

# 坡莫合金纳米环微磁学特性研究

李应琛, 王永鑫, 闫泽, 刘磊, 丁福康

三峡大学, 理学院, 湖北省弱磁探测工程技术研究中心, 湖北 宜昌  
Email: ycli@ctgu.edu.cn

收稿日期: 2020年9月25日; 录用日期: 2020年10月8日; 发布日期: 2020年10月15日

## 摘要

基于微磁学软件MuMax3, 我们研究了外磁场下不同几何形状磁性纳米环( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ )的磁化翻转过程, 除了预期的洋葱态和漩涡磁化状态外, 在磁化过程中还观察到其它亚稳态。通过磁矩翻转相图和能量密度关系, 分析了不同磁化状态的形成和跃迁, 以及磁矩翻转过程中畴壁的传播和湮灭。我们进一步研究了极化电流驱动 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 磁性隧道结中磁矩翻转的过程, 研究发现, 纳米环隧道结磁矩翻转的电流密度为 $3.4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ , 临界电流密度大小为传统隧道结的0.63倍, 两者的磁矩翻转时间大致相同, 约为1000 ps。

## 关键词

MuMax3, 坡莫合金, 磁性纳米环, 磁性隧道结

# Micromagnetic Properties of Permalloy Nanorings

Yingchen Li, Yongxin Wang, Ze Yan, Lei Liu, Fukang Ding

Hubei Engineering Research Center of Weak Magnetic-Field Detection, College of Science, Three Gorges University, Yichang Hubei  
Email: ycli@ctgu.edu.cn

Received: Sep. 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 8<sup>th</sup>, 2020; published: Oct. 15<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Based on the micromagnetic software MuMax3, we studied the magnetization reversal process of different geometric shapes of magnetic nanorings ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) in an external magnetic field. In addition to the expected onion state and vortex magnetization state, other metastable states were observed in the magnetization process. The formation and transition of different magnetization states, as well as the propagation and annihilation of domain walls in the process of magnetic mo-

ment reversal are analyzed through the phase diagram and energy density relationship. Furthermore, we studied the process of magnetic moment reversal in  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  magnetic tunnel junctions driven by polarization current. The results show that the current density of magnetic moment reversal in nanoring tunnel junctions is  $3.4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ , and the critical current density is 0.63 times of that in traditional tunnel junctions. The time of magnetic moment reversal is about 1000 ps.

## Keywords

MuMax3, Permalloy, Magnetic Nanorings, Magnetic Tunnel Junction

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微观铁磁结构由于其在各个领域拥有巨大技术应用潜力, 以及展示出丰富的物理学特性, 近年来引起了人们的广泛关注[1] [2] [3]。由于磁电子的潜在稳定性和高存储密度, 目前对磁通闭合状态的研究非常活跃, 铁磁性纳米环非常有趣, 因为它们显示出非常稳定的磁通闭合状态“涡旋态”, 在这一状态下, 磁化强度  $M$  沿着环的边缘顺时针或逆时针方向排列[4]。但是在一个外磁场作用过程中, 铁磁纳米环具有两种磁化状态, 第一种是涡旋态, 即磁矩沿纳米环旋转排列, 另外一种为洋葱态, 具有两个相对的头对头畴壁铁磁性纳米环。在单个纳米环中, 洋葱态在剩磁下是稳定的[5]。结构对于纳米环磁矩的翻转及磁畴运动有着显著的影响, 在这里, 我们更为细致地研究了不同尺寸下洋葱态 - 涡旋态 - 洋葱态这一中间过程。

本文通过 MuMax3 微磁, 模拟研究了不同宽度和厚度下的  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  磁性纳米环的磁化过程, 在磁矩翻转的过程中, 我们发现了一种新的亚稳态, 并且从交换能、退磁能和塞曼能的相互关系间解释了这一现象。我们的工作更细致地描述了这一过程, 填补了磁性纳米环翻转过程的中间空白。同时我们研究了电流驱动  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)磁性隧道结磁矩翻转, 对比了纳米环隧道结与圆盘状纳米薄膜的翻转电流密度和时间, 并且提出了奥斯特场辅助磁矩翻转的概念, 对磁性纳米环状磁性隧道结的发展有重要意义。

