

Fast Motion of a Transverse Magnetic Domain Wall under an Alternating Resonant Magnetic Field

Youjun Wang¹, Ruifang Wang^{1,2}

¹Department of Physics, Xiamen University, Xiamen Fujian

²Collaborative Innovation Centre for Optoelectronic Semiconductors and Efficient Devices, Xiamen University, Xiamen Fujian

Email: wangrf@xmu.edu.cn

Received: Apr. 13th, 2018; accepted: May 4th, 2018; published: May 11th, 2018

Abstract

Eigen resonant modes of transverse Neel magnetic domain wall in a ferromagnetic nanostrip stimulated by alternating magnetic field are investigated by micromagnetic simulations. We choose the direction of the applied alternating magnetic field along the length, width and thickness of the nanostrip, and we observe twisting mode, breathing mode, translational mode and novel accordion mode of the domain wall. When the alternating magnetic field is applied along the strip width direction, the widths of the domain wall top and bottom ends present an antiphase vibration, we named it accordion mode. Further research shows that, while applying a constant driving magnetic field along the length direction of the nanostrip, superposing simultaneously an alternating magnetic field of resonant frequency to stimulate the twisting mode, translational mode or accordion mode of the magnetic domain wall, could significantly restrain the appearance of the Walker breakdown, thus greatly improve the propagation distance of the magnetic domain wall. The mechanism that the resonant motion of the domain wall can suppress the Walker breakdown is that these specific vibration modes can impede the birth of anti-vortex core in the narrower end of the transverse domain wall, thus avoiding the complex transformations of the transverse domain which is caused by the precession motion of the anti-vortex core.

Keywords

Transverse Magnetic Domain Wall, Resonant Modes, Micromagnetic Simulation

交变共振磁场下横向磁畴壁的快速输运

王友君¹, 王瑞方^{1,2}

¹厦门大学物理学系, 福建 厦门

²厦门大学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
Email: wangrf@xmu.edu.cn

收稿日期: 2018年4月13日; 录用日期: 2018年5月4日; 发布日期: 2018年5月11日

摘要

我们采用数值模拟方法研究了铁磁性纳米条带中横向奈尔磁畴壁在交变磁场作用下激发的各种本征振动模式。我们选择外加交变磁场的方向分别沿纳米条带的长度、宽度和厚度方向, 观察到了畴壁的扭转模式、呼吸模式、平移模式以及新颖的手风琴模式。当外加交变磁场沿条带宽度方向时, 畴壁上下两端的宽度呈现反相位振动, 我们将其命名为手风琴模式。进一步研究发现, 在沿纳米条带长度方向施加恒定驱动磁场的同时, 叠加共振频率的交变磁场以激发磁畴壁的扭转模式、平移模式或者手风琴模式, 可以显著抑制沃克解体的出现, 从而大幅提高磁畴壁的输运距离。畴壁的共振运动抑制沃克解体的机制在于这些特定振动模式能阻碍横向畴在其宽度较窄一端生成反涡核, 从而避免了反涡核的旋进运动导致的横向畴形态复杂变化。

关键词

横向磁畴壁, 共振模式, 微磁模拟

Copyright © 2018 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

1. 引言

近年来, 铁磁性纳米条带中单个磁畴壁在磁场或者自旋极化电流驱动下的高速运动[1] [2] [3], 被认为可以应用于信息存储和逻辑器件中[4] [5] [6], 从而受到大量研究小组的关注。人们熟知在铁磁性纳米条带中的头对头、尾对尾的横向磁畴壁和涡旋态型畴壁在没有外磁场情况下可以稳定存在。畴壁的具体形态取决于纳米条带的宽度和厚度等几何参数。在静态磁场的作用下, 畴壁一般沿磁场方向运动以减少体系的塞曼能。如果仅考虑塞曼能的变化, 那么一种预期是磁场强度越大则畴壁运动速度越快, 畴壁速度随磁场强度而线性增长。然而, 实际的情况是当磁场强度超过一个沃克临界场(Walker threshold field) [7] 后, 畴壁速度发生急剧下降。其原因在于, 在跨越沃克临界值后横向磁畴壁发生形变, 其内部反复产生涡旋态或者反涡旋态磁畴壁, 从而导致畴壁运动速度快速下降。该效应在信息存储和逻辑器件中应尽量避免, 因为畴壁的运动速度是决定这类器件的响应速度的主要因素。

