

Study of Magnetic Dynamic Properties for Defect Co Nanorings

Jingyao Liu, Shengkai Huang, Yanting Xu, Dingguo Zhuang, Jinling Wu, Qingying Ye*, Zhigao Huang

Fujian Provincial Key Laboratory of Quantum Manipulation and New Energy Materials, College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian
Email: *qyye@fjnu.edu.cn

Received: Apr. 20th, 2016; accepted: May 5th, 2016; published: May 10th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the Monte-Carlo simulation and fast Fourier transformation micro-magnetism method, the magnetic properties of Co nanorings with different defect locations are studied. The simulation results show that the magnetic properties of the nanorings with small defect degree are similar to those of symmetric nanorings. With the defect degree increasing, the magnetic dynamic behavior of defect nanorings is obviously different from that of symmetric nanorings. The results also indicate that the defect system keeps the main magnetic characteristic of the symmetric nanorings (such as vortex state and onion state). Compared to the symmetric nanorings, the stability of defect nanorings is weak. Furthermore, with the defect degree increasing, the number of transition states in nanoring system increases, and magnetization process becomes complex.

Keywords

Monte-Carlo Simulation, Defect Nanorings, Hysteresis Loop, Spin Configuration

缺陷钴纳米环磁化动力学研究

刘劲尧, 黄盛凯, 许燕婷, 庄定国, 吴金铃, 叶晴莹*, 黄志高

福建师范大学物理与能源学院, 福建省量子调控与新能源材料重点实验室, 福建 福州
Email: *qyye@fjnu.edu.cn

*通讯作者。

文章引用: 刘劲尧, 黄盛凯, 许燕婷, 庄定国, 吴金铃, 叶晴莹, 黄志高. 缺陷钴纳米环磁化动力学研究[J]. 应用物理, 2016, 6(5): 100-105. <http://dx.doi.org/10.12677/app.2016.65014>

收稿日期：2016年4月20日；录用日期：2016年5月5日；发布日期：2016年5月10日

摘要

利用Monte Carlo (蒙特卡洛)方法结合快速傅立叶变换,研究了不同缺陷环半径、不同缺陷位置的纳米环磁特性,模拟结果表明:纳米环系统缺陷程度较小时,其磁特性与对称纳米环系统接近;而当缺陷程度较大时,由于其几何形状与对称单纳米环相差甚远,系统的磁特性与对称纳米环系统差别较大。此外,研究还发现,缺陷程度较大时,系统虽保留了对称纳米环系统的主要特征(涡旋态和洋葱态),但相比之下,涡旋态的稳定性更低,过渡状态增加,整体的磁化过程也更为复杂。

关键词

Monte Carlo方法, 缺陷纳米环, 磁滞回线, 自旋组态

1. 引言

近年来,磁性纳米材料由于其具有丰富的物理性质,使其在信息存储、医疗器械等方面具有广泛的应用[1]-[3]。在各种磁性纳米结构中,盘状的薄膜磁性材料相较于矩形、方形以及其他多边形材料,更适合用于高密度存储,其原因在于,圆盘形状能有效地防止边缘畴的形成并减少杂散磁场[4] [5]。然而,盘状材料在涡旋状态下的中心会出现高能漩涡,这将使得磁化反转变困难[6],因此圆盘状系统并非最理想磁存储材料。

为了解决这个难题,新的纳米环结构磁性材料被提出[7] [8]。这种结构可使多次磁化反转容易实现,在磁存储方面拥有巨大潜力[9] [10]。在当今的研究趋势中,各研究组主要研究对称磁性纳米环的情况[8] [9]。然而在实验中大批量制作纳米环时,难免会出现部分带有缺陷的纳米环,这必然对系统的磁特性产生影响。因此,本论文中,我们采用蒙特卡罗方法与快速傅立叶变换微磁学方法(FFTM)相结合的模拟方式[11] [12],研究缺陷钴纳米环系统的磁化动力学特征。

2. 模型与方法

图1给出了缺陷纳米环的计算模型:外半径 $R = 100 \text{ nm}$, 内环半径 $r = 30 \text{ nm}$, 缺陷环半径 D 、缺陷与内环中心间距 Y 可调。采用有限元算法,划分单元为规则的球单元(小球体)。

