随体系外半径增大,厚度较小时,体系仍是一致可逆反转;而厚度较大时,体系的磁结构表现出复杂的形式。体系磁矩起始阶段基本是沿 $o-z$ 轴方向变化,而当反转场达到一定值时,则会呈现一些独特的磁结构。

表 1 所示为 Ni 纳米铁磁圆环体系在不同外半径以及厚度下的磁结构。由表可知当厚度较小(≤ 10 nm)时,在整个反磁化过程中磁矩只是沿 z 轴作微小的可逆旋转出现“C”态(consistent state)的磁结构(图 3(a));而当厚度较大(≥ 22.5 nm)时,体系会呈现“V”态的磁结构;这可归于厚度较大时,体系不再是典型的

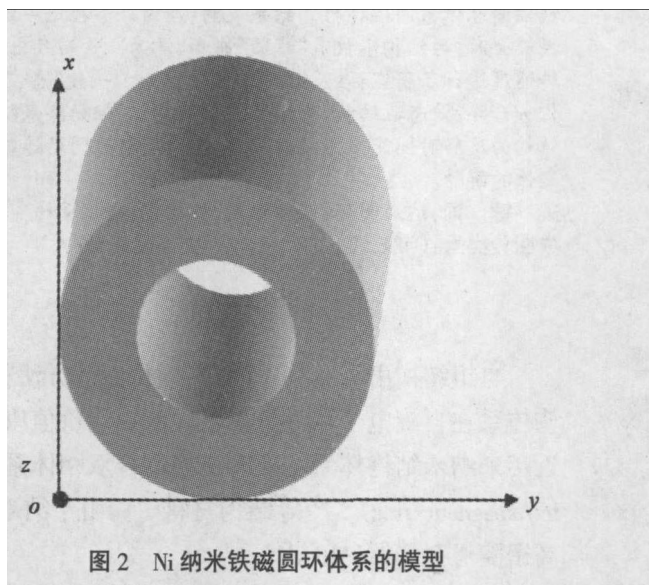


图 2 Ni 纳米铁磁圆环体系的模型

纳米圆环而类似于纳米管;而纳米管在外半径较大时,呈现的正好是螺旋态的磁结构^[6]。当厚度介于 10 nm 与 22.5 nm 之间时,体系表现出“O”态磁结构。许多理论和实验研究结果也证实了“V”态以及“O”态磁结构的存在^[11、12]。

研究发现外半径较小且厚度较大时,体系的磁结构会随着外场的变化由“C”态经过“V”态最后又恢复“C”态;而当外半径较大时,体系会由“C”态变为“O”态或“V”态,并且最后稳定在此种磁结构。这主要是由于随体系外半径增大,体系磁矩反转所需克服的势垒会逐渐增加,结果导致其不可逆反转场增大,因此外半径较大时,体系磁结构会稳定在“O”态或“V”态。

表 1 Ni 纳米铁磁圆环体系在不同外半径以及厚度下的磁结构

厚度 /nm	外半径/nm				
	12.5	25	35	50	75
10	C	C	C	C	C
12.5	CV	AV	O	O	O
15	CV	CV	CV	O	O
17.5	AV	CV	CV	AV	SO
20	CV	AV	AV	AV	O
22.5	CV	AV	CV	CV	AV
25	AV	CV	CV	CV	AV
30	CV	CV	CV	CV	CV

注:表中 C 表示“C”态, CV 表示顺时针“V”态, AV 表示反时针“V”态, O 表示“O”态, SO 表示特殊“O”态

另外,当体系外半径为 35 nm、50 nm 厚度分别为 15 nm 和厚度为 17.5 nm 以及外半径为 75 nm 厚度为 17.5 nm 时,体系由初始态变为最后的稳定态的过程中分别会呈现出类似纳米矩形环中的奇异“马蹄”态 (“horseshoe” state)(图 3(b))以及特殊“O”态(special“O” state)(图 3(c))^[9]。“马蹄”态磁结构是独特的,该结构是在反转场较小时形成的,随着反转场的进一步增大,该结构会通过局部(如图 3(b)的上端)反转而转变为“V”态磁结构。这对于高密随机存储器的设计是极为有利的。