因此, 如何提高磁畴壁的运动速度并避免磁畴壁的沃克解体(Walker breakdown)而产生的畴壁速度急剧下降成为一个重要的课题。近年来研究者们提出了多种思路来克服畴壁的沃克解体。Nakatani [8]和Cowburn [9]等人提出增加纳米条带的边缘粗糙度来抑制横向磁畴壁沃克解体的发生, 从而实现畴壁的高速输运。然而, Nakatani 等人提出的方案存在样品边缘不平整度难以控制的缺点, Cowburn 等人提出的梳状条带结构带来器件的面存储密度大幅下降的问题。Hertel 等人[10] [11]提出了铁磁性纳米管结构, 并实现了磁畴壁的超高速输运, 但是现有的微纳加工技术难以大量、精确地制备纳米管结构。Kim 等人

[12]提出了一种软磁的坡莫合金(permalloy, Fe_{0.2}Ni_{0.8})叠置于具有强垂直各向异性 FePt 之上的复合材料纳米条带结构以抑制畴壁运动过程中反涡核的产生,从而大幅提高了磁畴壁的运动速度。Weerts 等人[13]除了沿纳米条带方向的恒定磁场之外再施加一个交变磁场,他们发现了畴壁输运过程中沃克解体被压制的现象。但是,在运动过程中仍然观察到磁畴壁形状发生了复杂变化。

在本文中,我们对含有一个横向磁畴壁的坡莫合金纳米条带样品施加脉冲交变磁场,通过傅里叶分析找出了样品中横向磁畴壁的各本征频率及对应的各种振动模式[14][15][16][17]。除了前人已发现的平移模式、呼吸模式和扭转模式之外,我们观察到了一种新颖的手风琴模式。通过对样品施加一个沿条带轴向上的恒定外磁场,并叠加一个对应于磁畴壁本征频率的交变磁场,我们观察到当交变磁场激发出畴壁的平移模式、扭转模式和手风琴模式时,畴壁在输运过程中发生简单的、周期性的形状变化,沃克解体现象得到显著抑制。与仅施加恒定外磁场的情形对比,畴壁的输运距离大幅提升。

2. 模型和方法

本文采用 LLG 微磁软件进行模拟。我们的微磁模拟计算的模型是一个尺寸为 $3004 \times 60 \times 8 \text{ nm}^3$ 的坡莫合金纳米条带(见图 1(a))。在数值计算中,该样品被分割为 $4 \times 4 \times 4 \text{ nm}^3$ 的单元,并假设每个单元内部的磁化强度相同。我们的数值模拟采用了坡莫合金材料的常用参数,即饱和磁化强度 M_s 设为 800 kA/m ,交换作用常数 A 为 $1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}$,磁晶各向异性系数为 0,吉尔伯特阻尼系数 α 为 0.01。图 1(b)展示了样品的初始磁矩分布,在纳米条带的中央(即 $x = 1502 \text{ nm}$ 处)存在一个头对头的 180° 奈尔型磁畴壁。畴壁中央的磁距沿 $+y$ 方向(畴壁极性朝上),因此畴壁的杂散场作用导致该横向畴呈现上部较宽、下部较窄的草莓状。在沿 x 方向的恒定磁场驱动下,由于较窄的一端磁距分布的空间梯度较大,因而在横向畴宽度较窄的一端易生成一个极性沿 z 方向的磁核,该磁核在回旋力作用下将向纳米条带另一端运动,于是极性朝上的横向畴将以反涡旋态为中间态过渡为极性朝下的横向畴[13][18]。该过程导致磁畴沿 x 方向的运动速度骤减,即发生了沃克解体。

