

磁性 Skyrmions 信息存储器的微磁学模拟

王炳峰 董守哲 郭凯迪 吴圆圆 尹芳艺 张 召 胡成超

(聊城大学 材料科学与工程学院, 山东 聊城 252059)

摘 要 为了解决当前存储信息技术的发展问题,人们发现了一种新型的高密度信息载体——磁性 Skyrmions. 实现对磁性 Skyrmions 生成和输运的微观调控是完成其器件化过程中至关重要的一步. 本文基于微磁学模拟方法,通过 OOMMF 软件首先在纳米盘模型中详细研究了自旋极化电流注入对磁性 Skyrmions 生成的影响. 在局域电流注入过程中,调节自旋极化电流密度、电流注入时间和注入电流面积,得到了不同注入电流面积下阈值电流密度以及注入时间对 Skyrmions 拓扑数的影响;在全局电流注入中,实现了两种手性 Skyrmions 的生成,并讨论了模型尺寸对于 Skyrmions 拓扑数和尺寸的影响,对于低能耗、高密度新型 Skyrmions 信息存储器的研发提供了理论指导.

关键词 磁性 Skyrmions; 自旋极化电流; 微磁学模拟

中图分类号 N34

文献标识码 A

1 研究前言

信息产业是当今世界发展最为迅速的产业之一,其中,实现超高密度、低能耗和高可靠性的信息存储技术一直是人们关注的重点. 目前,硬盘存储器是市场上普遍存在的存储器,但是其容量基本达到了磁记录技术的物理极限点^[1]. 因此,大量研究者致力于新型信息存储器的研发,如随机存储器和磁畴壁赛道存储器等. 随机存储器是利用晶体管和电容器中的电子态来存储数据位^[2],可以实现数据的快速读写. 但是断电后,信息瞬时消失,且使用寿命短暂,读写次数有限^[3]. 磁畴壁赛道存储器采用特殊的电子流(如自旋极化电流等)驱动磁畴壁运动,从而实现数据在磁性赛道上的高密度输运,具有低价、高存取速度和高可靠性的优势,但是磁畴移动需要较大的极化电流强度,会产生较高的焦耳热^[4]. 目前,一种新型的信息载体——磁性 Skyrmions (斯格明子)的发现有望借助赛道存储的方式解决当前存储发展遇到的问题^[5,6].

Skyrmions 最早是由英国粒子物理学家 Skyrme 提出的用于描述介子领域中的局域化的、具有稳定手性自旋构型的准粒子^[7]. 这种准粒子经常存在于具有非中心对称晶格的块体材料或者反演对称性被非平衡表面打破的磁性薄膜材料中. 一般认为这种对称性破缺主要是由 DMIs 相互作用(Dzyaloshinskii-Moriya interactions)^[8-10]导致.

由于这些拓扑特性, Skyrmions 具有体积小,稳定性好,低能耗等优点. 目前发现的 Skyrmions 种类繁多,主要可分为“Bloch”型^[11]、“Neel”型^[12]、反斯格明子^[13]和反铁磁斯格明子^[14]等. 2009年, Mühlbauer^[15]等通过小角度中子散射实验,在 MnSi 材料中首次证实了斯格明子晶体(Skyrmion Lattice)的存在;不久之后,日本东京大学的十倉好紀研究组用洛伦兹透射电子显微镜(LTEM)在 Fe_{0.5}Co_{0.5}Si 薄层中确切地在实空间看到了磁斯格明子的磁结构^[11];2015年,杜海峰等^[16]通过实验发现,在外加磁场作用下,FeGe 纳米带中边缘扭曲的螺旋基态可以演变成斯格明子,即利用边界效应实现斯格明子的产生. 与传统的磁畴壁存储器相比,这些斯格明子晶格可以实现微电流灵活驱动,降低被缺陷阻碍几率. 前期的大量工作为 Skyrmions 信

收稿日期:2019-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51701091);山东省大学生科技文化创新基金项目(S201910447038);聊城大学大学生科技文化创新基金项目(CXC Y2019Y003,CXC Y2019Y014)资助

通讯作者:胡成超,男,汉族,博士,讲师,研究方向:铁性功能材料实验和计算机模拟,E-mail:huchengchao@lcu.edu.cn.