当体系磁结构为“C”态和“V”态时,在反磁化过程中,体系磁矩基本是沿 $o-z$ 轴方向变化(图 4(a))。而当磁结构为“O”态时,在反磁化过程中,体系磁矩会先经过一不可逆反转转到与 $o-z$ 轴成某一夹角方向,然后再沿三维空间变化(但始终保持磁矩在 $o-x$ 轴与 $o-y$ 轴方向的分量基本不变)(图 4(b));但对于特殊“O”态其磁矩仍基本是沿 $o-z$ 轴方向变化。

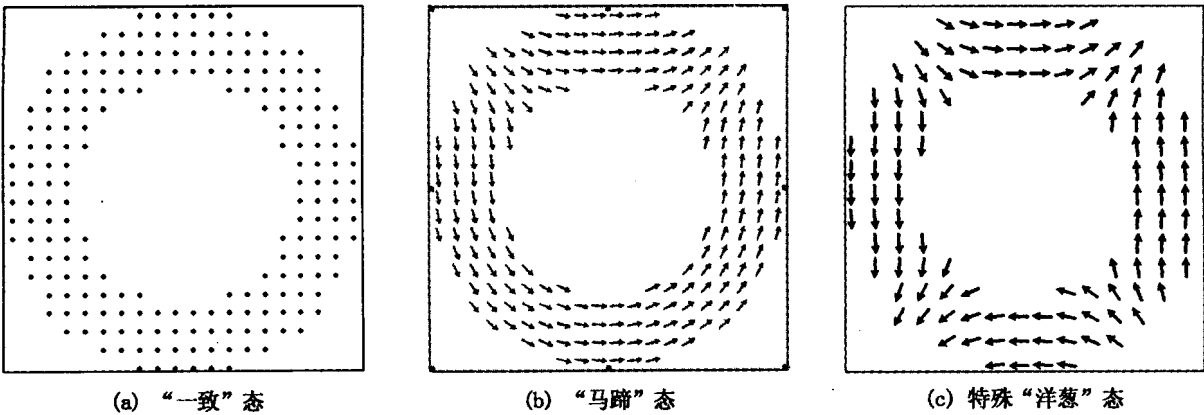


图 3 纳米铁磁环体系的磁结构