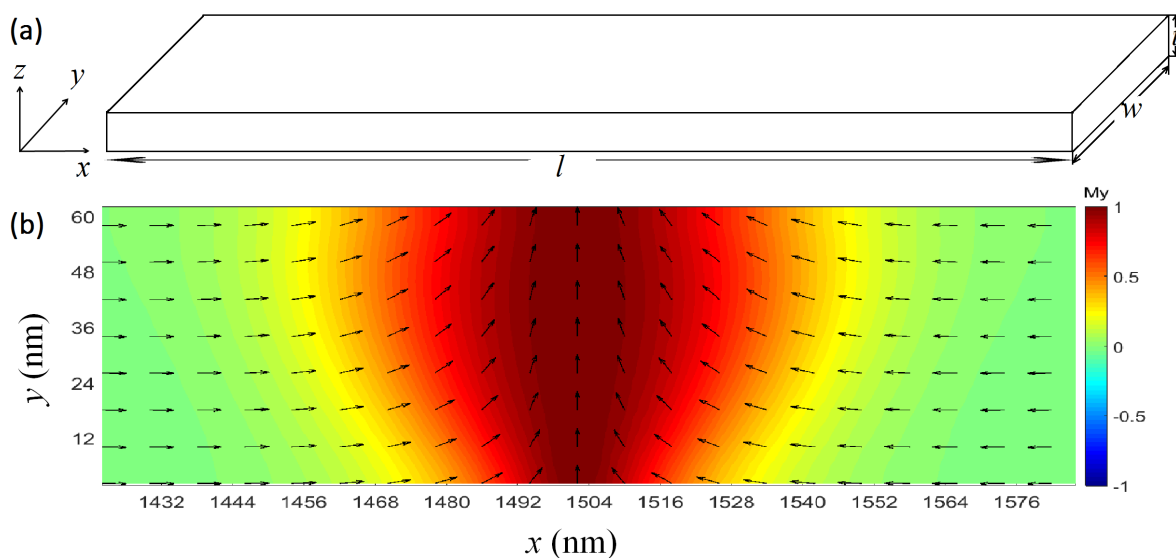


Figure 1. (a) Schematic depicting the geometry of permalloy nanostrip (length $l = 3004 \text{ nm}$, width $w = 60 \text{ nm}$, thickness $t = 8 \text{ nm}$) and coordinate axes. (b) Initial magnetization distribution of a head to head transverse Neel magnetic domain wall. The colorbar represents the magnetization component in y direction, the black arrows represent the projection of magnetization in x - y plane

图 1. (a) 坡莫合金纳米条带的示意图(长 $l = 3004 \text{ nm}$ 、宽 $w = 60 \text{ nm}$ 、厚 $t = 8 \text{ nm}$)和坐标轴。(b) 头对头的横向奈尔磁畴壁的初始态磁化分布图,色彩条状图代表磁化强度在 y 方向上的分量,箭头表示磁化强度矢量在 x - y 平面上的投影

3. 横向畴的共振模式

我们对该纳米条带分别施加了沿 x 、 y 、 z 三个方向的全域 Sinc 函数磁场, 然后记录下样品的磁化强度随时间的变化, 通过傅里叶变换找出了纳米条带中横向畴共振的本征频率, 如图 2 所示。在不同方向的外加磁场作用下, 横向畴有不同的共振频率, 表现出不同的共振模式。在此基础上, 我们利用反向傅里叶变换画出了样品中横向畴在各本征频率下振动的演示动画。我们按照外加磁场的方向对各共振频率对应的振动模式进行了分类研究, 最终选取了最具代表性的几个振动模式进行详细讨论, 如图 3 所示。