息存储积累了丰富的经验,为了实现 Skyrmions 的实际应用,研究室温下 Skyrmions 的产生、湮灭、输运等过程成为该领域的研究热点^[17]. 现如今,由于多层膜结构中表面 DMI 相互作用的可调整性,通过外加场(磁场、电场、温度等)施加于“三明治”型磁性多层膜如 Pt/Co/Ta^[18],有望实现室温 Skyrmions 的调控.

自斯格明子存储应用的概念提出以来,理论研究已经提出了多种可行的斯格明子产生湮灭方法. 一种最直接的方法便是利用自旋转移力矩 (Spin Transfer Torque, STT) 来产生和湮灭斯格明子^[19-21]. 由于可以实时呈现磁矩的翻转过程,微磁学模拟方法为我们探索和引导磁性材料的开发提供了有效的研究手段^[22,23]. 因此,为了实现可控单斯格明子的操控,本工作提出采用磁学软件 OOMMF^[24] 研究磁性斯格明子的产生和湮灭过程,为实验提供理论指导. 本文将从注入自旋极化电流诱导生成磁性斯格明子出发,详细研究了自旋极化电流密度、注入电流面积以及纳米盘模型尺寸对斯格明子形成的影响.

2 电流注入纳米盘模型生成磁性斯格明子的数值分析

斯格明子是一种受拓扑保护的结构,其拓扑数不会随场的形变而发生改变. 目前,最常用的方法有:注入自旋极化电流、外加磁场、局部加热等. 这些方法归结到一点就是为拓扑数不同的自旋结构通过连续形变过渡到另一种状态提供能量来克服它们之间的拓扑势垒^[25,26].

2.1 纳米盘模拟模型

首先本文结合相关文献^[18],通过垂直注入磁场,调整 DMI 常数和垂直磁晶各向异性常数系统研究了 Skyrmions 的生成过程,得到最优的材料参数:饱和磁化强度 $M_s = 6 \times 10^2 \text{ k} \cdot \text{Am}^{-1}$,交换常数 $A = 10 \text{ pJm}^{-1}$,DMI 常数 $D = 0.273 \text{ mJm}^{-2}$,阻尼系数 $\alpha = 0.3$,旋磁比 $\gamma = -2.211 \times 10^5 \text{ mA}^{-1} \text{ s}^{-1}$,自旋极化率 $P = 0.4$,垂直磁晶各向异性常数(PMA) $K_u = 1 \times 10^4$,离散单元尺寸为 $4 \text{ nm} \times 4 \text{ nm} \times 0.9 \text{ nm}$.

讨论磁性 Skyrmions 生成的计算模型是纳米圆盘结构,如图 1 (a) 所示,圆盘的直径 d_0 分别为 460、700、880 nm. 圆盘的初始状态是沿 $+z$ 轴方向垂直磁化,黑色圆圈内包围区域为自旋极化电流注入区域,电流的极化方向为 $-z$ 轴方向. 图 1 (b) 为磁性 Skyrmions 在纳米盘的磁矩分布图,箭头是 m_z 的投影分布(红色区域 $m_z = -1$,蓝色区域 $m_z = 1$,白色区域 $m_z = 0$),规定 $m_z = 0$ 的区域内形成的圆圈直径为磁性 Skyrmions 的尺寸. 图 1(c) 为注入自旋极化电流后的磁矩分布图.

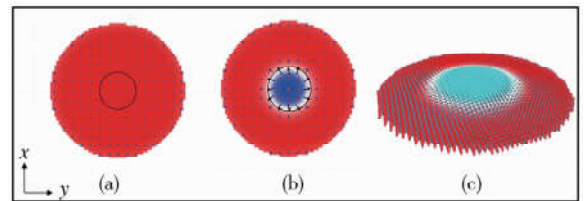


图 1 (a) 电流注入模型 (b) Skyrmions 的尺寸定义 (c) 磁矩分布图

2.2 电流局部注入成核形成磁性 Skyrmions

首先,本文中并没有采取从 $t = 0 \text{ ns}$ 时刻就注入自旋极化电流,因为在 $t = 0$ 时刻圆盘模型自身存在 DMI 作用,并没有达到平衡状态,需要其在无电流情况下达到自身总能量最低的状态. 如图 2 分别给出了三个尺寸的圆盘的总能量与时间的变化图以及每隔 0.3 ns 的 x 轴磁矩分布图. 如图所示,随着时间的增加,磁矩开始在 x 轴方向产生的分量,总能量逐渐降低并趋于平稳. 当总能量趋于平稳时,可以认为此时已经达到了平衡状态. 本文模拟选择在 $t = 1.2 \text{ ns}$ 时刻的平衡状态开始注入自旋极化电流.

