

外磁场和电流共同驱动的磁纳米柱中磁矩动力学

侯志伟¹,朱威峰¹,李霞²,张红³

(1.河南工业大学 理学院,郑州 450001;

2.信息工程大学 理学院,郑州 450001;3.山东农业大学 信息科学与工程学院,山东 泰安 271018)

摘要:针对自由层与自旋极化层均为垂直磁各向异性材料的磁纳米柱结构,基于 Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski(LLGS)方程,利用微磁学模拟方法,研究了外磁场和电流导致的自旋转矩效应所驱动的自由层磁矩翻转特性.模拟结果显示磁矩翻转曲线中出现了多个“凸起”的非正常翻转状态;且凸起区域出现的位置与外加磁场大小、纳米柱尺寸和垂直磁各向异性相关,而与极化层磁矩的倾角大小无关.在自旋极化层的磁矩倾角给定时,凸起区域出现的磁矩状态有亚稳态、振荡态、稳定态 3 种.给出建立了它们随磁场和极化层倾角变化的参数相图.

关键词:微磁学模拟;自旋转矩;磁各向异性

中图分类号:O441.1;O441.2

文献标志码:A

近年来,具有垂直磁各向异性^[1](Perpendicular Magnetic Anisotropy, PMA)的磁纳米柱结构以临界翻转电流低,受样品边比尺寸影响小,较好的磁热稳定性等优点^[2-4]受到人们的广泛关注.垂直磁各向异性材料在高密度非易失磁性随机存储^[5]与自旋转矩振荡器^[6]等领域被认为有着广阔的发展前景.一种典型结构为:磁纳米柱结构中极化层磁矩具有倾斜的垂直磁各向异性,自由层磁矩具有垂直磁各向异性.由于倾斜极化层在面内方向和垂直方向均有分量,这为磁矩动力学^[7-10]调控引入了一种新的方式.这种新方式的引入为增强自旋转矩效率、优化微波信号、调控静态与动态磁模式等提供了有效方法.最近,一种具有倾斜自旋极化层的结构模型^[11]被提出,该模型在面内和面外均有分量,垂直磁各向异性在该模型器件中起到了非常重要的作用^[12].有研究表明,Dzyaloshinskii-Moriya 与自旋霍尔效应^[13-14]相互作用可诱导磁畴壁^[15]的有效传播.这使得具有垂直磁各向异性的材料在基于磁畴壁的信息存储器件方面有一定发展前景.

本文基于 Co/Ni 软磁性材料^[16-17]构成的具有垂直磁各向异性的磁纳米柱结构,通过改变极化层磁矩的倾斜角度、外加磁场、样品的尺寸及材料的垂直磁各向异性常数等因素,对自由层磁矩翻转行为^[18]进行了研究.研究表明,自由层磁矩在随着磁场变化的翻转过程中,翻转行为会出现明显的区域不稳定性.为了进一步澄清该行为出现的原因,以及该区域内自由层磁矩的动力学过程,运用微磁学模拟方法进行了分析.

1 理论模型与研究方法

研究模型采用如图 1 插图所示的具有垂直磁各向异性的磁纳米柱结构,其自由层磁矩与极化层磁矩均为垂直磁各向异性材料,中间层为 MgO/Al₂O₃.上层为自由层,其易轴方向垂直于面内;下层为极化层,其磁矩方向与竖直方向夹角为 β .电流密度为 J ,定义正向电流方向为从极化层层流入自由层方向,外加磁场为 \vec{H}_{ext} ,方向为垂直膜面向上,如图 1 中插图所示.自由层磁矩的动力学行为通过解 Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski(LLGS)方程^[19]的微磁学模拟^[20]来研究,

收稿日期:2020-02-08;修回日期:2020-04-20.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51201059;51302157);河南省教育厅自然科学项目(14A140027);河南工业大学校基金(2014CXRC10);山东农业大学一流学科基金;重点培育学科项目资助课题.

作者简介(通信作者):侯志伟(1980-),男,河南新乡人,河南工业大学副教授,研究方向为自旋电子学,E-mail: zhiwei_hou@haut.edu.cn.