沿 x 方向施加的 Sinc 场在样品中激发了 6.2 GHz 对应的 1 阶扭转模式、15.9 GHz 对应的 2 阶扭转模式以及 42.7 GHz 对应的 4 阶扭转模式。图 3(a) 左右两列分别对应横向畴壁在 1 阶扭转模式下 m_y 和 m_z 在不同时刻的空间分布图。图中黑色空心箭头表示畴壁振动方向。当 $t = 60$ ps 时, 畴壁宽度较宽的一端(即 $y = 60$ nm 处)向右运动, 而横向畴较窄的一端(即 $y = 0$ nm 处)则向左运动, 使得横向畴中轴线向右扭转; 当 $t = 140$ ps 时, 畴壁宽度较宽的一端向左运动, 而较窄的一端则向右运动, 使得横向畴中轴线向左扭转; $t = 100$ ps 和 $t = 180$ ps 时畴壁处于平衡位置, 注意到此时纳米条带两端产生了 z 方向上的磁矩分量。图 3(b) 和图 3(c) 分别对应于 2 阶和 4 阶的扭转模式。这两种扭转模式下畴壁振动分别存在 2 个和 4 个节点(即振幅为零的点), 其对应的本征频率明显高于 1 阶模式。

对纳米条带施加沿 y 方向的 Sinc 函数磁场激发了本征频率为 9.4 GHz 的呼吸模式以及 12.9 GHz 的手风琴模式。图 2(d) 左右两列时间序列图分别对应 9.4 GHz 频率下横向畴壁的 m_y 和 m_z 在不同时刻的空间分布图。当 $t = 65$ ps 时, 横向畴上下两端同时向内压缩; 当 $t = 115$ ps 时, 磁畴壁上下两端则同时向外扩张; $t = 90$ ps 和 $t = 140$ ps 时畴壁处于平衡位置, 此时横向畴在 z 方向上的磁矩分量 m_z 呈准均匀分布。该模式中, 横向畴的上下两端的振动方向一致, 即两端同时经历压缩 - 扩张 - 压缩的周期振动, 但畴壁中轴线一直保持不变。图 3(e) 左右两列时间序列图分别对应 12.9 GHz 频率下横向畴的 m_y 和 m_z 在不同时刻

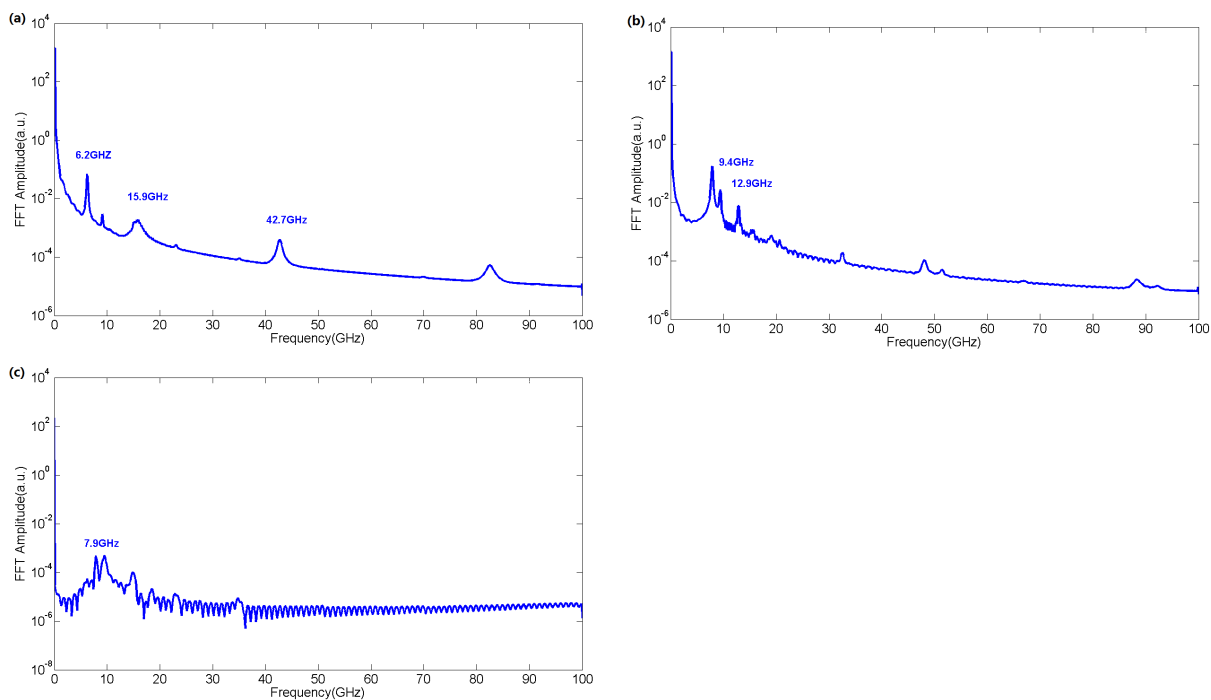


Figure 2. (a), (b), (c) respectively corresponds the resonant frequency spectrums of the nanostrip applied Sinc functional field along x , y , z

