

低温钴纳米双环体系磁特性研究

李弘¹, 李来政¹, 柯晓清¹, 丁俊哲¹, 陈可欣¹, 陈水源^{1,2}, 叶晴莹^{1,2*}

¹福建师范大学物理与能源学院, 福建 福州

²福建半导体光电材料及其高效转换器件协同创新中心, 福建 厦门

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月13日; 发布日期: 2026年4月20日

摘要

通过蒙特卡罗方法(MC)与快速傅里叶变换微磁学(FFTM)方法模拟了50 K下钴纳米双环体系的磁化动力学, 研究发现, 低温时, 系统呈现明显的双稳态特征, 即“洋葱态”和“涡旋态”, 磁滞回线清晰。研究成果对低温磁性纳米环体系计算和低温磁存储技术等领域的应用具有一定意义。

关键词

蒙特卡罗方法, 快速傅里叶变换微磁学方法, 纳米双环系统, 磁特性

Study on the Magnetic Properties of the Cobalt Dual-Nanoring System at Low Temperatures

Hong Li¹, Laizheng Li¹, Xiaoqing Ke¹, Junzhe Ding¹, Kexin Chen¹, Shuiyuan Chen^{1,2}, Qingying Ye^{1,2*}

¹College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

²Fujian Provincial Collaborative Innovation Central for Optoelectronic Semiconductors and Efficient Devices, Xiamen Fujian

Received: March 13, 2026; accepted: April 13, 2026; published: April 20, 2026

Abstract

The magnetization dynamics of the cobalt dual-nanoring system at 50 K were simulated using the Monte Carlo (MC) method and the Fast Fourier Transform Micromagnetics (FFTM) method. The results indicate that at low temperatures, the system exhibits distinct bistable magnetic behavior,

*通讯作者。

文章引用: 李弘, 李来政, 柯晓清, 丁俊哲, 陈可欣, 陈水源, 叶晴莹. 低温钴纳米双环体系磁特性研究[J]. 应用物理, 2026, 16(4): 360-365. DOI: 10.12677/app.2026.164033

characterized by “onion” and “vortex” states, with well-defined hysteresis loops. These findings are significant for the study of low-temperature magnetic nanoring systems and their potential applications in areas such as low-temperature magnetic storage technologies.

Keywords

Monte Carlo Method, Fast Fourier Transform Micromagnetics Method, Cobalt Dual-Nanoring, Magnetic Properties

Copyright © 2026 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

磁性材料因其独特的高矫顽力、宏观量子隧道效应及超顺磁性，在量子计算与生物医学等领域展现出重要应用前景。在量子信息领域，磁性材料已被用于构建超导纳米线存储器与量子计算硬件[1][2]；在生物医学领域，其在肿瘤靶向治疗、组织再生及磁共振成像对比剂等方面的应用亦取得显著进展[3]。其中，磁性纳米环因其特殊的拓扑结构及丰富的磁化动力学行为，成为凝聚态物理与自旋电子学领域的研究热点。早期研究表明，单畴磁性粒子在低温下的磁化弛豫行为具有显著的量子特性。Prokofev 与 Stamp 的理论工作指出，当温度低于磁各向性能垒时，系统量子隧穿效应主导的弛豫过程强烈依赖于核自旋环境[4]。在此基础上，张鑫源等采用 Monte Carlo 方法模拟了铁纳米环在 100 K 温度下的磁滞特性，揭示了低温下“双稳态”磁化行为及从“洋葱态”到“涡旋态”的自旋组态转变[5]。实验方面，Lee 等在 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 纳米环中观测到低温输运特性，于 50 mK 下测得铁磁材料相干长度约为 500 nm，并在 380 nm 银环中观测到周期为 37~40 Oe 的 Aharonov-Bohm 振荡[6]。这些研究为理解纳米环的低温量子磁特性奠定了重要基础，然而，针对低温纳米环阵列系统的系统性研究仍有待深入。

鉴于此，本研究采用 Monte Carlo 方法结合快速傅里叶变换微磁学(FFTM)方法，对 50 K 温度下纳米环阵列的磁特性进行理论计算。该方法在保持计算精度的同时显著提升了运算效率，可为相关实验设计提供可靠的理论指导。