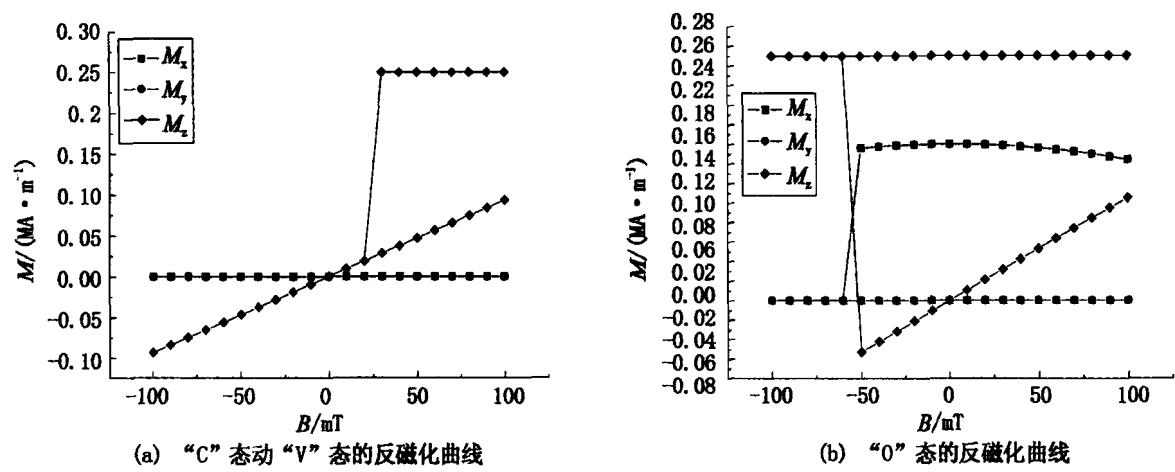
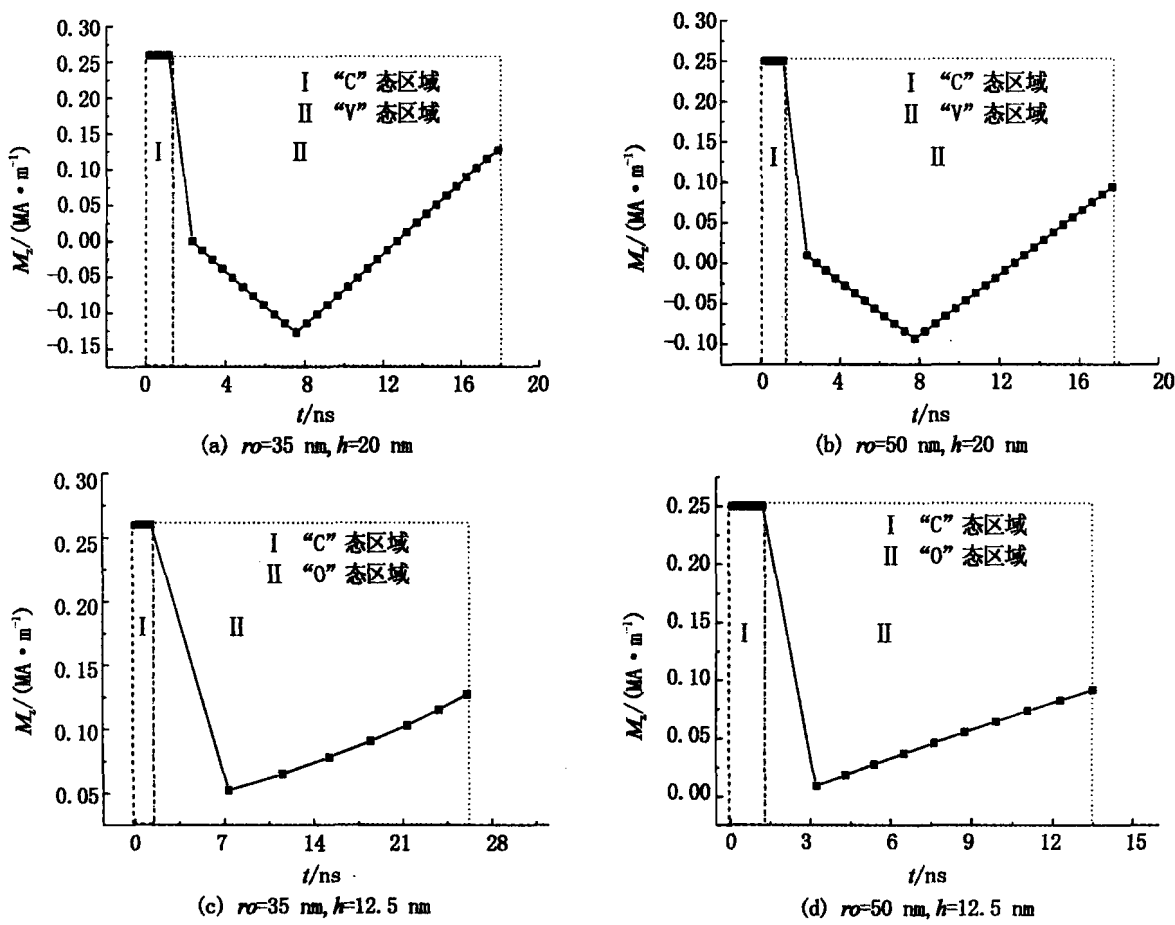


图 4 纳米铁磁环体系的反磁化曲线

本文还研究了磁结构随时间的反转快慢,结果表明对于“蜗旋”态磁结构外半径增大,反转时间变化不明显(图 5(a)、(b));“洋葱”态随外半径增大,反转时间迅速缩短(图 5(c)、(d));而对于“马蹄”态随外半径增大,其变为“蜗旋”态磁结构的开关时间有明显的缩短(图 5(e)、(f))。这对于研究电子器件的开关时间有一定的理论参考价值。