图 2. (a), (b), (c) 分别是在沿 x , y , z 方向施加 Sinc 函数场作用下纳米条带的振动频谱

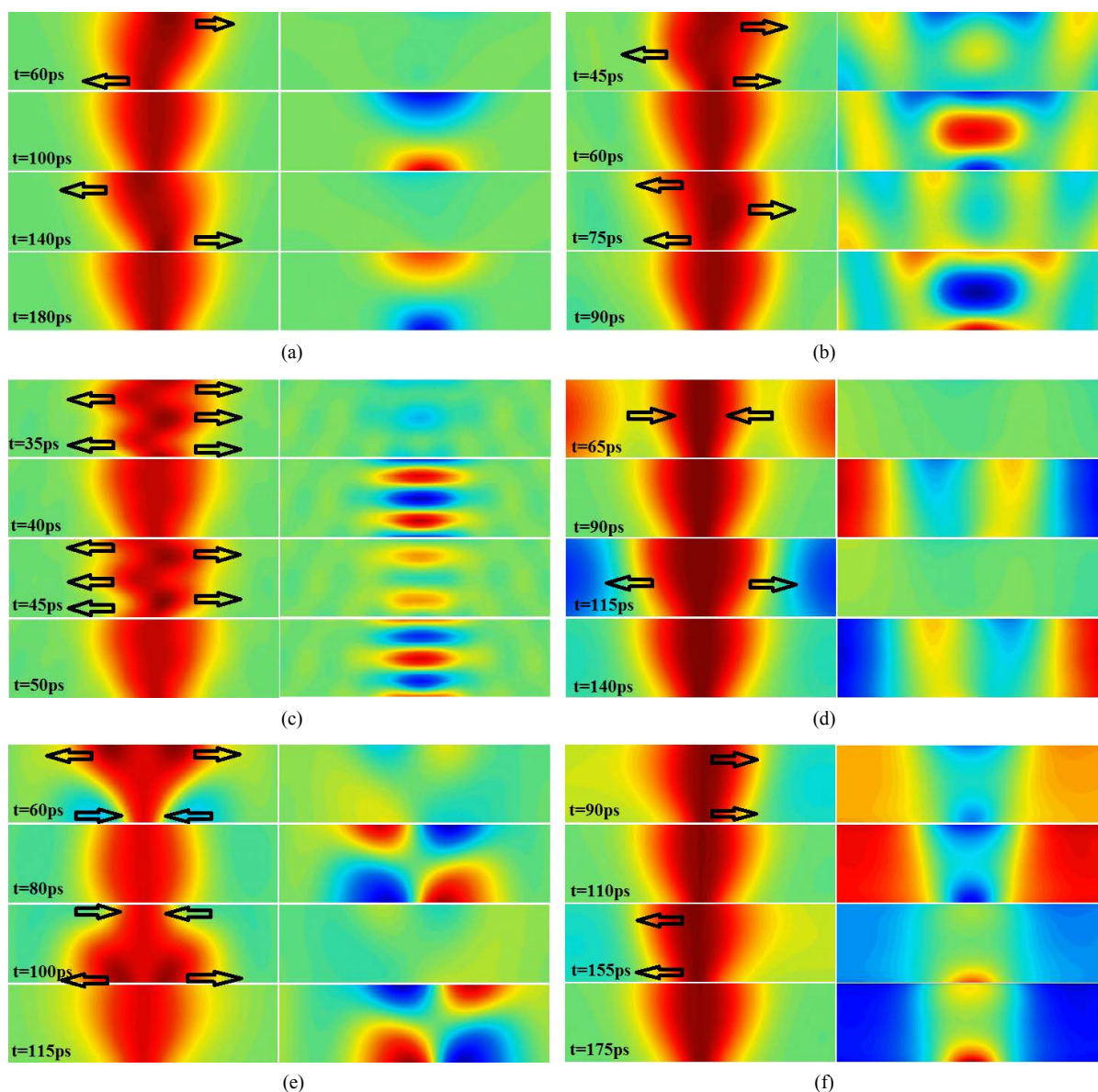


Figure 3. (a) 6.2 GHz corresponds the $m_y m_z$ amplitude diagrams of the twisting mode, (b) 15.9 GHz corresponds the $m_y m_z$ amplitude diagrams of the second-order twisting mode, (c) 42.7 GHz corresponds the $m_y m_z$ amplitude diagrams of the fourth-order twisting mode, (d) 9.4 GHz corresponds the $m_y m_z$ amplitude diagrams of the breathing mode, (e) 12.9 GHz corresponds the $m_y m_z$ amplitude diagrams of the accordion mode, (f) 7.9 GHz corresponds the $m_y m_z$ amplitude diagrams of the translational mode

图 3. (a) 6.2 GHz 对应的扭转模式 $m_y m_z$ 振幅图, (b) 15.9 GHz 对应的 2 阶扭转模式 $m_y m_z$ 振幅图, (c) 42.7 GHz 对应的 4 阶扭转模式 $m_y m_z$ 振幅图, (d) 9.4 GHz 对应的呼吸模式 $m_y m_z$ 振幅图, (e) 12.9 GHz 对应的手风琴模式 $m_y m_z$ 振幅图, (f) 7.9 GHz 对应的平移模式 $m_y m_z$ 振幅图