2. 模型与方法

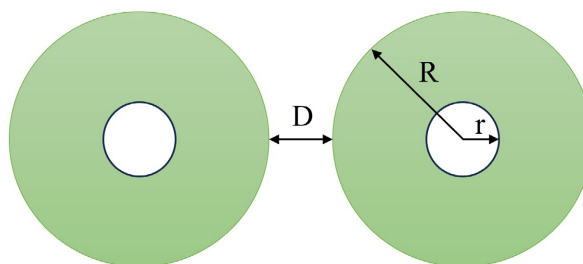


Figure 1. Cobalt-based nanohoop model

图 1. 钴纳米双环体系模型

本研究构建的钴纳米双环体系几何模型如图 1 所示。阵列中纳米环的外半径 $R = 100 \text{ nm}$ ，内半径 r 可调，厚度为 10 nm，相邻纳米环之间的间距为 $D = 20 \text{ nm}$ 。采用有限元算法将空间划分为规则球体单元，

球体直径为 10 nm。

Heisenberg 模型中体系的哈密顿量表示如下式:

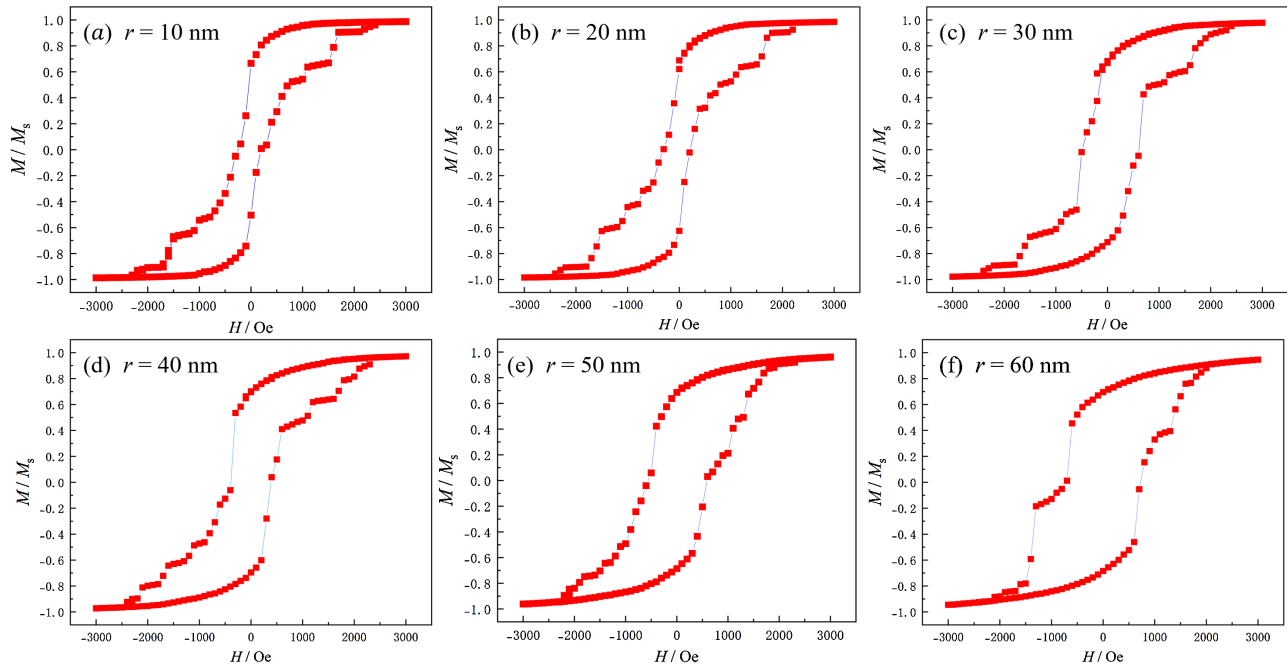
$$E = -\sum_{ij} J \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j + D \left[\sum_{ij} \frac{\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j}{r_{ij}^3} - 3 \frac{(\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{r}_{ij})(\mathbf{S}_j \cdot \mathbf{r}_{ij})}{r_{ij}^5} \right] - K v_0 \sum_i (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{u}_i)^2 - M_s v_0 H \sum_i \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{h}$$