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma(\vec{m} \times \vec{H}_{\text{eff}}) + \alpha\vec{m} \times \frac{d\vec{m}}{dt} + a_J\vec{m} \times (\vec{m} \times \vec{m}_p) + \alpha a_J\vec{m} \times \vec{m}_p,$$

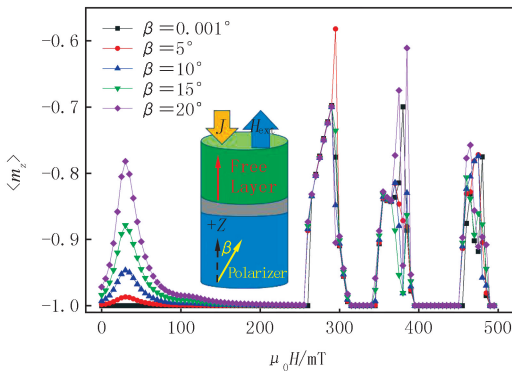
其中, γ 为旋磁比, \vec{m} 表示自由层磁矩的单位矢量, \vec{H}_{eff} 为作用在自由层磁矩的有效场, 其包含了各向异性场 H_k , 外加场 H_{ext} , 磁交换作用, $\alpha=0.05$ 为阻尼系数, \vec{m}_p 为极化层磁矩单位矢量, 上式最后 2 项为垂直极化层产生的自旋转矩项(STT), 其中 a_J 为力矩因子, 其表达式为 $a_J = \hbar\gamma PJ / (2 |e| M_s \mu_0 t)$, \hbar 为普朗克常数, e 为电子电量, t 为自由层厚度, P 为电流极化率, J 为电流密度, 规定电流从极化层流向自由层为正向电流。

模拟中, 自由层材料选择典型的 Co/Ni 材料, 材料的饱和磁化强度 $M_s = 6.5 \times 10^5 \text{ A/m}^3$, 磁晶各向异性常数为 $K_u = 2.5 \times 10^5 \text{ J/m}^3$, 方向垂直膜面沿着 z 轴方向; 交换常数设为 $A = 1.6 \times 10^{-11} \text{ J/m}$, 电流的自旋极化率 $P = 0.28$. 样品形状设置为椭圆形磁纳米柱, 尺寸为 $200 \text{ nm} \times 50 \text{ nm}$, 自由层厚度为 1.6 nm , 运用微磁学模拟软件 Mumax3 采用有限差分法对样品自由层进行分割, 离散成尺寸为 $2.0 \text{ nm} \times 2.0 \text{ nm} \times 1.6 \text{ nm}$ 的小单元格. 将自由层磁矩初始方向设置为 z 正方向, 极化层磁矩与 z 轴正方向夹角为 β . 外加磁场方向为沿着 z 轴正向, 电流为沿着 z 轴负方向的负电流, 其产生的力矩, 使得自由层磁矩从初始态转向与极化层反平行的平衡态。

2 模拟结果和讨论

在上述磁纳米柱中, 通入的电流大小为 2.5 mA , 电流密度为 $3.13 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$, 电流通入时间为 25 ns , 外加磁场从 0 每隔 5 mT 逐渐增加至 500 mT (见图 1). 随着外加磁场的变化, 自由层磁矩的最终状态出现了 4 个明显的凸起区域: $0 \sim 100 \text{ mT}$, $255 \sim 315 \text{ mT}$, $340 \sim 395 \text{ mT}$, $450 \sim 490 \text{ mT}$, 即存在自由层磁矩未完全翻转状态. 这些凸起区域出现的原因在于自旋转矩效应、材料的磁各向异性以及外加磁场相互竞争的结果. 在低磁场 ($0 \sim 100 \text{ mT}$) 范围内, 其曲线凸起程度随着倾角的增加而增加, 这是由于在低磁场作用下, 自旋转矩效应起到了主要作用, 经过电流脉冲后, 其自由层磁矩最终稳定在和极化层磁矩反平行的位置. 而随着磁场的逐渐增加, 外磁场的力矩作用逐渐显现, 导致又出现了 3 个不同区域的凸起. 数据显示, 虽然极化层磁矩倾角不同, 但是其凸起区域均相对固定, 这种情况的出现, 说明极化层倾角的大小并不影响凸起区域的出现。