的空间分布图。当 $t = 60$ ps 时, 横向畴上端部分在向外扩张, 而其下端部分则在向内压缩; 当 $t = 100$ ps 时, 横向畴上端部分在向内压缩, 而其下端部分则在向外扩张; 当 $t = 80$ ps 和 $t = 115$ ps 时, 磁畴壁在纳米条带上下两端的宽度基本一致, 此时畴壁在 z 方向上的磁矩分量在纳米条带两端出现四个极大值。像这样磁畴壁上下两端的宽度振动相位相差 180 度, 即一端宽度发生收缩时另一端的宽度在扩张, 但畴壁中轴线却保持不变, 我们将这种振动模式命名为手风琴模式。该模式是我们发现的一种新颖的横向磁畴壁振动模式, 在前人的研究中, 横向畴在 y 方向交变场作用下的振动模式多为呼吸模式。但呼吸模式并

不能提高横向畴在恒定磁场驱动下沿纳米条带方向运动的稳定性。

沿 z 方向施加的 Sinc 场在样品中激发了 7.9 GHz 对应的平移模式, 图 3(f) 左右两列时间序列图分别对应 7.9 GHz 频率下横向畴在 y 和 z 方向上的磁矩分量分布图。当 $t = 90$ ps 时, 横向畴整体向右偏移, 畴壁右半部分受到轻微压缩; 当 $t = 155$ ps 时, 横向畴整体向左偏移, 畴壁左半部分受到轻微压缩; $t = 110$ ps 和 $t = 175$ ps 时畴壁恢复至平衡位置, 此时横向畴在纳米条带上下两端产生了 z 方向上的磁矩分量 m_z 。像这样畴壁作为一个整体同向运动的模式被称为平移模式。

4. 横向畴振动模式对其运动稳定性的影响

我们在对纳米条带施加一个沿 x 方向的 30 oe 恒定磁场的同时叠加了一个 200 oe 的正弦共振磁场以分析共振模式对横向畴运动的影响。结果表明交变磁场激发的横向畴的扭转模式、手风琴模式和平移模式能显著提高横向畴的结构稳定性, 从而大幅提高畴壁的输运距离。我们采用纳米条带在 x 方向上的磁化强度分量的平均值 $\langle m_x \rangle$ 来定义畴壁的位置坐标[18]: $x = \langle m_x \rangle \cdot l/2 + l/2$, 其中 $l = 3004$ nm 是磁性纳米条带的总长度。