式中各项物理含义如下: 第一项为最近邻交换相互作用能, \mathbf{S}_i 表示第 i 个原子的自旋矢量, 交换耦合常数 $J = 2Ad_1\pi/6$, 其中 d_1 为离散化小球直径, A 为交换相互作用常数; 第二项为长程偶极相互作用能, $D = (M_s v_0)^2/2$ 为偶极相互作用系数, 其中 M_s 为饱和磁化强度, $v_0 = \pi d_1^3/6$ 为单个小球体积, \mathbf{r}_{ij} 代表第 i 个自旋与第 j 个自旋之间的位移矢量; 第三项为单轴磁晶各向异性能, K 为磁各向异性常数, \mathbf{u}_i 为第 i 个自旋的易磁化轴单位矢量; 第四项为塞曼能, H 为外磁场强度, \mathbf{h} 为外场方向单位矢量。其中最近邻交换相互作用能、各向异性能、塞曼能采用蒙特卡罗方法(MC)模拟计算; 长程偶极相互作用能采用快速傅里叶变换微磁学方法(FFTMM)计算。由于偶极能项涉及所有自旋对的长程作用, 计算量巨大。利用快速傅里叶变换微磁学方法(FFTMM)可极大地提升计算速度[7]-[9]。在计算模拟时, 抛弃前 20,000 MC 步, 对后面的 30,000 MC 步求平均[9]。

针对钴纳米环体系, 模拟采用的具体参数为: $A = 1.3 \times 10^{-15} \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}$, 饱和磁化强度 $M_s = 1.43 \times 10^6 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, 磁各向异性常数 $K = 0$ (多晶钴磁晶各向异性近似取 0) [7]。外磁场沿 x 轴正方向(水平向右)施加, 温度固定为 $T = 50 \text{ K}$, 外场扫描范围为 -3000 Oe 至 $+3000 \text{ Oe}$ [9]。本文通过模拟钴纳米双环体系在该条件下的磁化反转过程, 系统分析其磁滞特性及自旋组态演化规律。

3. 结果与讨论

图 2、图 3 分别展示了不同内径钴纳米环在 $T = 50 \text{ K}$ 下和 $T = 300 \text{ K}$ 下的磁滞回线。如图所示, 不同几何尺寸的纳米环均呈现典型的“双稳态”磁化特征, 具体表现为高场区的近饱和态(洋葱态)与低场区的稳定态(涡旋态) [9]。值得注意的是, 低温下双稳态之间的过渡态明显比常温下的过渡态增加[10]。这一行为特征与铁纳米环在低温下的磁化行为相似[11], 同时体现了低温环境下磁化反转的特性[12]。



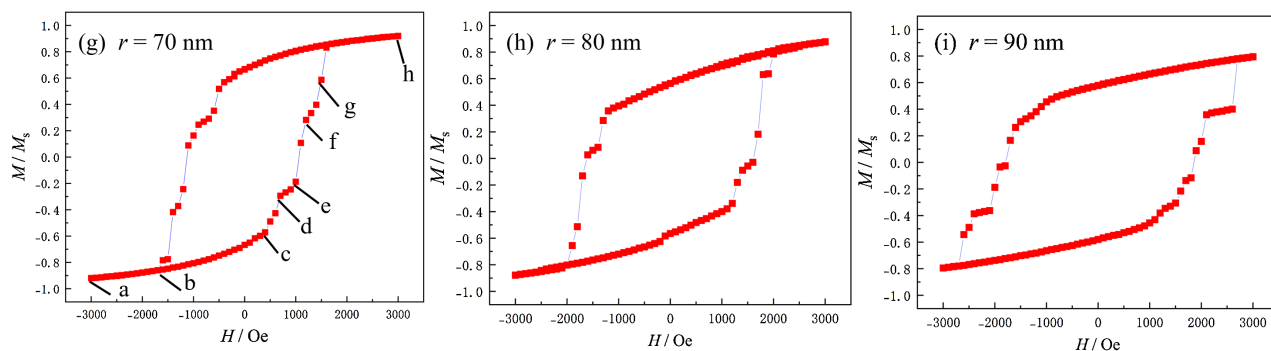


Figure 2. Hysteresis loops of cobalt nanohoop arrays with different inner radii at $T = 50$ K