磁性 Skyrmions 的生成是克服磁矩初始分布时所存在的拓扑势垒进而引发拓扑变化. 初始磁矩沿 $+z$ 轴方向分布,在垂直磁化的圆盘中心局部沿 $-z$ 轴方向注入自旋极化电流,磁矩发生偏转出现沿 $-z$ 轴方向的分量,由于 DMI 作用的存在,周边的磁矩按照连续扭曲变化的形式散开,距离注入区域较远的磁矩基本不受影响仍然保持 $+z$ 轴方向. 此时,圆盘的注入区域的磁矩与非注入区域的磁矩方向相反,且在其两者中间形成了一个类似环形的磁畴壁,这便是 Skyrmions 的成核阶段. 成核后 Skyrmions 的尺寸不再变化进入稳定阶段. 图 3 展示了在 460 nm 圆盘中,注

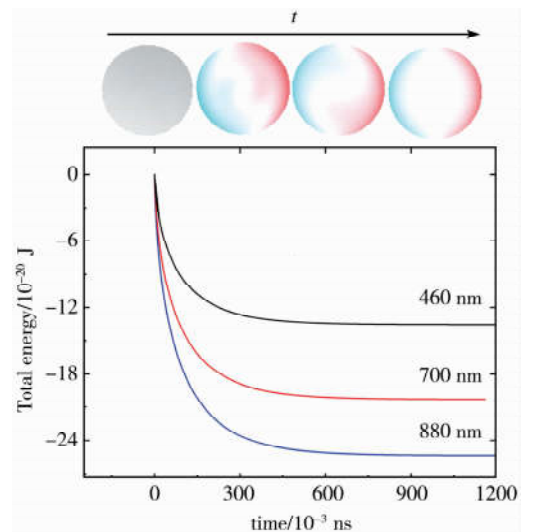
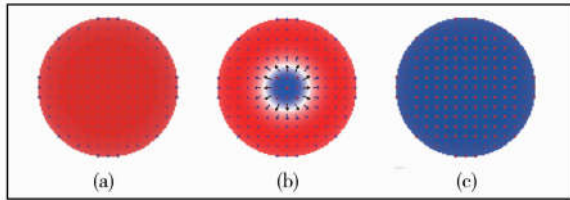


图 2 不同圆盘尺寸下总能量随时间变化图

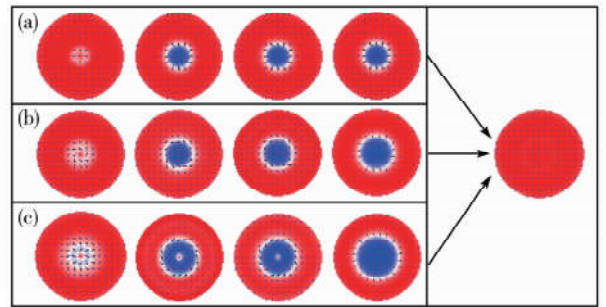
按照连续扭曲变化的形式散开,距离注入区域较远的磁矩基本不受影响仍然保持 $+z$ 轴方向. 此时,圆盘的注入区域的磁矩与非注入区域的磁矩方向相反,且在其两者中间形成了一个类似环形的磁畴壁,这便是 Skyrmions 的成核阶段. 成核后 Skyrmions 的尺寸不再变化进入稳定阶段. 图 3 展示了在 460 nm 圆盘中,注

入电流直径为 $d = 60 \text{ nm}$ 不同电流密度时 Skyrmions 演化结果. 可以看出当电流密度小于 $3.54 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 时磁矩没有翻转过去, 无法形成 Skyrmions; 当电流密度大于 $3.54 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 时磁矩全部翻转, 也无法形成 Skyrmions. 当电流密度等于 $3.54 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 时中心磁矩翻转, 与外围磁矩方向相反, 形成了 Skyrmions.



注: (a) $J = 3.18 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$; (b) $J = 3.54 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$;
(c) $J = 1.42 \times 10^{10} \text{ A/cm}^2$.