利用 Heisenberg (海森堡)模型,体系的总能量可以表示为[11]:

$$E = -\sum_{ij} J_{ij} S_i \cdot S_j + D \sum_{ik} \left[\frac{S_i \cdot S_k}{r_{ik}^3} - 3 \frac{(S_i \cdot r_{ik})(S_k \cdot r_{ik})}{r_{ik}^5} \right] - K v_0 \sum_i (S_i \cdot u_i)^2 - M_s v_0 \sum_i S_i \cdot h \quad (1)$$

(1)式中第一项为交换能,其中 S_i 为纳米环点内第 i 个原子自旋, $J = 2Ad_1\pi/6$, d_1 是小球体的直径, A 是球间的交换相互作用常数;第二项为偶极能, D 是偶极相互作用常数, $D = (M_s)^2/2$, 其中 M_s 是饱和磁化强度, $v_0 = \pi d_1^3/6$, 为小球体积;第三项为各向异性能, K 是磁各向异性常数; u_i 是第 i 个自旋的磁各向异性易轴的单位矢量;第四项为塞曼能, H 是外加磁场。对于钴纳米环,模拟中采用的参数为 $A = 1.3 \times 10^{-15} \text{ J/m}$, $M_s = 1.43 \times 10^{-15} \text{ A/m}$ [13]。令磁场水平向右,范围从 $-2000 \text{ Oe} \sim 2000 \text{ Oe}$, 温度取 300 K 。

在模拟计算中,由于体系较大,传统的 Monte Carlo 方法耗费时间过长,将影响计算效率。因此,我们引进了快速傅立叶变换方法[14],这将使程序在节约计算时间的同时,提高计算精度,进而大大提高了计算效率。

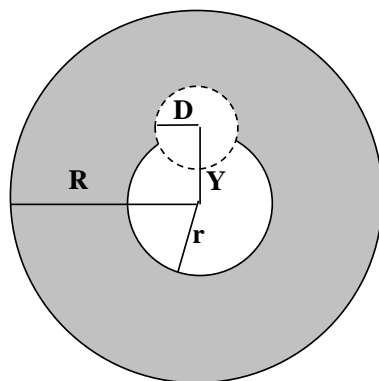


Figure 1. The geometric model of the defect ring
图 1. 缺陷纳米环模型

3. 结果与讨论

图 2 给出了外半径 $R = 100 \text{ nm}$ ，内半径 $r = 30 \text{ nm}$ ，缺陷环半径 $D = 10 \text{ nm}$ ，两环间距 Y 为 30 nm 、 40 nm 、 50 nm 、 60 nm 、 70 nm 、 80 nm 的缺陷纳米环的磁滞回线。从图 2 可以发现，两环间距 Y 的大小对整体的缺陷纳米环系统磁化行为具有一定的影响，但其磁滞回线大部分与对称纳米环类似：均存在双稳态：一种状态是磁滞回线两端的近饱和态，另一种状态是零场附近的台阶[13]。相较于对称纳米环，当系统的 Y 增大时，缺陷纳米环具有更多的过渡状态[13]。

图 3 展示的是缺陷环半径 $D = 20 \text{ nm}$ 的纳米环系统的磁滞回线。从该系统的磁滞回线可以看出：随着缺陷环远离纳米环圆心，处于涡旋态(“vortex”态)的台阶宽度[13]随之减小，即涡旋态的稳定区间减少[12]，这个过程伴随着矫顽力的增加。显然，在此情况下， Y 的增加对磁滞回线是有较大影响。从图 3 中可以发现，随着两环间距越大，系统的磁化行为与对称纳米环的磁化行为的特征相差逐渐增大。对比图 2 与图 3 发现：在 Y 相同的情况下，缺陷环半径 $D = 20 \text{ nm}$ 相较于缺陷环半径 $D = 10 \text{ nm}$ 的系统出现了矫顽力明显增加。

出现以上现象的原因在于：若 D 很小且靠近纳米环圆心(Y 较小)，则系统的缺陷程度较小，此时几何形状接近对称单纳米环，故其磁化行为与对称单纳米环系统类似；而缺陷环半径 D 较大且 Y 较大时，系统的几何形状与对称单纳米环相差较多，所以系统的磁特性与对称纳米环系统相差较大。因此，系统的缺陷纳米环的磁化行为受到 D 与 Y 的综合影响，其涡旋态的稳定性与缺陷程度密切相关。

