

双层堆叠纳米环磁特性的研究

黄倩南¹, 何雨洁¹, 范春龙¹, 温昌林¹, 薛宇宸¹, 吴雪婷¹, 陈水源^{1,2}, 黄志高^{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福建省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: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年5月6日; 发布日期: 2023年5月12日

摘要

基于蒙特卡洛(MC)方法与快速傅里叶变换微磁学(FFTM)方法, 研究了厚度不同钴纳米环的磁化特性。模拟结果表明, 纳米环堆叠时, 系统的磁化过程存在“双稳态”特征, 在磁化翻转过程中出现局部涡旋态, 随着厚度的变化, 系统的自旋组态出现了更为丰富的过渡态, 整体的磁化过程更加复杂。

关键词

蒙特卡洛方法, 快速傅里叶变换微磁学方法, 纳米环, 厚度

Study on Magnetic Properties of Double Layer Stacked Nanorings

Qiannan Huang¹, Yujie He¹, Chunlong Fan¹, Changlin Wen¹, Yuchen Xue¹, Xueting Wu¹, Shuiyuan Chen^{1,2}, Zhigao Huang^{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: Mar. 20th, 2023; accepted: May 6th, 2023; published: May 12th, 2023

Abstract

Based on Monte Carlo (MC) method and Fast Fourier transform micromagnetics (FFTM) method, the magnetization characteristics of cobalt nanorings with different thickness were simulated. The simulation results show that the magnetization process of the system is bistable, and the local vortex state appears in the magnetization reversal process. With the change of the thickness, the

*通讯作者。

文章引用: 黄倩南, 何雨洁, 范春龙, 温昌林, 薛宇宸, 吴雪婷, 陈水源, 黄志高, 叶晴莹. 双层堆叠纳米环磁特性的研究[J]. 应用物理, 2023, 13(5): 190-194. DOI: 10.12677/app.2023.135022

spin configuration of the system appears more abundant transition states, and the overall magnetization process becomes more complex.

Keywords

Monte Carlo Method, Fast Fourier Transform Micromagnetic Method, Nanorings, Thickness

Copyright © 2023 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

近年来,磁性材料始终是科学界前沿领域的研究热点[1] [2],在生物医学、环境治理、信息存储等方面备受关注。在磁性材料中,纳米磁性材料以其独特作用和多样化的物理特性引起了许多科研人员的研究[3] [4] [5]。如2001年,Rothman发现,环状纳米系统存在着两种状态,即“涡旋态”和“洋葱态”,具有磁存储的特性[6];2010年,Fan等人研究了将纳米环作为多功能生物纳米探针的技术,这种基于涡旋态的纳米磁环结构在细胞成像和纳米探针方面有良好的应用[7];2013年,R. Farghadan等人研究了纳米环阵列的结构和磁性能,得出纳米环的厚度和直径随重复次数的增加而增大[8];2022年,Da Xianhong小组比较了三种不同形状的磁性纳米粒子,发现磁性纳米环具有更好的药物装载能力,更适合作为药物载体[9]。近年来,许多小组对纳米环的磁特性及内在的磁化机制产生了浓厚的兴趣[10] [11] [12]。在此基础上,分析双层堆叠纳米环的磁滞回线、自旋组态等磁特性具有重要的意义。

2. 模型与方法

模拟中双层堆叠钴纳米环的模型如图1,主要研究外半径 $R = 100 \text{ nm}$,内半径 $r = 20 \text{ nm}$,厚度 Z 从 $10 \text{ nm} \sim 20 \text{ nm}$ 的钴纳米环。