图3 在 460 nm 圆盘中三种电流密度的 Skyrmions 演化结果

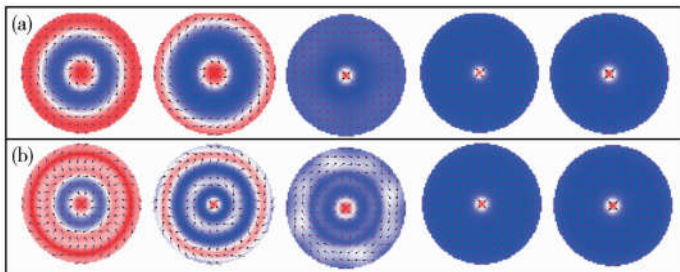


注: (a) $d = 180 \text{ nm}$; (b) $d = 280 \text{ nm}$; (c) $d = 352 \text{ nm}$.

图4 不同电流注入直径下 Skyrmions 演化过程

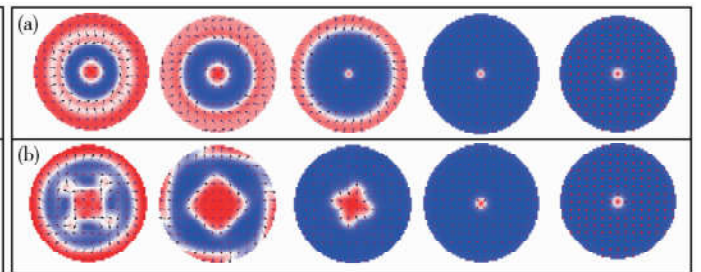
之后, 研究了在不同电流注入直径下阈值电流时 Skyrmions 的演化情况, 如图 4 所示. 可以看到, 随着注入直径增大, 形成的 Skyrmions 增大, 而且撤掉电流时, Skyrmions 均会消失.

随后, 将电流的注入面积增大, 发现, 当电流的注入面积增大到一定程度时, 将形成“外蓝内红”式 Skyrmions, 即手性 Skyrmions, 且撤掉电流后手性 Skyrmions 稳定存在. 当自旋电流直径与圆盘模型之比小于或等于 0.4 时, 会形成“外红内蓝”式 Skyrmions; 当自旋电流直径与圆盘模型之比大于 0.4 时, 会形成“外蓝内红”式 Skyrmions. 随着电流注入面积增大, 边界处的磁矩开始运动. 因为纳米盘边界存在 DMI 作用, 圆形边界处的磁矩存在向面内倾斜的分量^[27], 所以在自旋电流的作用下, 边界处的磁矩比中心磁矩更容易发生翻转, 从而形成手性 Skyrmions. 图 5 为 700 nm 圆盘中不同比值时“外蓝内红”式 Skyrmions 的形成过程和撤电流时 Skyrmions 的稳态图(其他两个尺寸的圆盘规律相似).



注: (a) $d/d_0 = 0.57$; (b) $d/d_0 = 0.71$.

图5 不同比值下 Skyrmions 演化过程



注: (a) $J = 5.68 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$; (b) $J = 1.185 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$.

图6 在 880 nm 圆盘中两种电流密度的 Skyrmions 演化过程

同时发现, 如图 6 所示, 在同一个圆盘中, 注入自旋极化电流后, 生成的手性 Skyrmions 大小不一, 随着电流密度的降低, Skyrmions 的尺寸增大. 但是, 当撤掉电流后, 生成的手性 Skyrmions 大小相同(其它两个尺寸的圆盘规律相似). 在斯格明子成核的过程中需要克服其拓扑稳定性势垒^[26], 随着电流密度的降低, 自旋极化电流所提供的能量减少, 中心磁矩无法克服系统能量势垒, 很难发生翻转, 所以形成的 Skyrmions 的尺寸增大.