为了进一步探讨缺陷程度对缺陷纳米环磁化过程的影响，我们以 $R = 100 \text{ nm}$ ， $r = 30 \text{ nm}$ ， $D = 20 \text{ nm}$ ， $Y = 70 \text{ nm}$ 的缺陷纳米环为例说明其磁化行为。首先，当外加磁场反向最大时(图 4 中(1)点)，系统的自旋组态为极化态，即洋葱态(“onion”态，如图 5 (1))；之后，由于外加磁场的减小，在缺陷环两旁形成了顺时针局域涡旋(如图 5 (2))，此时系统的磁化强度减少(图 4 中(2)点)；接着，外加磁场继续减小(图 4 中(3)点)，在外场作用下，缺陷环两旁的局域涡旋消失，缺陷部分形成了一个顺时针涡旋态(如图 5 (3))；当外加磁场减小到 0 时(图 4 中(4)点)，系统整体出现了较为完整的涡旋态(如图 5 (4))，此时系统的磁化强度接近于零；接着正向外加反向磁场增大(图 4 中(5)点)，系统在中间偏右下方出现了一个顺时针局域涡旋态(如图 5 (5))；外磁场从 500 Oe 增加到 800 Oe 的过程中(图 4 中(5)~(7))，系统的局部涡环畴壁逐渐下移(如图 5 (5)~(7))；最后，畴壁消失湮灭于系统环下方，系统再次出现极化态，即反向洋葱态(如图 5 (8))。

从图 4 与图 5 的磁化过程中可以看出，缺陷纳米环可以出现对称纳米环所具备的涡旋态和洋葱态，但相较于对称纳米环，其稳定的整体涡旋态所处的外加磁场变化范围更小，系统的整体磁化过程也更为复杂，过渡态明显增加。

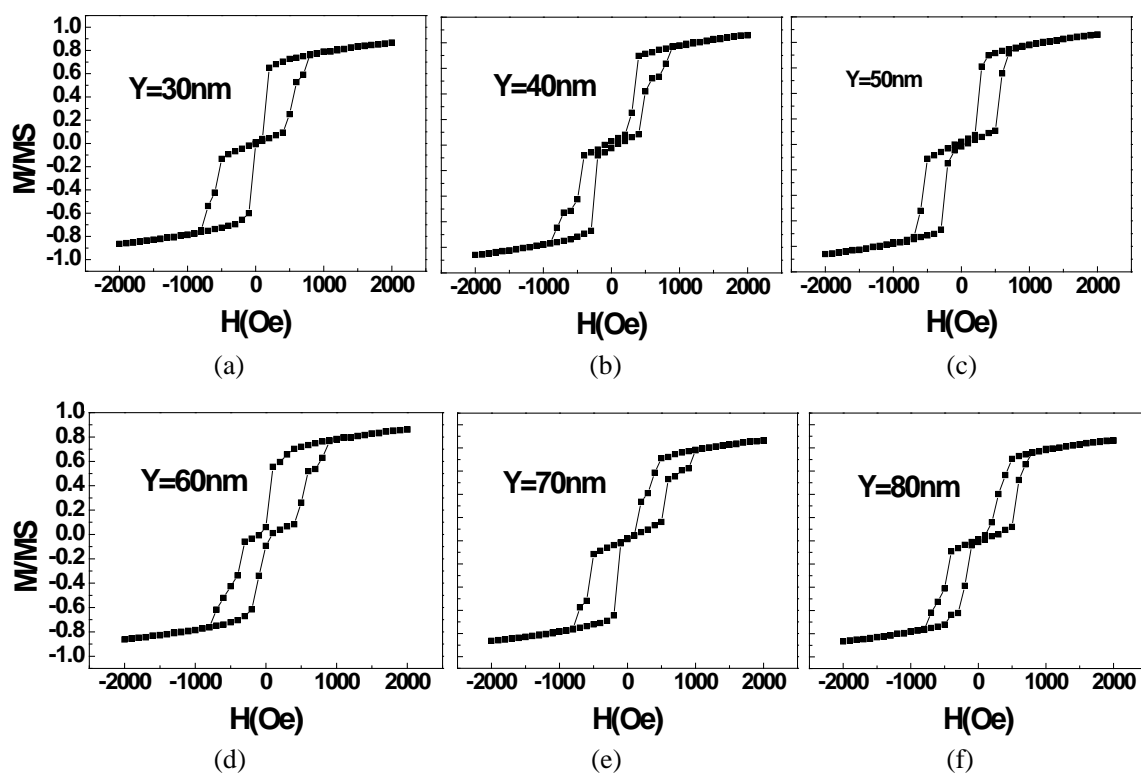


Figure 2. Magnetic hysteresis loops of defect rings with $R = 100\text{ nm}$, $r = 30\text{ nm}$, $D = 10\text{ nm}$