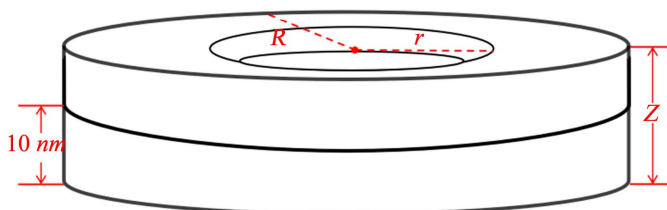


Figure 1. The model of double-layer stacked nanorings

图1. 双层堆叠纳米环模型

本研究通过快速傅里叶变换微磁学(FFTM)方法与蒙特卡洛(MC)方法的相互结合进行模拟计算[13] [14]。

计算中采用有限元算法,在海森堡模型(Heisenberg)下,体系的哈密顿量表示为[13]:

$$E = -\sum_{ij} JS_i \cdot S_j + D \left[\sum_{ij} \frac{S_i \cdot S_j}{r_{ij}^3} - 3 \frac{S_i \cdot r_{ij}}{r_{ij}^5} \right] - K_V (S_i \cdot u_i)^2 - M_V H \sum_i S_i \cdot h \quad (1)$$

公式中的字符设定和参数设置与文献[5]中一致。本工作通过改变堆叠层数得到不同层数纳米环层叠阵列的磁特性,分析得到系统的磁化动力学特征。

3. 结果与讨论

图 2 是不同厚度时内半径 $r = 20$ nm 的钴纳米环的磁滞回线。从图 2 中可以发现, 在钴纳米环厚度 Z 增大的过程中, 系统依然保持着“双稳态”特征, 即饱和态“onion”(洋葱)态及磁滞回线中间的台阶(“vortex”(涡旋)态) [13]。同时, 对于堆叠至 $Z = 20$ nm 的纳米环, 其磁滞回线在“双稳态”之间存在的过渡点明显增多, 这表明从“涡旋态”到“洋葱态”的过程中出现大量过渡的亚稳态[16]。

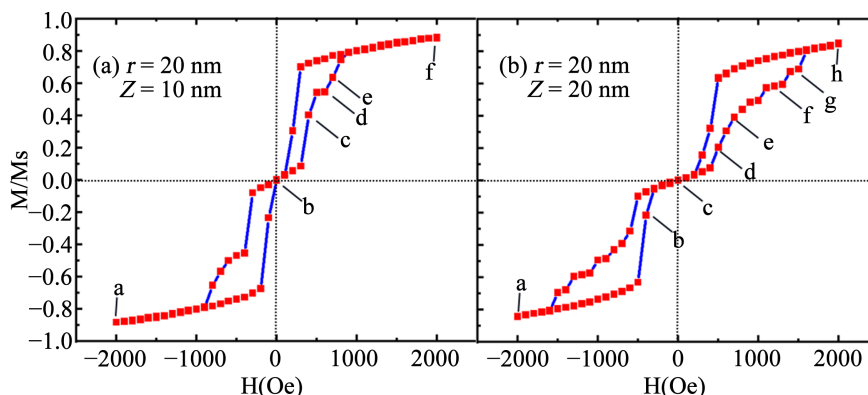


Figure 2. The hysteresis loops of cobalt nanorings with different Z values ($r = 20$ nm)
图 2. 不同 Z 值时钴纳米环的磁滞回线($r = 20$ nm)