为了研究极化层磁矩倾角的作用, 通入同样大小的电流, 选择外加磁场为 $H_{\text{ext}} = 260 \text{ mT}$ 不变的情况, 计算了在通入电流时间为 25 ns 时, 自由层磁矩随时间的演化情况, 其结果如图 2 所示. 结果显示, 自由层磁矩在 $H_{\text{ext}} = 260 \text{ mT}$ 的情况下, 能够实现磁矩的完全翻转, 其完成翻转所需时间在极化层倾角为 0.001° 时最长, 并随着极化层倾斜角度的增加而迅速减小, 这是由于自旋转矩效应在自由层和极化层的磁矩夹角为 0.001° 时, 自旋转矩的作用所需要的时间的最长, 所以导致翻转时间较长随着角度的增加, 随着极化层倾角逐渐增大, 这种影响逐渐减小。



(插图: 具有垂直磁各向异性的磁纳米柱结构示意图)

图1 不同极化层倾角下自由层磁矩的最终状态曲线

Fig.1 The curves shows the final state of the magnetization switching of the free layer with the different tilted polarizer layer

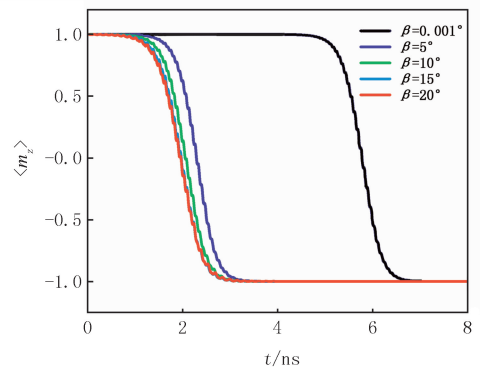


图2 不同极化层倾角下, 自由层磁矩稳定翻转的过程曲线

Fig.2 Magnetization stable switching curves of the free layer with different tilted spin polarizer

对于图 1 中凸起区域的形态, 发现电流通入磁纳米柱的时间不同, 磁矩最终状态也不尽相同, 如图 3 所

示:极化层倾斜角度为 0.001° ,电流通入时间分别为 5 ns 和 25 ns 时,自由层磁矩最终状态和电流通入时间有很大关系,从而影响到凸起区域的范围。

为了更好地理解电流通入时间对自由层磁矩翻转最终状态的影响,以极化层倾角 $\beta=5^\circ$ 时的磁矩翻转曲线(如图 4(a)所示)为例,选择外加磁场分别为 290 mT(A 点)、375 mT(B 点)、460 mT(C 点)时的 3 种情况,计算了电流通入时间为 25 ns 时磁矩翻转行为的演化曲线(图 4(b-d)).外加磁场为 290 mT 时,磁矩在 4 ns 左右达到完全翻转状态,在 11 ns 左右产生磁矩回跳,经过微小的振荡过程后达到稳定,此时自由层磁矩平均值 $\langle m_z \rangle$ 为 -0.7 (图 4(e)).出现这种状况的原因是自由层边界的磁矩出现了稳定的局部翻转,并最终达到了非一致的稳定态(亚稳态).外加磁场为 375 mT 时,曲线显示自由层磁矩最后产生了周期性的波动态(振荡态).图 4(f)为自由层磁矩在这种振荡模式中 1 个周期内的磁矩暂态图像.在自由层边界处同样出现了局域磁矩的一致进动;其中,空箭头指向为振荡区域内磁矩的整体方向.这种成对出现的振荡区域始终保持整个自由层磁矩在面内分量的平均值 $\langle m_x \rangle = \langle m_y \rangle = 0$,自由层曲线上显示出来的 $\langle m_z \rangle$ 的振荡是边界局域磁矩的翻转导致的,并且振荡随着电流的通入一直持续下去.外加磁场为 460 mT 时,自由层磁矩实现了稳定的翻转过程,自由层磁矩完全翻转为垂直膜面向下的状态(稳定态).图 4(g)为稳定态下,磁矩最终的翻转图像。