图 2. $R = 100\text{ nm}$, $r = 30\text{ nm}$, $D = 10\text{ nm}$, 不同两环间距的缺陷纳米环系统磁滞回线

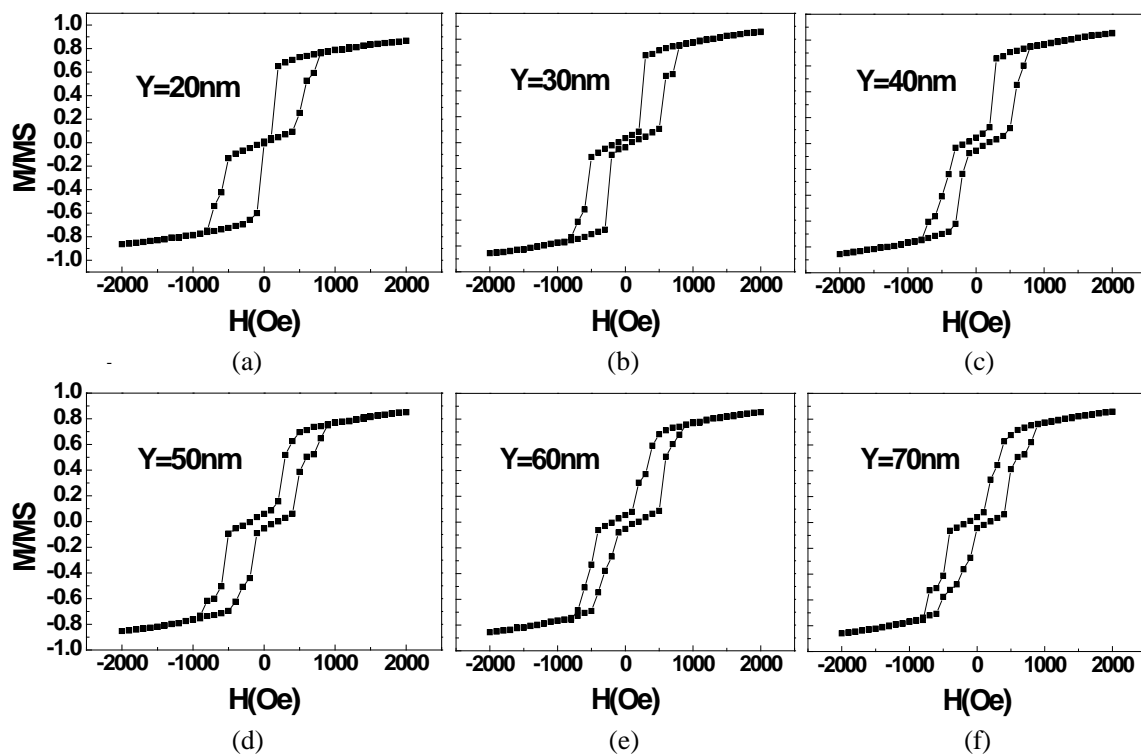


Figure 3. Magnetic hysteresis loops of defect rings with $R = 100\text{ nm}$, $r = 30\text{ nm}$, $D = 20\text{ nm}$

图 3. $R = 100\text{ nm}$, $r = 30\text{ nm}$, $D = 20\text{ nm}$, 不同两环间距的缺陷纳米环系统磁滞回线

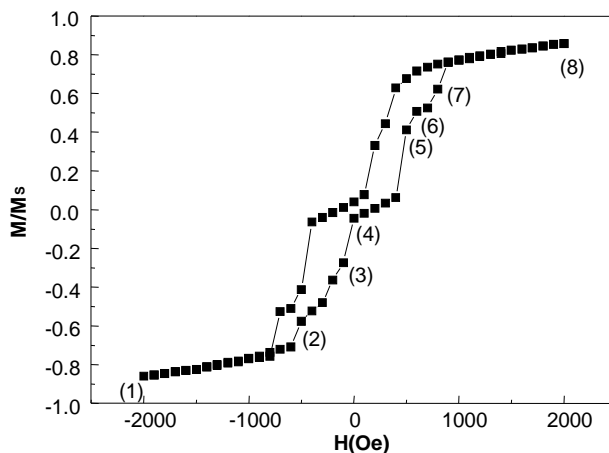


Figure 4. Magnetic hysteresis loops of defect rings with $R = 100$ nm, $r = 30$ nm, $D = 20$ nm, $Y = 70$ nm