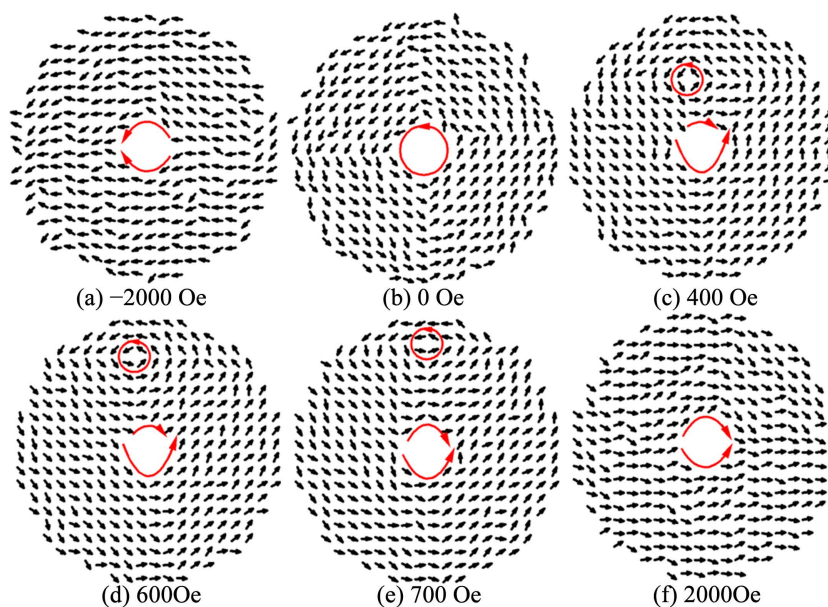


Figure 3. The typical spin configuration of cobalt nanorings with $r = 20$ nm and $Z = 10$ nm
图 3. 内半径为 20 nm, 厚度为 10 nm 的钴纳米环典型自旋组态

为了进一步研究图 2 中不同外场下系统的磁化情况, 我们模拟了磁化过程中钴纳米环的自旋组态。图 3(a)-(f)为图 2(a)磁化过程中不同外场作用下系统的自旋组态。

由于双层纳米环系统中两层的自旋组态几乎一致, 我们以其中的一层为自旋组态的代表。从图 3 中可以发现, 系统出现了纳米环典型的磁化状态: 洋葱态(如图 3(a)和图 3(f)所示)和涡旋态(如图 3(b)所示)。当外磁场 $H = -2000$ Oe 时(图 2(a)中 a 点), 纳米环呈现极化状态, 即系统出现“洋葱态”(如图 3(a))。出现这种现象的原因在于, 处于高场区中的纳米环, 其塞曼能在能量竞争中居于主导位置, 系统的自旋在

外场的作用下趋于外场方向, 因此系统在该位置出现“洋葱态”。随着外磁场的减小至 $H = 0$ Oe 时(图 2(a)中 b 点), 完整的“涡旋态”在系统中呈现(如图 3(b))。由于在低场区中系统的能量主要为交换能和偶极能, 能量之间的竞争使得系统出现“涡旋态”。之后, 当反向增大的外磁场 $H = 400$ Oe 时(图 2(a)中“c”的位置), 在纳米环中间偏左上方出现了逆时针“局部涡旋态”(如图 3(c)); 在外磁场从 400 Oe 增大至 700 Oe 的过程中(如图 3(c)-(e)所示), 系统的畴壁逐渐向上移动; 最后当 $H = 2000$ Oe 时(图 2(a)中“f”的位置), 在纳米环的上方边缘畴壁消失, 此时系统的自旋极化态再次呈现, 即形成了反向“洋葱态”(如图 3(f))。

为了分析厚度对钴纳米环磁化过程的影响, 图 4(a)-(h)对应为图 2(b)的磁化过程中不同外场下的自旋组态。从图 4 中可以看到, 厚度为 20 nm 的钴纳米环系统在磁化反转过程中也出现两种特征状态: 洋葱态(如图 4(a)和图 4(h)所示)和涡旋态(如图 4(c)所示), 并伴随着“局部涡旋态”的出现。当外磁场 $H = -2000$ Oe 时(图 2(b)的 a 点), 系统处于“洋葱态”(如图 4(a)); 由于外加磁场的减少时, 纳米环畴壁开始运动, 在 $H = -400$ Oe 时(图 2(b)中 b 点), “局部涡旋态”呈现在系统上方(如图 4(b)); 当外加磁场减小至 $H = 0$ Oe (图 2(b)中 c 点)时“局部涡旋态”消失, 形成一个“涡旋态”(如图 4(c)) [17]; 接着外场反向增加, 当外磁场增大至 $H = 500$ Oe 时(图 2(b)中 d 点), “涡旋态”消失, 在纳米环下半部分出现一个“局部涡旋”(如图 4(d)), 同时, 系统在此处出现了部分洋葱态的特征; 当外磁场继续增大到 $H = 1200$ Oe 时(图 2(b)的 f 点), 依然存在“局部涡旋”, 但位置已经发生了下移(如图 4(f)); 当 $H = 1500$ Oe 时(图 2(b)的 g 点), 一对“局部涡旋”在纳米环下方出现, 在外场作用下畴壁运动使其位置继续下移[15] (如图 4(g)); 最后, 当 $H = 2000$ Oe 时(图 2(b)中 h 点), 畴壁消失湮灭于纳米环下方, 反向“洋葱态”出现在系统中, 即纳米环再次呈现出极化状态[15] (如图 4(h))。