## 2. 微磁学模拟

在模拟中, MuMax3 使用二维或三维正交网格对空间进行有限差分离散化, 进而求解 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程[6]。我们利用微磁学软件 MuMax3 研究了  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  合金磁性纳米环的磁矩翻转过程。该程序可以有效地模拟磁性纳米材料的动态磁化过程, 即所有自旋从初始构型开始, 总能量呈下降趋势。根据初始状态的不同, 系统会演化成顺时针或逆时针磁化构型的稳定或亚稳态。微磁仿真模型环的环厚  $t$  (10/30/50/70 nm 和 2.5 nm), 环宽  $d$  (25/50/100/125/150 nm), 外径  $D$  (300 nm)。在模拟中, 微磁平衡方程在正方形网格中求解, 网格尺寸为 1 nm, 自旋可在三维中自由旋转, 磁场沿着纳米环面内从  $-0.2\text{T}$  过渡到  $+0.2\text{T}$ 。

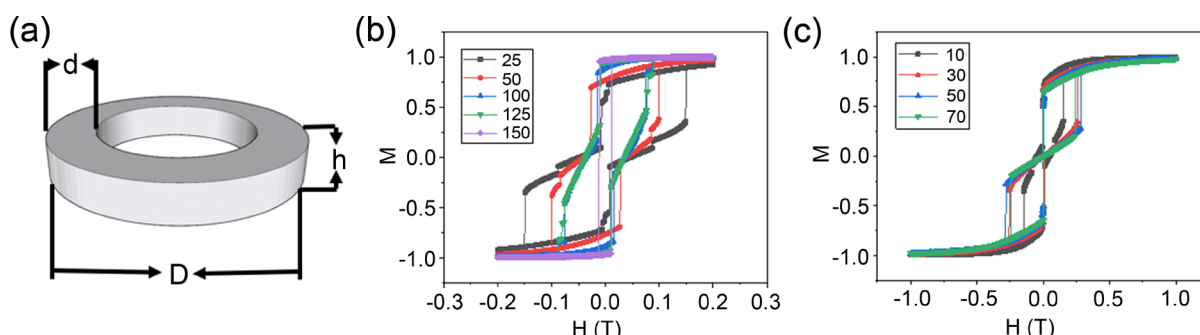
## 3. 模拟结果与讨论

### 3.1. $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 纳米环的磁化过程

用于微磁模拟的  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  纳米材料的物理参数为标准坡莫合金参数: 饱和磁化强度  $M_s = 5 \times 10^5 \text{ A/m}$ ,

交换常数  $A = 13 \times 10^{-12} \text{ J/m}$ , 阻尼系数  $\alpha = 0.015$  和磁晶各向异性常数  $K_1 = K_2 = 0$ 。图 1(a)中展示了微磁学模拟所用的纳米环模型, 纳米环外径  $D$  为 300 nm, 模拟中纳米环宽度  $d$  分别为 25 nm、50 nm、100 nm、125 nm 和 150 nm, 厚度  $h$  分别为 10 nm、30 nm、50 nm 和 70 nm。在这里我们需要注意, 当  $d = 150 \text{ nm}$  时, 纳米环消失, 模型为圆形纳米薄膜。

在图 1(b)中, 我们可以观测到, 当  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 150 \text{ nm}$ 、 $h = 10 \text{ nm}$  时, 磁滞回线为典型的坡莫合金构型, 拥有较小的矫顽力, 表现出良好的软磁特性。当  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $h = 10 \text{ nm}$ 、 $d = 125/100/50/25 \text{ nm}$  时, 磁滞回线展示出多重磁化状态, 并且随着宽度  $d$  的减小, 纳米环矫顽力逐渐增大, 亚稳态更易成型, 且低场下磁矩不易饱和。图 1(c)中, 我们模拟了  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 100 \text{ nm}$ 、 $h = 10/30/50/70 \text{ nm}$  时,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  纳米环的磁滞回线。随着厚度  $d$  的增加, 纳米环矫顽力逐渐增大, 亚稳态更易形成且更加的稳定, 不易受外磁场的影响。