图 2. 不同内半径钴纳米环阵列磁滞回线($T = 50$ K)

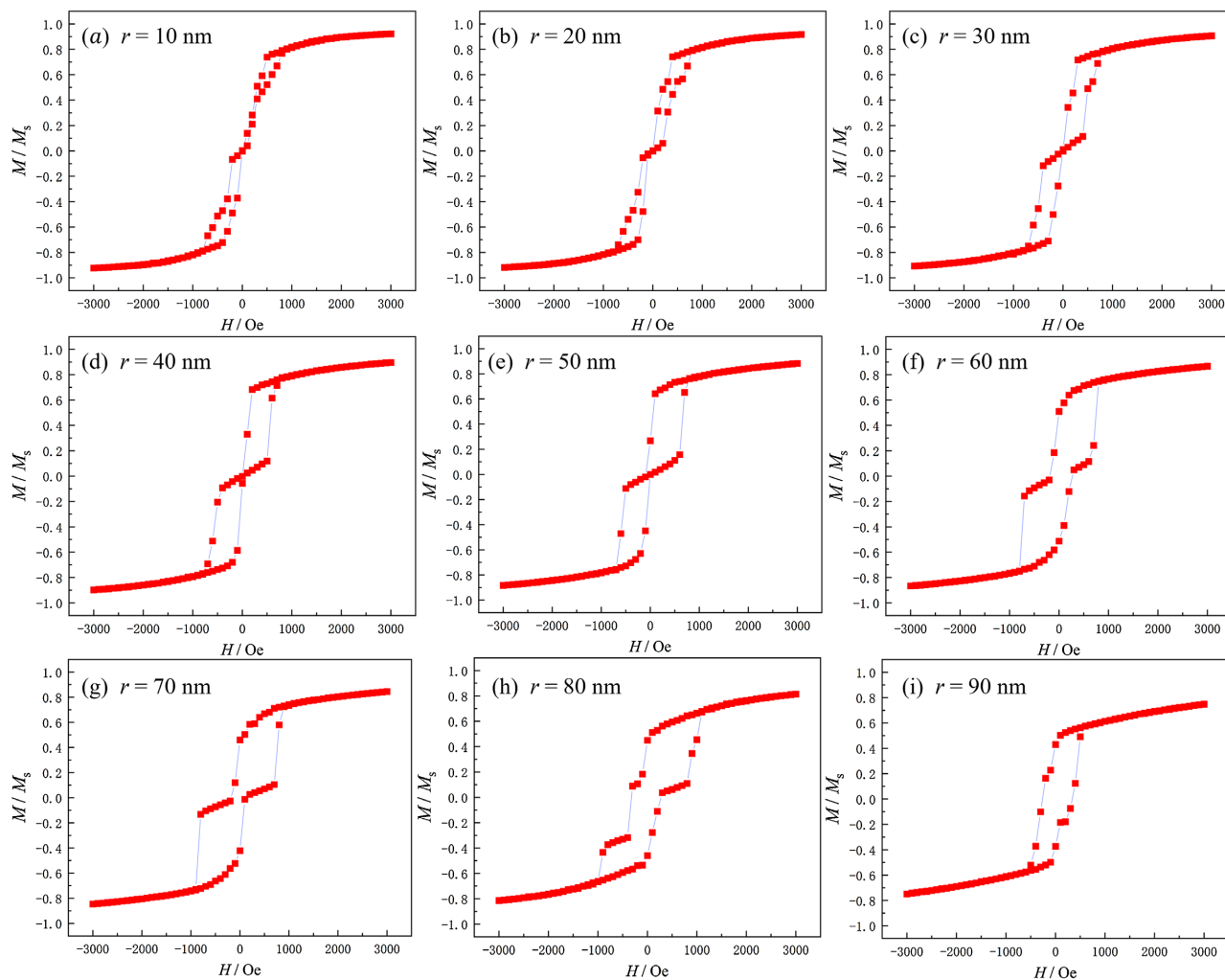


Figure 3. Hysteresis loops of cobalt nanohoop arrays with different inner radii at $T = 300$ K