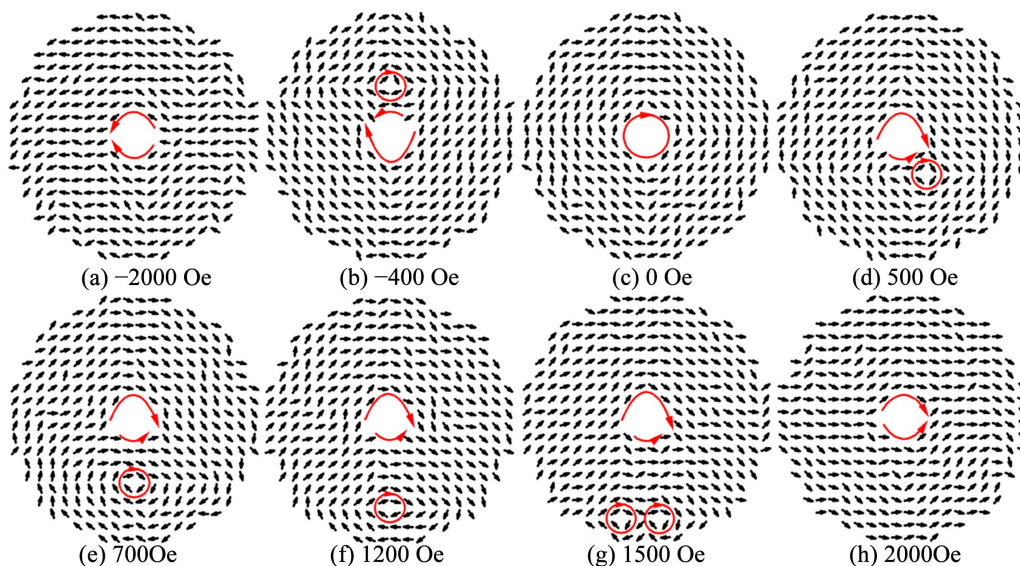


Figure 4. The typical spin configuration of cobalt nanorings with $r = 20$ nm and $Z = 20$ nm

图 4. 内半径为 20 nm, 厚度为 20 nm 的钴纳米环典型自旋组态

通过比较图 2、图 3 和图 4 可知, 厚度不同的钴纳米环系统的磁化过程之间存在着类似之处, 即均出现洋葱态、涡旋态以及局部涡旋态; 但随着厚度的堆叠, 纳米环磁化过程更为复杂, 过渡状态明显增加, 自旋组态具有更丰富的形式。

4. 结论

利用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法与快速傅里叶变换微磁学方法相结合的方式, 模拟了具有不同厚度

下内径为 20 nm 的钴纳米环的磁化过程。研究表明：钴纳米环系统在磁化过程中，均出现“涡旋”和“洋葱”态。但厚度大的钴纳米环自旋组态中出现了更多局部涡旋的过渡状态，系统涡旋态稳定性更低，即厚度变化会对纳米环的磁化反转机制以及“涡旋态”的稳定性有着重要的影响。模拟结果与实验结果接近。