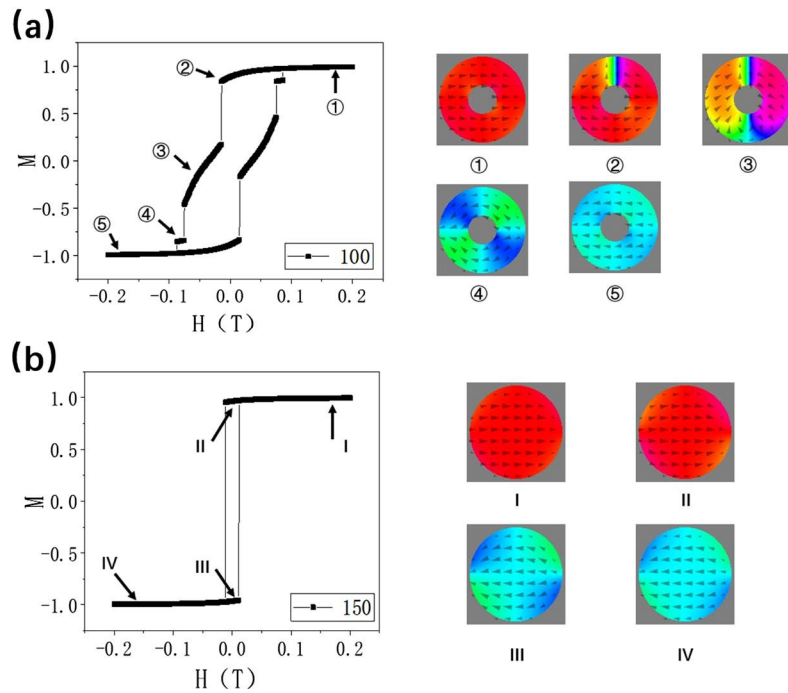
**Figure 1.** (a) Micromagnetic simulation nanoring model. (b)  $D = 300 \text{ nm}$ ,  $d = 25/50/100/125/150 \text{ nm}$ ,  $h = 10 \text{ nm}$ , the hysteresis loops of  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  nanorings. (c)  $D = 300 \text{ nm}$ ,  $d = 100 \text{ nm}$ ,  $h = 10/30/50/70 \text{ nm}$ , the hysteresis loops of  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  nanorings

**图 1.** (a) 微磁模拟纳米环模型。(b)  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 25/50/100/125/150 \text{ nm}$ 、 $h = 10 \text{ nm}$  时,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  纳米环的磁滞回线。(c)  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 100 \text{ nm}$ 、 $h = 10/30/50/70 \text{ nm}$  时,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  纳米环的磁滞回线

为了进一步明确纳米环在外磁场下, 畴壁的位移、产生及湮灭的过程, 我们分别对  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 100 \text{ nm}$ 、 $h = 10 \text{ nm}$  的纳米环与  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 150 \text{ nm}$ 、 $h = 10 \text{ nm}$  的圆形纳米薄膜进行磁滞回线模拟及磁化翻转相图的动态观测。模拟结果分别表示在图 2(a)和图 2(b)。图 2(b)磁滞回线中罗马数字(I、II、III 和 IV)对应的磁矩状态表示在图 2(b)右侧, 可以明显观测到, 随着磁场方向的反转, 圆形坡莫合金纳米薄膜由一个单畴态直接突变为另一个单畴态。然而对于  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 100 \text{ nm}$ 、 $h = 10 \text{ nm}$  的纳米环, 磁矩翻转过程中存在多种稳定状态, 磁滞回线及磁矩翻转相图微磁学模拟结果表示在图 2(a)。为了获得磁化翻转过程的精确信息, 我们选择了磁矩翻转过程中具有代表性的中间时刻。当磁矩达到饱和后, 纳米环呈现洋葱态(onion state), 对应于图 2(a)中的过程①和⑥。过程③对应为另外一种稳态 - 涡旋态(vortex state), 在涡旋态下, 纳米环的磁化强度沿着环排列, 可以是顺时针方向, 也可以是逆时针方向, 并且呈现出磁通量闭合的状态。由洋葱态变为涡旋态的这一过程, 并不是通过畴壁运动形成的, 而是通过直接反转洋葱态的磁畴来实现的, 图 2(a)中过程②表示了洋葱态磁畴反转的中间过程, 纳米环上方畴壁先产生, 而后下方畴壁产生。除了洋葱型和涡旋型两种稳态外, 我们还可以观察到从一种稳态转变为另一种稳态时出现的亚稳态, 图 2(a)中过程④表示, 在磁场的驱动下, 涡旋态转变为洋葱态的过程中, 纳米环上下两侧头对头的磁畴壁在同时出现, 然后沿着纳米环逆时针旋转, 并逐步沿外磁场排列, 最终形成洋葱态。