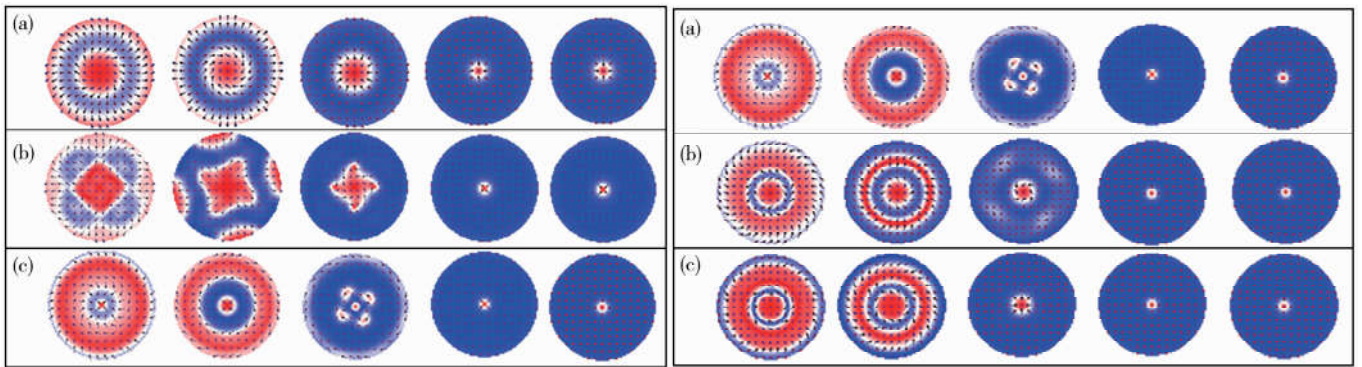
以上图中采用的电流密度是与注入域面积对应的阈值电流密度, 即 Skyrmions 稳定成核的最低电流密度. 从图 6 的 Skyrmions 演化过程中可以看出, 位于中心的磁矩是通过周围磁矩带动最后发生反转, 圆盘中心的磁矩最难翻转. 对比图 4 与图 5 所得, 随着注入直径越来越小, 整个注入域的磁矩是同时发生翻转, 要想实现同时翻转, 中心磁矩就要在注入开始时发生翻转. 因此导致阈值电流密度的增加. 三种圆盘不同注入域直径对应的阈值电流密度关系见图 7.

从图 7 中可以看出, 在注入区域面积增加初期, 阈值电流密度下降的很快, 当增加到一定程度时, 阈值电流密度变化幅度很小. 因此, 过大的扩大注入区域的面积对阈值电流密度的降低影响不大.

综上所述,结合图 6 和图 7 可得,当注入域面积增大到一定程度时,会形成手性 Skyrmions,且随注入自旋电流的直径增大或阈值电流密度减小,形成的 Skyrmions 直径增大,但当撤掉电流后,不管电流的注入直径的差异,同一个圆盘中所有的 Skyrmions 均变成相同的尺寸.图 6 中可以看出,形成手性 Skyrmions 后,其最终的大小与外界电流无关.

2.3 电流全域注入成核形成磁性 Skyrmions

随着注入域面积的增大,边界处的磁矩开始参与形成 Skyrmions 的过程.如图 1(a)所示,由于纳米盘边界处存在 DMI 作用,圆形边界处的磁矩存在向面内倾斜的分量,从拓扑效应上看,这是有利于拓扑变化的.如图 8 所示,在不同的纳米盘中全域注入自旋极化电流形成“外蓝内红”式 Skyrmions.显而易见的是,随着纳米盘的直径增大,在阈值电流密度下所形成的 Skyrmions 的直径减小,此处与电流局域注入时一致.



注:(a) $d_0=460\text{ nm}$; (b) $d_0=700\text{ nm}$; (c) $d_0=880\text{ nm}$.

图 8 三种圆盘下全域注入电流的 Skyrmions 演化过程

注:(a) $J=1.151\times 10^6\text{ A/cm}^2$; (b) $J=1.316\times 10^6\text{ A/cm}^2$; (c) $J=1.48\times 10^6\text{ A/cm}^2$.

图 9 在 880 nm 的纳米盘中全域注入电流的 Skyrmions 演化过程

随后,如图 9 所示在 880 nm 圆盘中不同电流密度的全域注入电流下 Skyrmions 的生成过程,可以看出,圆盘边界处的磁矩首先发生变化,随后缓慢带动盘内部的磁矩翻转,但中心磁矩一直未翻转.而且不难发现随着注入电流的密度增加,形成的 Skyrmions 的直径并没有变化,此现象与上文局域注入一致.经过对比发现,460 nm 和 700 nm 的圆盘同样遵循此规律.