基金项目

本论文得到福建省自然科学基金(2021J01191, 2020J01192), 福建师范大学大学生创新创业训练计划项目(cxxl-2022173)的资助。

参考文献

- [1] Hussain, B., Cottam, M.G. and Ge, B. (2022) Magnonic Bands in Periodic Arrays of Vertically-Stacked Cylindrical Magnetic Nanoelements. *Solid State Communications*, **342**, Article ID: 114588. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2021.114588>
- [2] Saavedra, E., Riveros, A. and Palma, J.L. (2021) Effect of Nonuniform Perpendicular Anisotropy in Ferromagnetic Resonance Spectra in Magnetic Nanorings. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 14230. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93597-8>
- [3] Liang, Y., Li, L., Lu, M., et al. (2018) Comparative Investigation of Sensing Behaviors between Gap and Lattice Plasmon Modes in a Metallic Nanoring Array. *Nanoscale*, **10**, 548-555. <https://doi.org/10.1039/C7NR07124H>
- [4] Yannouleas, C., Romanovsky, I. and Landman, U. (2015) Transport, Aharonov-Bohm, and Topological Effects in Graphene Molecular Junctions and Graphene Nanorings. *The Journal of Physical Chemistry C*, **119**, 11131-11142. <https://doi.org/10.1021/jp511934v>
- [5] Ye, Q., Chen, S., Liu, J., et al. (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>
- [6] Rothman, J., Kläui, M., Lopez-Diaz, L., et al. (2001) Observation of a Bi-Domain State and Nucleation Free Switching in Mesoscopic Ring Magnets. *Physical Review Letters*, **86**, 1098-1101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.1098>
- [7] Fan, H.-M., Olivo, M., Shuter, B., et al. (2010) Quantum Dot Capped Magnetite Nanorings as High Performance Nanoprobe for Multiphoton Fluorescence and Magnetic Resonance Imaging. *Journal of the American Chemical Society*, **132**, 14803-14811. <https://doi.org/10.1021/ja103738t>
- [8] Farghadan, R., Saffarzadeh, A. and Semiromi, E.H. (2013) Magnetic Edge States in Aharonov-Bohm Graphene Quantum Rings. *Journal of Applied Physics*, **114**, Article No. 214314. <https://doi.org/10.1063/1.4842715>
- [9] Da, X.H., Li, R.N., Li, X., Lu, Y.S., Gu, F.F. and Liu, Y. (2022) Synthesis and Characterization of PEG Coated Hollow Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles as a Drug Carrier. *Materials Letters*, **309**, Article ID: 131357. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131357>
- [10] Wang, Y., Yu, C., Li, Y., et al. (2022) In Vivo MRI Tracking and Therapeutic Efficacy of Transplanted Mesenchymal Stem Cells Labeled with Ferrimagnetic Vortex Iron Oxide Nanorings for Liver Fibrosis Repair. *Nanoscale*, **14**, 5227-5238. <https://doi.org/10.1039/D1NR08544A>
- [11] Das, R., Masa, J.A., Kalappattil, V., et al. (2021) Iron Oxide Nanorings and Nanotubes for Magnetic Hyperthermia: The Problem of Intraparticle Interactions. *Nanomaterials*, **11**, Article No. 1380. <https://doi.org/10.3390/nano11061380>
- [12] 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 No. 1950155. <https://doi.org/10.1142/S0217979219501558>
- [13] Ye, Q., Chen, S., Huang, S., et al. (2019) Magnetic Dynamic Properties of Defective Cobalt Nanorings: Monte Carlo Simulation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **473**, 301-305. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.038>
- [14] 钟克华, 冯倩, 翁臻臻, 黄志高. 快速傅立叶变换微磁学方法[J]. 计算物理, 2005, 22(6): 534-538.
- [15] 林枝钦. 纳米环的磁特性的数值计算[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2009.
- [16] Castano, F.J., Ross, C.A., Frandsen, C., et al. (2003) Metastable States in Magnetic Nanorings. *Physical Review B*, **67**, 184425-184430. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.184425>
- [17] Bekaert, J., Buntix, D., Van Haesendonck, C., et al. (2002) Noninvasive Magnetic Imaging and Magnetization Measurement of Isolated Mesoscopic Co Rings. *Applied Physics Letters*, **81**, 3413-3415. <https://doi.org/10.1063/1.1518564>