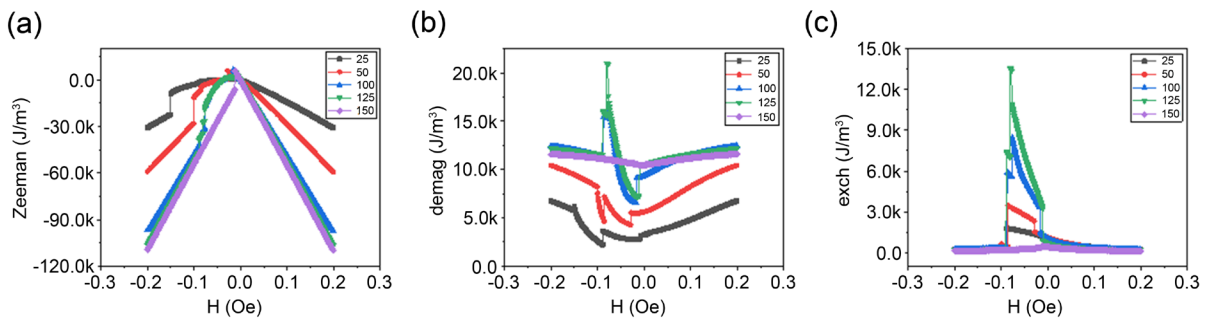
我们通过分析不同尺寸下  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  纳米环退磁能密度和交换能密度与外磁场的关系, 解释了由洋葱态 - 涡旋态 - 洋葱态这一过程中亚稳态出现的原因及畴壁的产生、移动和湮灭。如图 3(a), 模拟结果表明, 当外磁场由正向最大减小时, 不同尺寸的  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  纳米环塞曼能密度减小, 退磁能密度减小, 交换能密度

增大。同样大小的外场下，纳米环宽度  $d$  增大，所对应的塞曼能密度和交换能密度增大，这就解释了图 1(b) 中，随着纳米环宽度减小，矫顽力增大，但磁化强度却减小。如图 3(b)和图 3(c)，当磁场为  $-168$  Oe 时，交换能密度与退磁能密度瞬间增大，且单调递增直到外磁场为  $-773$  Oe，对应于图 2(a)中过程③，由洋葱态变为涡旋态。交换能有利于在纳米材料中形成旋涡态，且切换过程不是通过畴壁运动，而是通过直接反转洋葱态的畴来实现。在图 3 中，外磁场为  $-774$  Oe 直到  $-877$  Oe，交换能减小，而塞曼能与退磁能增加，磁矩倾向于沿外磁场排列，头对头磁畴壁形成，表现为涡旋态转换为洋葱态中间亚稳态出现，对应于图 2(a)中过程④。随着外磁场继续增大，交换能密度趋向于  $0 \text{ J/cm}^3$ ，塞曼能与退磁能增加，但塞曼能增加速率远大于退磁能增加速率，磁矩几乎全部沿外磁场排列，完成由涡旋态到洋葱态的转换。



**Figure 2.** (a) Hysteresis loop and magnetic moment reversal phase diagram of  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  nanoring with  $D = 300 \text{ nm}$ ,  $d = 100 \text{ nm}$ ,  $h = 50 \text{ nm}$ . (b) Hysteresis loop and magnetic moment reversal phase diagram of  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  circular nano films with  $D = 300 \text{ nm}$ ,  $d = 150 \text{ nm}$ ,  $h = 50 \text{ nm}$

**图 2.** (a)  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 100 \text{ nm}$ 、 $h = 50 \text{ nm}$   $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  纳米环磁滞回线及磁矩翻转相图。(b)  $D = 300 \text{ nm}$ 、 $d = 150 \text{ nm}$ 、 $h = 50 \text{ nm}$   $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  圆形纳米薄膜磁滞回线及磁矩翻转相图



**Figure 3.** (a) The relationship between Zeeman energy density and external field of nanorings with different widths. (b) The relationship between demagnetization energy density and external field of nanorings with different widths. (c) The relationship between exchange energy density and external field of nanorings with different widths