3 结论

详细模拟了采用自旋极化电流在纳米盘中生成 Skyrmions 的过程,得出以下结论(1)在增大注入电流区域面积的过程中,有力地证明了一种初始磁矩状态可以生成两种手性方向的 Skyrmions.(2)并没有选择从 $t=0$ 时刻注入自旋极化电流,而是在弛豫效应后再注入自旋极化电流.(3)详细研究了自旋电流直径与圆盘模型之比不同时对 Skyrmions 生成的影响.当自旋电流直径与圆盘模型之比小于或等于 0.4 时,会形成“外红内蓝”式 Skyrmions;当自旋电流直径与圆盘模型之比大于 0.4 时,生成“外蓝内红”式 Skyrmions 即手性 Skyrmions.同时撤掉电流后,“外红内蓝”式 Skyrmions 磁矩会恢复初始状态,“外蓝内红”式 Skyrmions 会稳定存在,且其大小不随比值的变化而变化.

这表明,当注入域面积增大到一定程度时,其最终的尺寸与外界电流的大小和注入域面积无关,只与纳米盘模型参数有关.(1)采用局域注入电流时,阈值电流密度随注入电流的直径的增大而减小,且增大到一定程度后阈值电流密度不再发生明显地变化.(2)采用全域注入电流过程中,形成了花瓣型和风车型 Skyrmions.同时 Skyrmions 的直径随纳米盘的直径增大而减小.但是在同一个圆盘中,其最终的大小与电

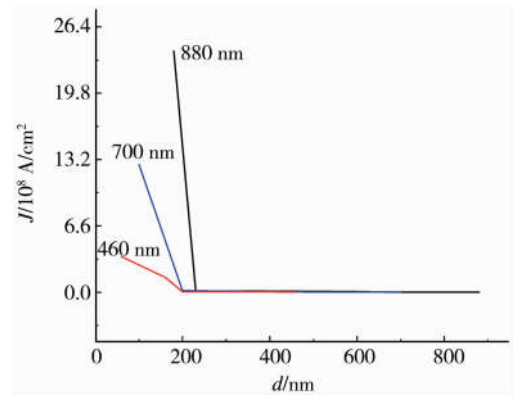


图 7 三种圆盘注入域直径对应的阈值电流密度关系图

流的大小无关,该结果与电流局域注入规律一致。(3)本工作通过研究不同尺寸、不同电流注入直径对 Skyrmions 形成的影响,对于 Skyrmions 的开发具有重要的理论指导意义。