图 3. 不同内半径钴纳米环阵列磁滞回线($T = 300$ K)

为揭示低温下纳米环的磁化反转微观机制, 本文针对图 2(g)所示几何参数($r = 70$ nm)的钴纳米环, 系统模拟了外场从 -3000 Oe 扫描至 $+3000$ Oe 过程中的典型自旋组态演化, 结果如图 4 所示。

图 4 为图 2(g)中各对应点的自旋组态。从图 4 中可以看到, 当 $H = -3000$ Oe 时(图 2(g)的 a 点), 其自

旋组态为“洋葱态”，如图 4(a)所示；随着 H 的减小，当 $H=400$ Oe 时(图 2(g)的 c 点)，出现了两个“局部涡旋”，两个涡旋均为逆时针状态；如图 4 (c)所示。当 $H=700$ Oe 时(图 2(g)的 d 点)，“局部涡旋”右移，如图 4(d)所示；随着 H 的继续增大，当 $H=1000$ Oe 时(图 2(g)的 e 点)，纳米环呈现“涡旋态”，“局部涡旋”由两个增加至四个，“局部涡旋”右移，如图 4(e)所示。当 $H=1200$ Oe 时(图 2(g)的 f 点)，纳米环呈“涡旋态”且“局部涡旋”由四个减少至三个，消失的“局部涡旋”下移，直至湮灭至系统下方，如图 4(f)所示；但继续增大磁场，当 $H=1500$ Oe 时(图 2(g)的 g 点)，钴纳米环两侧原子自旋方向随磁场增大开始发生变化，其自旋组态为“反向洋葱态”，“局部涡旋”由三个减少至两个，如图 4(g)所示；当 $H=3000$ Oe 时(图 2(g)的 h 点)，纳米环也呈“反向洋葱态”，“局部涡旋”全部湮灭。在“洋葱态”和“涡旋态”之间出现“局部涡旋态”为系统“双稳态”之间的过渡状态。

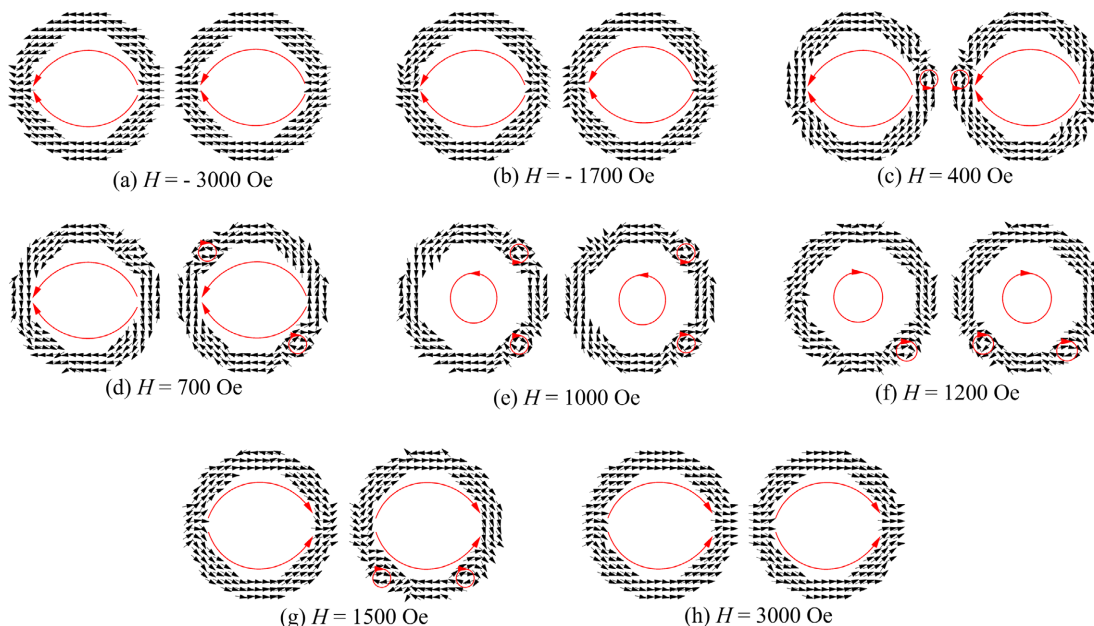


Figure 4. Spin configurations of cobalt (Co) nanoring arrays with $r = 70$ nm at $T = 50$ K
图 4. $r = 70$ nm 时钴纳米环阵列自旋组态($T = 50$ K)