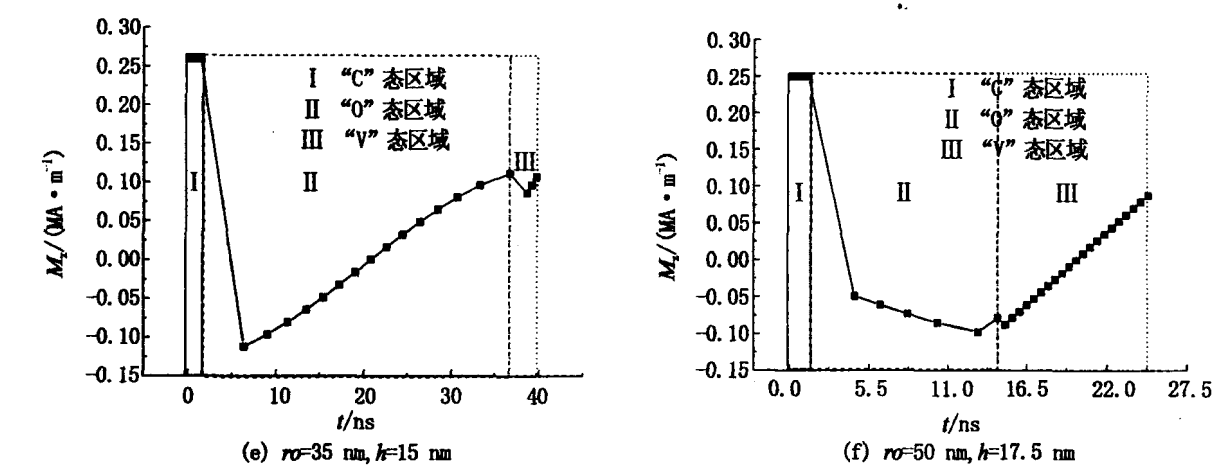


图 5 z 轴的磁化强度随时间的变化曲线

3 结论

通过对 Ni 纳米铁磁圆环体系的研究,得到下述结论:

(1) 当体系厚径比较大时,体系易形成“蜗旋”态磁结构,厚径比较小时,则易形成“一致”态磁结构;而厚径比处于两者间时,则会形成“洋葱”态磁结构。

(2) 通过模拟,在 Ni 纳米铁磁圆环结构中发现了“马蹄”态磁结构以及特殊“洋葱”态磁结构。

(3) 在一定的内外半径条件下,当外半径较小时,体系呈现的仅是“一致”态以及“蜗旋”态磁结构,只有当其具有较大的外半径时,才能体现出“洋葱”态以及“马蹄”态磁结构。而且“马蹄”态磁结构是不稳定的,只要外场稍微改变,则会通过其自身的局部反转变为“蜗旋”态磁结构。

(4) 对于为“一致”态、“蜗旋”态以及特殊“洋葱”态磁结构,在反磁化过程中,体系磁矩基本是沿垂直膜面方向变化。而对于“洋葱”态磁结构,在反磁化过程中,体系磁矩则会先经过一不可逆反转转到与膜面的法线成某一夹角方向,然后再沿三维空间变化(但始终保持磁矩在膜面内的分量基本不变)。

(5) 对于“蜗旋”态外半径增大,反转时间变化微弱;而对于“洋葱”态随外半径增大,反转时间缩短;特别对于“马蹄”态随外半径增大,开关时间明显缩短。

参考文献:

[1] Whitesides G M, Grzybowski B. Self-assembly at all scales[J]. Science, 2002, 295: 2 418 – 2 421.

[2] 刘正方, 伍清萍, 陈爱喜. 磁场取向对 Sm-Co/ α -Fe 交换耦合双层膜矫顽力的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(9): 1 669 – 1 673.