图 4. $R = 100$ nm, $r = 30$ nm, $D = 20$ nm, $Y = 70$ nm 缺陷纳米环系统磁滞回线

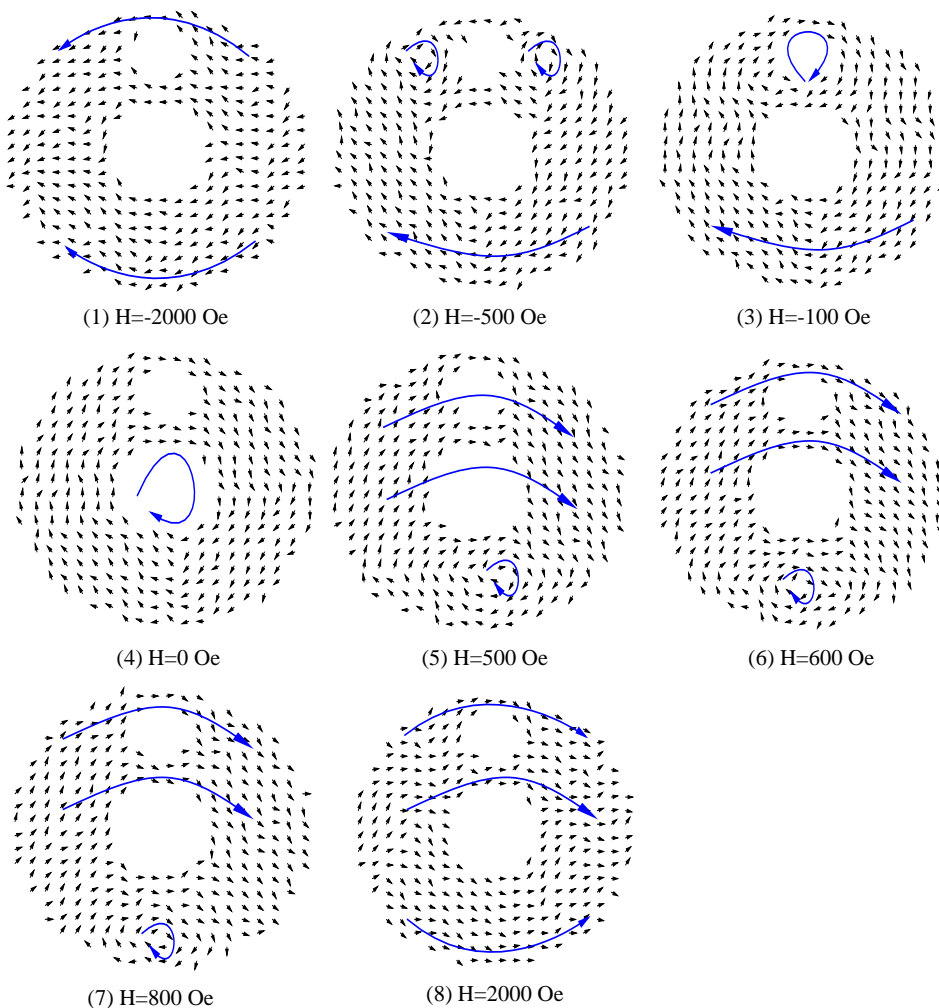


Figure 5. Typical spin configurations of Co D-N-rings with $R = 100$ nm, $r = 30$ nm, $D = 20$ nm, $Y = 70$ nm

图 5. $R = 100$ nm, $r = 30$ nm, $D = 20$ nm, $Y = 70$ nm 缺陷纳米环的典型自旋组态

4. 结论

利用 Monte Carlo 方法结合快速傅立叶变换, 模拟研究了不同缺陷环半径 D 、不同缺陷环位置 Y 的纳米环的磁化行为, 研究表明: 当缺陷环半径较小且靠近纳米环圆心时, 由于系统的几何形状接近对称单纳米环, 其磁特性与对称单纳米环系统相近; 而缺陷环半径较大且远离主环圆心时, 由于其几何形状与对称单纳米环相差甚多, 所以系统的磁特性与对称纳米环系统有较大差别。通过对缺陷纳米环的自旋组态研究发现: 缺陷程度较大时, 系统虽保留了对称纳米环系统的主要特征(涡旋态和极化态), 但相比起来, 系统涡旋态的稳定性更低, 过渡状态明显增加, 系统的磁化行为也更为复杂。