4. 结论

本文采用蒙特卡罗(MC)方法与快速傅里叶变换微磁学(FFTM)方法相结合的技术，模拟了 50 K 温度下钴纳米环阵列的磁化过程，并系统分析其磁特性。模拟结果显示：不同内半径的钴纳米环系统，在磁化反转过程中均呈现“双稳态”特征；“涡旋态”的形成与稳定性，与纳米环的内径密切相关；上述模拟结果可通过系统的自旋组态得到合理解释，为纳米双环体系相关实验的开展提供了有价值的理论参考。

需要指出的是，本研究聚焦于低温下钴纳米双环体系的基础磁特性模拟，旨在揭示其磁化反转的微观机制与自旋组态演化规律。尽管该体系在低温磁存储等领域展现出潜在的应用前景，但实际器件的实现仍面临诸多挑战，如纳米环阵列的制备精度、低温环境下的热稳定性、以及偶极相互作用对器件一致性的影响等。上述问题的解决尚需进一步的理论与实验研究。

基金项目

福建省自然科学基金(2024J01298)，福建省自然科学基金(2025J01656)，大学生创新创业训练计划项目(cxxl-2025418)资助项目。

参考文献

- [1] Medeiros, O., Castellani, M., Karam, V., Foster, R., Simon, A., Incalza, F., *et al.* (2026) A Scalable Superconducting Nanowire Memory Array with Row-Column Addressing. *Nature Electronics*, **9**, 69-77. <https://doi.org/10.1038/s41928-025-01512-0>
- [2] Latyshev, A., Semenov, A.G. and Zaikin, A.D. (2020) Superconductor-Insulator Transition in Capacitively Coupled Superconducting Nanowires. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, **11**, 1402-1408. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.124>
- [3] 陈小勇, 刘晓丽, 樊海明. 磁性纳米材料的生物医学应用[J]. *物理*, 2020, 49(6): 381-389.
- [4] Bahri, A.M. and Kamiyani, A.S. (2025) Harnessing Magnetic Properties for Precision Thermal Control of Vortex Domain Walls in Constricted Nanowires. *Nanomaterials*, **15**, Article 372. <https://doi.org/10.3390/nano15050372>
- [5] 张鑫源, 王雅静, 黄秋怡, 刘婕妤, 王文祥, 叶晴莹. 低温纳米环磁特性研究[J]. *应用物理*, 2020(3): 186-190.
- [6] Lee, S. (2008) Electron Transport in Ferromagnetic Nanostructures. Doctoral Dissertation, Rice University.
- [7] Ye, Q., Chen, S., Liu, J., Huang, C., Huang, S. and Huang, Z. (2016) Study of Magnetic Properties for Co Double-Nanorings: Monte Carlo Simulation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **408**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.01.089>
- [8] 钟克华, 冯倩, 翁臻臻, 等. 快速傅立叶变换微磁学方法[J]. *计算物理*, 2005, 22(6): 534-538.
- [9] Ye, Q., Chen, S., Zhang, J., Li, M. and Huang, Z. (2019) Numerical Simulation of Magnetic Properties for Co Asymmetric Nanorings. *International Journal of Modern Physics B*, **33**, Article 1950155. <https://doi.org/10.1142/s0217979219501558>
- [10] Castaño, F.J., Ross, C.A., Frandsen, C., Eilez, A., Gil, D., Smith, H.I., *et al.* (2003) Metastable States in Magnetic Nanorings. *Physical Review B*, **67**, 184425-184430. <https://doi.org/10.1103/physrevb.67.184425>
- [11] 林枝钦. 纳米环磁特性的数值计算[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2009.
- [12] 叶晴莹. 纳米环磁化动力学研究[D]: [博士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2019.