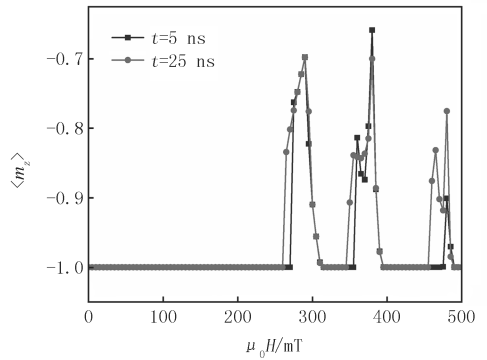
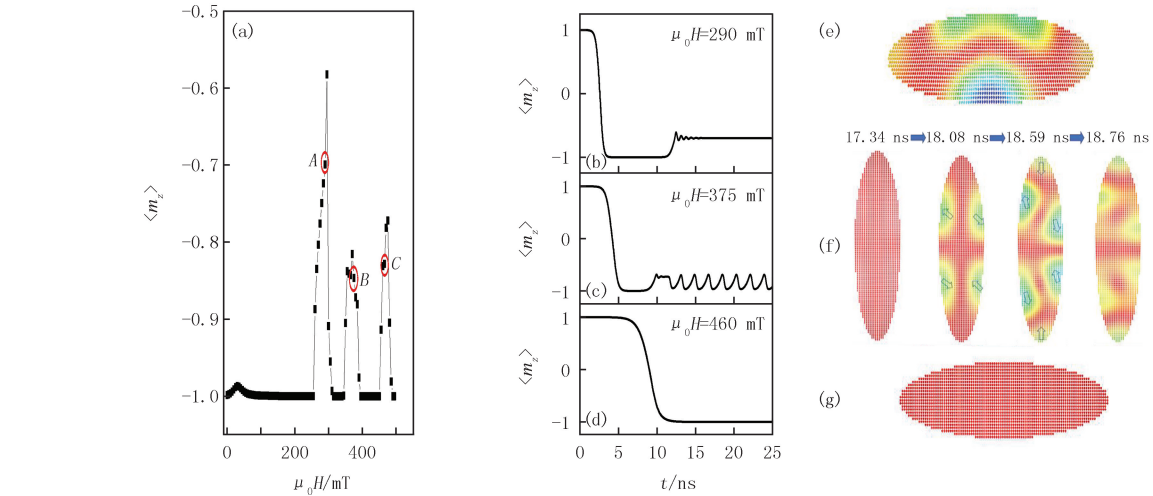


图3 $\beta=0.001^\circ$ 时,电流通入时间分别为 5 ns 和 25 ns 时,自由层磁矩最终翻转曲线

Fig.3 The curves indicate the final state for the magnetization of the free layer with the current pulse time is 5ns and 25ns at $\beta=0.001^\circ$



(a) 翻转曲线; (b) 亚稳态; (c) 振荡态; (d) 稳定态; (e) 亚稳态下磁矩最终的状态; (f) 振荡态 1 个周期内磁矩随时间的演化行为; (g) 稳定态下磁矩最终的状态(红色表示 $m_z = -1$)。

图4 $\beta=5^\circ$ 时,自由层磁矩最终随磁场变化的翻转情况

Fig.4 The final switching state for magnetization at $\beta=5^\circ$

对于自由层磁矩在凸起区域内的动力学行为,对图 1 中不同角度下磁矩在外加磁场从 250~500 mT 变化下的每个状态进行了统计,结果如图 5 所示.极化层磁矩倾角的变化,并不会影响磁矩的动力学行为.前期研究发现,电流的大小对凸起区域的范围影响不大,其影响主要来自于外加磁场的大小.在电流保持一定的情况下,自由层磁矩在自旋转矩作用下,将被拉向 z 轴的负方向,而各向异性场的作用是保持磁矩在垂直膜面的状态,外加磁场的影响是将磁矩推向 z 轴正方向.这说明自由层磁矩最终的状态是由于外磁场对磁矩进动以及垂直各向异性的共同影响产生的。

在自由层厚度不变的情况下,固定极化层磁矩倾角 $\beta=0.001^\circ$,磁纳米柱的长宽比分别为 1:1 (200 nm×200 nm), 2:1 (200 nm×100 nm), 3:1 (200 nm×67 nm) 和 4:1 (200 nm×50 nm).图 6 给出了自由层磁矩最终态随磁场的翻转曲线,结果显示不同的长宽比对凸起区域的影响很大,凸起区域只出现在长

宽比为 1:1 和 1:4 的情况中,而在其他 2 种比例中并没有出现.同时,磁性材料的垂直各向异性常数对凸起区域范围也有较大影响.各向异性常数 $K_u = 1.0 \times 10^5 \text{ J/m}^3$, $2.0 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 和 $3.0 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 的 3 种情况,其结果如图 7 所示.