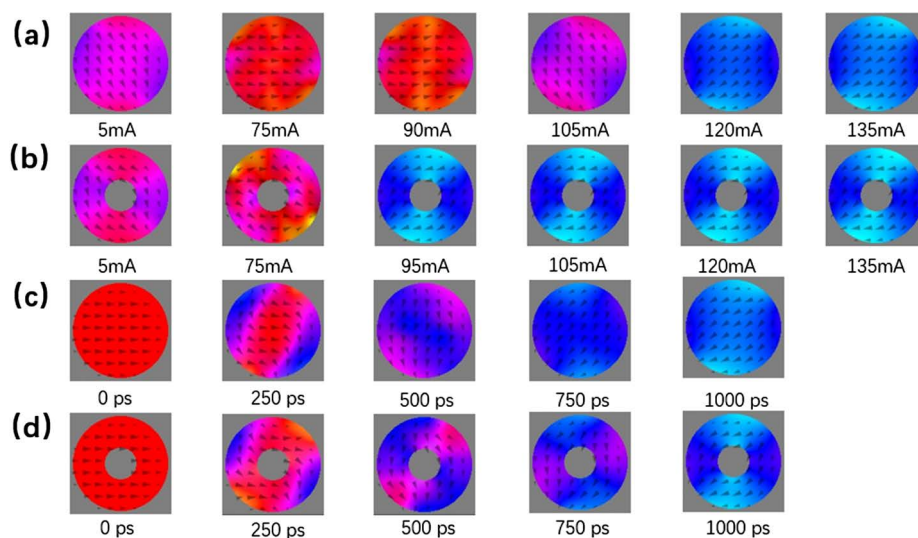
**图 3.** (a) 不同宽度纳米环塞曼能密度与外场的关系。(b) 不同宽度纳米环退磁能密度与外场的关系。(c) 不同宽度纳米环交换能密度与外场的关系



### 3.2. $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 纳米环隧道结

对于传统矩形和椭圆形结构的磁性隧道结，磁体边缘更易形成磁畴，且具有杂散场，不同存储单元之间相互影响，不利于高密度存储器的制备[7] [8]。虽然圆形结构隧道结可以形成涡旋态，解决了边缘磁畴的出现及杂散场这一问题，但是圆形结构存在一个高能且磁矩不平行于面内的涡旋核，在加外磁场时，翻转过程就会受到涡旋核的影响，从而变得复杂[9] [10]。相对而言，纳米环结构隧道结具有以下优点：① 纳米环结构隧道结无杂散场且没有涡旋核出现，翻转过程简单且存储密度高；② 纳米环结构具有涡旋态和洋葱态两种构型，拥有更为丰富的磁学特性；③ 环形器件在输入电流时，可以产生奥斯场，辅助磁矩翻转，拥有更小的翻转电流密度。

进一步研究磁性纳米环在磁存储器件中的应用，我们模拟了  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)隧道结在极化电流下磁矩的翻转过程。隧道结的构型为纳米环和圆盘形纳米薄膜，外径  $D = 300$  nm、 $d = 100$  nm，底层  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  磁矩设定为与+X轴夹角为  $270^\circ$ ，顶层  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  磁矩方向与+X方向平行。输入电流沿+Z方向，经过底层  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  后，电流变为极化电流，极化方向与+X轴夹角为  $270^\circ$ ，经过Cu层后转矩作用在顶层  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 。模拟结果表示在图4，对比图4(a)与图4(b)，纳米环中输入电流达到 95 mA 时，对应的电流密度为  $3.4 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>，磁矩完成翻转；而对于同样规格的圆盘形纳米薄膜，电流需要达到 135 mA 才可以翻转磁矩，对应的电流密度为  $5.4 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>。纳米环实现磁矩翻转所需的临界电流密度为圆盘形纳米薄膜的 0.63 倍，产生这一现象的原因是，当环形器件在输入电流时，可以产生奥斯场，辅助磁矩翻转，拥有更小的翻转电流密度。同时我们对比了磁矩翻转所需的时间，两者无明显差别，大约为 1000 ps，如图4(c)与图4(d)，这主要是由于对于同一种材质样品，磁矩的进动频率相同。