[3] 李 鹏, 杨晓非, 程晓敏. SmCo/Fe 系统膜厚对矫顽力与过渡区噪声影响的微磁学模拟[J]. 功能材料, 2008, 39(6): 905 – 908.

[4] 张腊梅, 郭光华, 韩念梅. 磁性镍纳米线矫顽力随角度变化规律的微磁学模拟[J]. 中国有色金属学报, 2006, 6(8): 1 400 – 1 404.

[5] Hertel R, Kirschner J. Magnetization reversal dynamics in nickel nanowires[J]. Physica B, 2004, 343: 206 – 210.

[6] Lebecki K M. Modelling of magnetization reversal for long ferromagnetic nanotubes[J]. Materials Science-Poland, 2008, 26(4): 983 – 988.

[7] XU W T, Watkins D B, DeLong L E, et al. Ferromagnetic resonance study of nanoscale ferromagnetic ring lattices[J]. J Appl Phys, 2004, 95(11): 6 645 – 6 647.

[8] Benatmane N, Scholz W, Clinyon T W. Magnetic configurations and phase diagrams of sub-100-nm NiFe nanorings[J]. IEEE Trans Magn, 2007, 43(6): 2 884 – 2 886.

[9] Dwarakanath N G, Anand S M, Vidhya S B. A novel magnetic random access memory design using square ring elements for the hard lay-

- er[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(11): 1 270 – 1 273.
- [10] Zhu J G, Zheng Y, Prinz G A. Ultrahigh density vertical magnetoresistive random access memory(invited)[J]. *J Appl Phys*, 2000, 87(9): 6 668 – 6 673.
- [11] Masahiro H, Takashi K, Yoshichika O. Controlled depinning of domain walls in a ferromagnetic ring circuit[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 242504(1 – 3).
- [12] Subramani A, Geerpuram D, Domanowski A, *et al*. Vortex state in magnetic rings[J]. *Physica C*, 2004, 404: 241 – 245.
- [13] Han Nian mei, Guo Guang hua, Zhang Guang fu, *et al*. Domain wall structure transition during magnetization reversal process in magnetic nanowires[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2007, 17: 1 034 – 1 037.
- [14] Goncharov A V, Zhukov A A, Metlushko V V, *et al*. Anisotropy of Magnetization Reversal and Magnetoresistance in Square Arrays of Permalloy Nano-Rings[J]. *IEEE Trans Magn*, 2006, 24(10): 2 948 – 2 950.
- [15] Montaigne F, Mangin S, Henry Y. Transitions of magnetic configuration at the interface of exchange-coupled bilayers: TbFe $\overline{\text{O}}$ GdFe as a model system[J]. *Phys Rev B*, 2003, 67: 144 412(1 – 13).
- [16] Labrune M, Carbuticchio M. Domain pattern in spring-magnet-type[Co-Fe] multilayers[J]. *J Magn Magn Mater*, 2004, 269(2): 203 – 211.

A Micromagnetic Study of Magnetization Configuration of Ni Nano-ring in Perturbation Field

LIU Zheng-fang, WU Qing-ping, CHEN Ai-xi

(School of Basic Sciences, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To forecast the magnetism of the Ni nano-ring, the relation between the micromagnetic configuration and structure parameter of this system is investigated by using three-dimension dynamic model based on micromagnetic theory. The results show that to fixed inner-outer radius ratio, for small outer radius, the magnetization configuration is “consistent” state. But for biggish one, the magnetization configurations include not only “vortex” and “onion” states but also the “horseshoe” and the special “onion” states. In the course of reversal magnetization, for the “consistent”, “vortex” and special “onion” states, the magnetic moment move basically along the thickness direction. However, for the “onion” state, the magnetic moment changes along the three-dimensional space, maintaining the magnetic moment in the film plane is basically unchanged. Besides, the reversal time of the “vortex” state is basically unchanged and that of the “onion” state and the switch time of the “horseshoe” state shorten rapidly.

Key words: nano-ring; micromagnetic configuration; micromagnetic; magnetization reversion

(责任编辑: 刘棉玲 吴泽九)