图 4 显示了沿 x 方向运动的畴壁的位置和速度随时间的变化。在沿 x 方向的 30 oe 恒定磁场驱动下(图 4, 黑色实线), 畴壁的运动速度由零逐渐增加至约 500 m/s, 并在 $t = 2000$ ps 左右时发生沃克解体, 并导致其运动速度迅速下降, 在 4000 ps 时间内畴壁位移约为 1150nm。与此对比, 我们探索了在 30 oe 恒定驱动磁场之外, 同时施加振幅为 $h_0 = 200$ oe 的正弦交变磁场激发出的畴壁的扭转模式(图 4, 红色实线)、

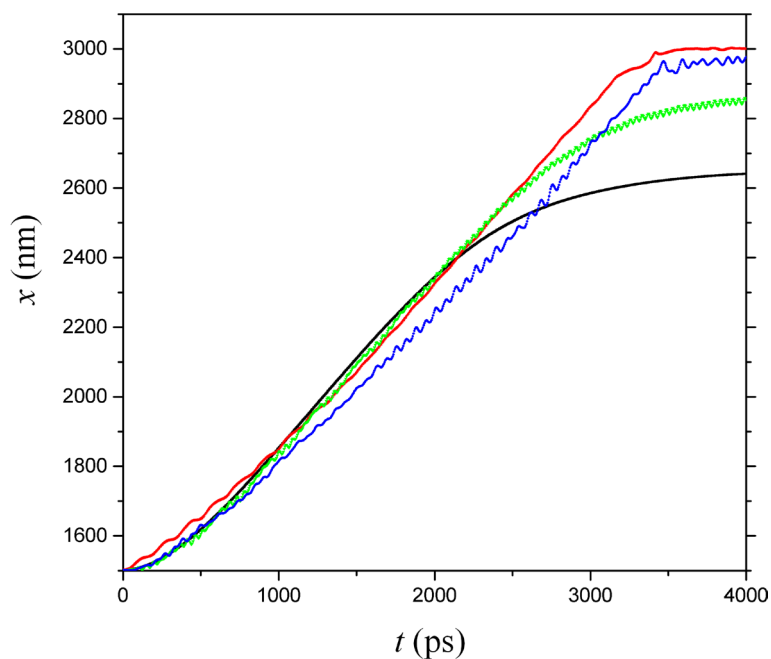


Figure 4. Displacement-time diagram of transverse domain wall in applying only a 30 oe constant driving field along x (the black solid line) and superposing simultaneously the constant field with a sin field (the colorized solid lines). The red, green, blue line respectively corresponds the alternating magnetic field which the frequency is 6.2 GHz, 12.9 GHz, 7.9 GHz. The amplitude of alternating magnetic field is 200 oe

图 4. 仅施加恒定 x 方向、强度为 30 oe 的驱动场(黑色实线)以及在恒定场外又叠加正弦交变磁场(彩色实线)情形下横向畴的位移与时间关系图。红色、绿色、蓝色实线对应的交变磁场频率分别为 6.2 GHz, 12.9 GHz 和 7.9 GHz。交变磁场的振幅为 200 oe