3 结论

基于垂直磁各向异性的自旋纳米柱磁纳米柱结构,研究了倾斜的极化层磁矩模型中自由层磁矩的最终状态及其动力学特性.研究表明:极化层磁矩的倾斜角度、外加磁场、不同的磁纳米柱尺寸、以及材料的垂直磁各向异性常数等均是引起凸起区域出现的原因;随着外加磁场的变化,凸起区域出现的位置与外加磁场、磁纳米柱的尺寸及材料的垂直磁各向异性常数有关、与极化层磁矩倾角无关;在固定的极化层磁矩倾角下,凸起区域出现的位置与电流的通入时刻有关.未来可对产生这种物理现象的原因展开理论研究,探讨凸起区域出现的物理机制.希望所得研究结果能够加深对磁结构动力学行为物理机制的理解,进一步促进磁存储器件及自旋纳米振荡器的发展.

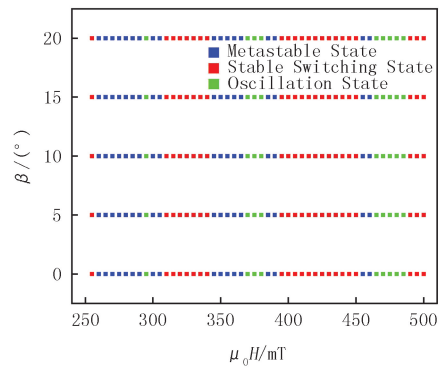


图5 不同极化层倾角下,磁矩最终状态随磁场变化分布的相位图
Fig.5 Phase diagram of magnetization final state distribution with the different tilted polarizer

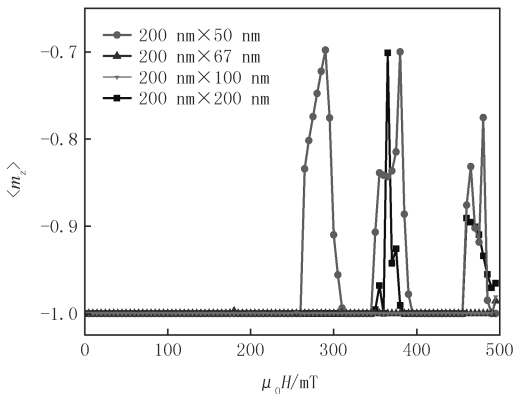


图6 不同磁纳米柱尺寸的自由层磁矩终态翻转曲线
Fig.6 The final switching state curves with the different sizes

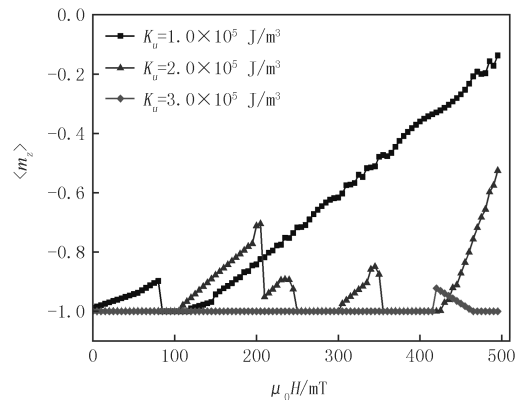


图7 改变 K_u 后的自由层磁矩终态翻转曲线
Fig.7 The final switching state curves with the different K_u

参 考 文 献

- [1] LIU Y Y, WANG X Q, XIE H K, et al. Effect of bilayer repeats on magnetic properties of Au-buffered Co/Ni multilayers with perpendicular magnetic anisotropy[J]. *Physics Letters A*, 2019, 383(34): 1-5.
- [2] MANGIN S, HENRY Y, RAVELOSONA D, et al. Reducing the critical current for spin-transfer switching of perpendicularly magnetized nanomagnets[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(1): 012502.
- [3] SONG M, XU Y, YANG J, et al. Low current writing perpendicular magnetic random access memory with high thermal stability[J]. *Materials & Design*, 2016, 92: 1046-1051.
- [4] ENLONG L, JOHAN S, CHANG W Y, et al. Top-Pinned STT-MRAM Devices With High Thermal Stability Hybrid Free Layers for High-Density Memory Applications[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(11): 1-5.
- [5] SHADMAN A, ZHU J G. High-speed STT MRAM incorporating antiferromagnetic layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(2): 022403-022403.
- [6] SILVA T J, RIPPARD W H. Developments in nano-oscillators based upon spin-transfer point-contact devices[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2008, 320(7): 1260-1271.
- [7] 李飞. 磁性纳米结构的磁动力学微磁学模拟[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
- [8] LI F. Micromagnetic Simulations of Magnetic Dynamics in Magnetic Nanostructures[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.
- [9] ZHOU Y, ZHANG H, LIU Y W, et al. Macrospin and micromagnetic studies of tilted polarizer spin-torque nano-oscillators[J]. *Journal of*