致 谢

本论文感谢国家自然科学基金(11004031), 福建省自然科学基金(2016J01007), 福建师范大学本科教学改革研究项目(I201503038), 福建师范大学大学生创新创业训练计划项目(201510394049)的资助。

参考文献 (References)

- [1] Daday, C., Manolescu, A., Marinescu, D.C. and Gudmundsson, V. (2011) Electronic Charge and Spin Density Distribution in a Quantum Ring with Spin-Orbit and Coulomb Interactions. *Physical Review B*, **84**, 850-858. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.84.115311>
- [2] Kim, D., Lee, D.R., Choi, Y., Metlushko, V., Park, J., Kim, J.Y. and Lee, K.B. (2012) Inducing Vortex Formation in Multilayered Circular Dots Using Remanent Curves. *Applied Physics Letters*, **101**, 722-730. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4766347>
- [3] Gubbiotti, G., Tacchi, S., Madami, M., Carlotti, G., Jain, S., Adeyeye, A.O. and Kostylev, M.P. (2012) Collective Spin Waves in a Bicomponent Two-Dimensional Magnonic Crystal. *Applied Physics Letters*, **100**, 162407-162407-5. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4704659>
- [4] Shinjo, T., Okuno, T., Hassdorf, R., Shigeto, K. and Ono, T. (2000) Magnetic Vortex Core Observation in Circular Dots of Permalloy. *Science*, **289**, 930-932. <http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5481.930>
- [5] Wachowiak, A., Wiebe, J., Bode, M., Pietzsch, O., Morgenstern, M., Wiesendanger, R. and Wiesendanger, R. (2002) Direct Observation of Internal Spin Structure of Magnetic Vortex Cores. *Science*, **298**, 577-580. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1075302>
- [6] Vaz, C.A.F., Lopez-Diaz, L., Kläui, M., Bland, J.A.C., Monchesky, T.L., Unguris, J. and Cui, Z. (2003) Direct Observation of Remanent Magnetic States in Epitaxial fcc Co Small Disks. *Physical Review B*, **67**, 1393-1406. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.67.140405>
- [7] Kong, X.Y., Ding, Y.R., Yang, R.S. and Wang, L.Z. (2004) Single-Crystal Nanorings Formed by Epitaxial Self-Coiling of Polar Nanobelts. *Science*, **303**, 1348-1351. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1092356>
- [8] Corredor, E.C., Coffey, D., Arnaud, J.I., Ibarra, A., Ross, C.A. and Ciria, M. (2013) Transverse Magnetization in Cu/Ni/Cu Epitaxial Nanorings. *The European Physical Journal B*, **86**, 134-1-7. <http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2013-30935-4>
- [9] Zhu, X., Malac, M., Liu, Z., Qian, H., Metlushko, V. and Freeman, M.R. (2005) Broadband Spin Dynamics of Permalloy Rings in the Circulation State. *Applied Physics Letters*, **86**, 262502-262502-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1957107>
- [10] Cho, K., Loget, G. and Corn, R.M. (2014) Lithographically Patterned Nanoscale Electrodeposition of Plasmonic, Bimetallic, Semiconductor, Magnetic, and Polymer Nanoring Arrays. *The Journal of Physical Chemistry C*, **118**, 28993-29000. <http://dx.doi.org/10.1021/jp501783z>
- [11] Huang, Z.G., Chen, Z.G., Peng, K., Wang, D.H., Zhang, F.M., Zhang, W.Y. and Du, Y.W. (2004) Monte Carlo Simulation of Tunneling Magnetoresistance in Nanostructured Materials. *Physical Review B*, **69**, 094420-1-094420-7. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.69.094420>
- [12] Ye, Q.Y., Chen, S.Y., Zhong, K.H., Chen, X.L. and Huang, Z.G. (2013) Magnetic Properties for Magnetic Quantum Dot Arrays: Fast Fourier Transformation and Micromagnetism Study. *Materials Science Forum*, **749**, 432-436. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.749.432>
- [13] 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.
- [14] Zhong, K.H., Feng, Q., Weng, Z.Z., et al. (2005) A Fast Fourier Transformation Micromagnetism Method. *Chinese Journal of Computation Physics*, **22**, 534-538.