参 考 文 献

- [1] 徐庶. 极高密度磁存储系统的设计与微磁学研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [2] Parkin, S. S. P. Data in the fast lanes of racetrack memory[J]. *Scientific American (International Edition)*, 2009, 300(6):76-81.
- [3] 梁雪,赵莉,邱雷,等. 磁性斯格明子的赛道存储[J]. *物理学报*, 2018, 67(1):368-390.
- [4] Parkin, S S P, Hayashi M, Thomas L. Magnetic domain-wall racetrack memory[J]. *Science*, 2018, 320(5873):190-194.
- [5] Tomasello R, Martinez E, Zivieri R, et al. A strategy for the design of skyrmion racetrack memories [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:6784-6787.
- [6] Fert A, Cros V, Sampaio J. Skyrmions on the track[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(3):152-158.
- [7] Abada A. Isoscalar NN spin-orbit potential from a Skyrme model with scalar mesons[J]. *Zeitschrift Für Physik A Hadrons & Nuclei*, 1997, 358(1):85-89.
- [8] Dzyaloshinsky I. A thermodynamic theory of "weak" ferromagnetism of antiferromagnetics[J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 1958, 4(4):241-255.
- [9] Moriya, et al. Anisotropic Superexchange Interaction and Weak Ferromagnetism[J]. 1960, 120(1):91-98.
- [10] Crépieux A, Lacroix C. Dzyaloshinsky-Moriya interactions induced by symmetry breaking at a surface[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1998, 182(3):341-349.
- [11] Yu X Z, Onose Y, Kanazawa N, et al. Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal[J]. *Nature*, 2010, 465(7300):901-904.
- [12] Heinze Stefan, von Bergmann Kirsten, Menzel Matthias, et al. Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(9):713-718.
- [13] Koshibae W, Nagaosa N. Creation of skyrmions and antiskyrmions by local heating [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(5):5148-5152.
- [14] Barker J, Tretiakov O A. Static and dynamical properties of antiferromagnetic skyrmions in the presence of applied current and temperature[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 116(14):147203-147208.
- [15] Mühlbauer S, Binz B, Jonietz F, et al. Skyrmion lattice in a chiral magnet[J]. *Science*, 2009, 323(5916):915-919.
- [16] Du H, Che R, Kong L, et al. Edge-mediated skyrmion chain and its collective dynamics in a confined geometry[J]. *Nature Communications*, 2015, 6:8504-8509.
- [17] 刘艺舟, 臧佳栋. 磁性斯格明子的研究现状和展望[J]. *物理学报*, 2018, 67(13):22-42.
- [18] Woo S, Litzius K, Krüger, Benjamin, et al. Observation of room-temperature magnetic skyrmions and their current-driven dynamics in ultrathin metallic ferromagnets[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(5):501-507.
- [19] Slonczewski J C. Current-driven excitation of magnetic multilayers[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, 159(1/2):L1-L7.
- [20] Berger L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current[J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 1996, 54(13):9353-9358.
- [21] Zhang S, Li Z. Roles of nonequilibrium conduction electrons on the magnetization dynamics of ferromagnets. [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(12):127204.
- [22] 张召,董守哲,卢文建,等. 铁磁准同型相界附近畴结构和磁致伸缩响应的压力依赖效应:相场模拟[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(3):49-54.
- [23] Hu C C, Zhang Z, Yang T N, et al. Phase field simulation of grain size effects on the phase coexistence and magnetostrictive behavior near the ferromagnetic morphotropic phase boundary[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115:162402-162404.
- [24] Donahue M J, Porter D. OOMMF (NIST)[J/OL]. (2019-09-13) <http://math.nist.gov/oommf>.
- [25] Wang K, Huang Y, Zhang X, et al. Skyrmion-electronics; an overview and outlook[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(10):2040-2061.
- [26] Sampaio J, Cros V, Rohart S, et al. Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic skyrmions in nanostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(11):839-844.
- [27] 李瑞文. 超高密度信息载体磁性 Skyrmions 的微磁学数值研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.

Design and Electrical Performances of Sandwich Multilayer PVA Capacitor Film

ZHANG Yuan-yuan ZHENG Yang-yang LUAN Zheng-qi
LIU Ya YANG Xu ZHAN Yan-hu LI Yu-chao

(School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract Two polymer solution precursors, namely PVA/clay 1 wt% (A) and PVA/graphene 1 wt%(B), were alternately coated on a glass substrate with a rod coator. A sandwich multilayer structure (ABAB...A) of PVA composite capacitor film was prepared. The dispersion state, structure, and morphology of the material were characterized by XRD, FESEM and DSC instruments. Particularly attention was focus on the dielectric properties and breakdown strength of such composite film. The results showed that the multilayer capacitor film exhibited comprehensive dielectric properties as compared with that of the binary PVA/clay and PVA/graphene systems. The dielectric constant of the multilayer capacitor film increased to 12.3 (1.7 times higher than that of neat PVA), while the dielectric loss remained nearly unchanged. In addition, the breakdown strength was clearly enhanced, thus leading to the improved energy density of composite film.

Key words dielectric constant; dielectric loss; graphene; clay; polyvinyl alcohol; capacitor film.

(上接第 66 页)

Micromagnetic Simulation of Magnetic Skyrmions Information Carrier

WANG Bing-feng DONG Shou-zhe GUO Kai-di WU Yuan-yuan
YIN Fang-yi ZHANG Zhao HU Cheng-chao

(School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract In order to solve the bottleneck in the development of information storage technology, a new high-density information carrier, magnetic skyrmions, have attracted considerable attention. It is an important step to realize the micro-control of the generation and transport of magnetic skyrmions for its applications in devices. Based on the micromagnetic simulation method, the spin polarized current beam is firstly studied in detail in the nano-disk model through OOMMF software. In the process of local current injection, we adjust the spin polarized current density, current injection time and injection current area, and get the effect of threshold current density and injection time on the topological number of skyrmions under different injection current areas. In the global current injection, we realize the generation of two kinds of chiral skyrmions, and discuss the model size effects. This work provides theoretical guidance for the research and development of new skyrmions information memory with low energy consumption and high density.

Key words magnetic skyrmions; spin polarized current; micromagnetic simulation