- Applied Physics, 2012, 112:063903
- [9] ZHANG H, LIN W W, STEPHANE M, et al. Signature of magnetization dynamics in spin-transfer-driven nanopillars with tilted easy axis [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102:012411.
- [10] LIN W, CUCCHIARA J, BERTHELOT C, et al. Magnetic susceptibility measurements as a probe of spin transfer driven magnetization dynamics [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(25):252503.
- [11] 吕刚, 张红, 侯志伟. 具有倾斜极化层的自旋阀结构中磁翻转以及磁振荡模式的微磁模拟 [J]. 物理学报, 2018, 67(17):262-268.
LYU G, ZHANG H, HOU Z W. Micromagnetic modeling of magnetization switching and oscillation modes in spin valve with tilted spin polarizer [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(17):262-268.
- [12] YIN H, LU Z, CHEN C, et al. Current driven spin oscillation in PMA/IMA composite nanowires—a novel spin torque based nano-oscillators [J]. Nanotechnology, 2019, 30(21):21-24.
- [13] 梁滔, 李铭. 自旋轨道耦合系统中的整数量子霍尔效应 [J]. 物理学报, 2019, 68(11):220-226.
LIANG T, LI M. Integer quantum Hall effect in a spin-orbital coupling system [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(11):220-226.
- [14] HE P B, ZHOU Z D, WANG R X, et al. Stability analysis of current-driven domain wall in the presence of spin Hall effect [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(9):093912.
- [15] CORRE P, BLANCO J M, ZHUKOVA V, et al. Engineering of Magnetic Softness and Domain Wall Dynamics of Fe-rich Amorphous Microwires by Stress-induced Magnetic Anisotropy [J]. Scientific reports, 2019, 9(1):12427.
- [16] GURUNATHAN T, MATTHEW W M T, POOI S L. Advances in self-healing supramolecular soft materials and nanocomposites [J]. Nano Convergence, 2019, 6(1):1-18.
- [17] PARAJULI S, IRFAN M, ZHANG X M, et al. Diameter dependent structural and magnetic properties of CoNi alloy nanotubes [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 500:166264.
- [18] RODIONOVA V, PEROV N. Characteristics of Magnetization Reversal of Magnetostatically Coupled Microwire-Based System [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2019, 32(10):3103-3107.
- [19] 赵聪鹏. 多场驱动自旋动力学的 LLGS 方法研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
ZHAO C P. Research on multi-field driven spin dynamics with LLGS method [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [20] 孔令尧. 磁斯格明子拓扑特性及其动力学微磁学模拟研究进展 [J]. 物理学报, 2018, 67(13):203-214.
KONG L Y. Research progress on topological properties and micro-magnetic simulation study in dynamics of magnetic skyrmions [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(13):203-214.

Dynamics of magnetization in the magnetic nanopillars induced by external magnetic field and current

Hou Zhiwei¹, Zhu Weifeng¹, Li Xia², Zhang Hong³

(1. Department of Physics, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Physics, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 3. Information Science and Engineering School, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Materials with perpendicular magnetic anisotropy have been intensively investigated due to their potential applications in the nonvolatile magnetic memory and spin-torque oscillators. For the magnetic nano-pillars, free layer and the spin-polarizer are consist of perpendicular anisotropic materials, micromagnetic simulations which based on LLGS equation, used to research the magnetization switching with the external magnetic fields and spin-transfer torque. The simulations indicate that some abnormally switching states (peak areas) can take place in the switching final state curves due to the magnitude of the external magnetic field, the size of the nano-pillar, or the perpendicular magnetic anisotropy of the free layer, but has no relation to the angle of the titled spin-polarizer. For the peak areas, we noticed that three dynamics models of the magnetization appear with the fixed angle of the spin-polarizer: metastable state, oscillating state, and stable state. We have established parametric phase diagram that changed with the magnetic field and the angle of the titled spin-polarizer.

Keywords: micromagnetic simulation; spin-transfer-torque; magnetic anisotropy