**Figure 4.** (a) The phase diagrams of  $D = 300$  nm,  $d = 150$  nm,  $h = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm) tunnel junctions are flipped by magnetic moment under different polarization currents. (b) The magnetic moment reversal phase diagram of  $D = 300$  nm,  $d = 100$  nm,  $h = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm) tunnel junctions under different polarization currents are studied. (c) The magnetic moment states of  $D = 300$  nm,  $d = 150$  nm,  $h = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm) tunnel junctions at different time under 135 Ma polarization current. (d) The magnetic moment states of  $D = 300$  nm,  $d = 100$  nm,  $h = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm) tunnel junctions with 95 mA polarization current have different magnetic moments

**图 4.** (a)  $D = 300$  nm、 $d = 150$  nm、 $h = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)隧道结在不同极化电流下磁矩翻转相图。(b)  $D = 300$  nm、 $d = 100$  nm、 $h = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)隧道结在不同极化电流下磁矩翻转相图。(c)  $D = 300$  nm、 $d = 150$  nm、 $h = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)隧道结在 135 mA 极化电流下，不同时间磁矩的状态。(d)  $D = 300$  nm、 $d = 100$  nm、 $h = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)隧道结在 95 mA 极化电流下，不同时间磁矩的状态

## 4. 结论

综上所述, 通过 MuMax3 微磁模拟研究了  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  磁性纳米环的磁化过程。通过大量的计算, 说明了  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  磁性纳米环的磁矩翻转与纳米环物理尺寸的关系, 包括宽度和厚度。在磁矩由涡旋态变为洋葱态的过程中,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  磁性纳米环出现了一种新的亚稳态, 这一现象的出现是由于交换能的减小, 而退磁能与塞曼能的陡增, 磁畴壁逆时针运动到纳米环左右两侧。同时我们研究了电流驱动  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm)/Cu (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2.5 nm) 磁性隧道结磁矩翻转, 发现纳米环隧道结磁矩翻转所需的电流密度是圆盘状纳米薄膜的 0.63 倍, 这一结果归因为奥斯场辅助磁矩翻转和纳米环避免了漩涡核的出现, 磁矩翻转所需的时间, 两者无明显差别, 大约为 1000 ps。

## 致 谢

感谢国家自然科学基金资助项目(项目编号: 50902110)。

## 参考文献

- [1] Casta, O., Frandsen, C., *et al.* (2003) Metastable States in Magnetic Nanorings. *Physical Review B*, **67**, Article ID: 184425. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.184425>
- [2] Ross, C.A., Farhoud, M., Hwang, M., *et al.* (2001) Micromagnetic Behavior of Conical Ferromagnetic Particles. *Journal of Applied Physics*, **89**, 1310-1319. <https://doi.org/10.1063/1.1331656>
- [3] Giesen, F., Podbielski, J., Botters, B., *et al.* (2007) Vortex Circulation Control in Large Arrays of Asymmetric Magnetic Rings. *Physical Review B*, **75**, Article ID: 184428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.184428>
- [4] Landeros, P., Escrig, J., Altbir, D., *et al.* (2006) Stability of Magnetic Configurations in Nanorings. *Journal of Applied Physics*, **100**, Article ID: 044311. <https://doi.org/10.1063/1.2218997>
- [5] Benatmane, N., Scholz, W. and Clinton, W. (2007) Magnetic Configurations and Phase Diagrams of Sub-100-nm NiFe Nanorings. *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**, 2884-2886. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.892867>
- [6] Oreci, E. (2018) Installing Mumax 3.9.1 and Gnuplot 5.2 in Windows 10 Step by Step. Reserachgate.
- [7] Khvalkovskiy, V., Apalkov, D., Watts, S., *et al.* (2013) Basic Principles of STT-MRAM Cell Operation in Memory Arrays. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **46**, Article ID: 074001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/7/074001>
- [8] Wang, L., Alzate, J.G. and Khalili, A.P. (2013) Low-Power Non-Volatile Spintronic Memory: STT-RAM and Beyond. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **46**, Article ID: 074003. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/7/074003>
- [9] Yamada, K., Kasai, S., Nakatani, Y., *et al.* (2007) Electrical Switching of the Vortex Core in a Magnetic Disk. *Nature Materials*, **6**, 270-273. <https://doi.org/10.1038/nmat1867>
- [10] Xiao, Q.F., Rudge, J., Choi, B.C., *et al.* (2006) Dynamics of Vortex Core Switching in Ferromagnetic Nanodisks. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 262507. <https://doi.org/10.1063/1.2424673>