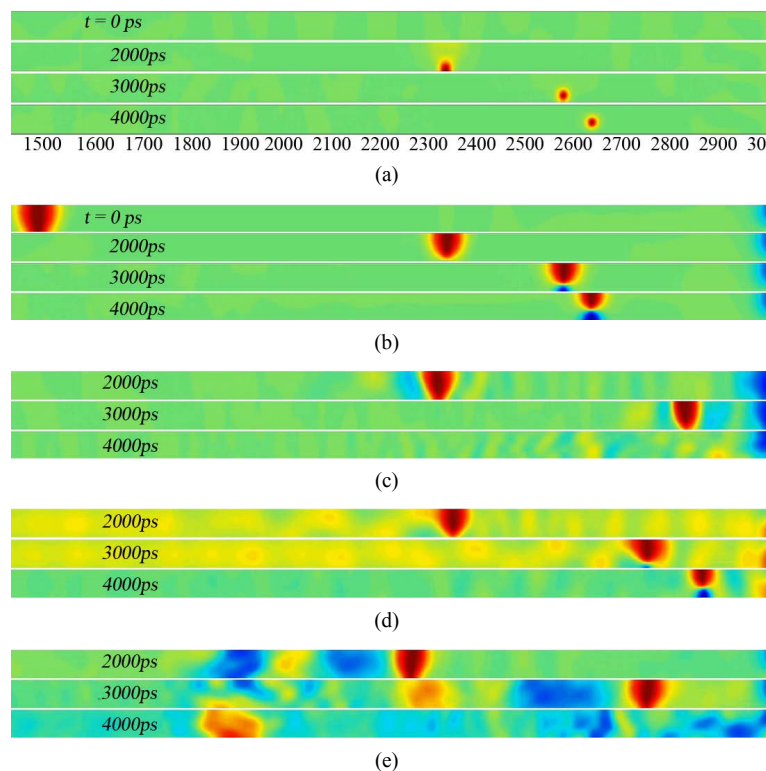


Figure 5. (a), (b) respectively correspond m_z and m_y distributions in different moments in applying only a constant driving field along x direction. (c), (d), (e) respectively correspond m_y distributions in different moments superposing simultaneously the constant field with a sin field

图 5. (a)、(b)分别对应只施加 x 方向恒定驱动场情况下, 不同时刻时样品 m_z 和 m_y 的空间分布。(c)、(d)、(e)分别对应同时施加恒定驱动场及特定方向的正弦交变场的情况下, 不同时刻时样品 m_y 的空间分布

手风琴模式(图 4, 绿色实线)或平移模式(图 4, 蓝色实线)有效增加了畴壁的传输距离。图 4 显示, 共振磁场作用下, 畴壁发生沃克解体的时间大致从 2000 ps 分别推迟至 3200 ps (扭转模式)、2600 ps (手风琴模式)和 3500 ps (平移模式)。因此, 交变磁场激发的畴壁共振运动导致在 4000 ps 内的位移显著增加, 几乎都运动至了纳米条带的右边界。

为了探究特定振动模式能提高横向畴运动稳定性的原因, 我们绘制了各个时刻横向畴的磁化强度分布图。如图 5(a)、(b)分别显示在 x 方向 30 oe 恒定驱动场驱动下, 样品中不同时刻 m_z 和 m_y 的分布图。 $t = 0$ ps 时刻, 横向畴壁处于纳米条带的中央位置($x = 1502$ nm)。 $t = 2000$ ps 时刻, 在畴壁宽度较窄的一端生成了一个涡核, 该涡核在外磁场产生的回旋力作用下沿 y 方向运动。在横向磁畴壁转变为反涡旋态磁畴壁的过程中, 畴壁沿 x 方向的运动变慢。王向荣等人[18]把横向畴运动发生沃克衰减的原因归结为在一定大小的驱动磁场作用下, 横向畴宽度较窄一端反涡核的产生、横向运动、湮灭及其伴随的横向畴极性翻转。在同时施加恒定驱动场和正弦交变场以激发扭转模式(图 5(c))或者平移模式(图 5(e))时, 畴壁的共振运动阻碍了涡核生成, 因此畴壁的平移速度基本保持不变, $t = 4000$ ps 前畴壁抵达纳米条带的边界。如图 5(d)所示, 相较于只加了恒定场的情况, 横向畴宽度较窄一端的涡核产生过程也被手风琴振动模式延迟了。

5. 结论

通过对坡莫合金纳米条带分别施加沿条带长度、厚度和宽度方向的脉冲交变磁场, 我们研究了条带

中横向奈尔磁畴壁的本征振动模式。我们观察到了畴壁的扭转模式、呼吸模式、平移模式以及新颖的手风琴模式。我们进一步探索了在沿纳米条带长度方向恒定驱动磁场之上叠加共振交变磁场以激发磁畴壁的本征振动。研究发现交变磁场激发的畴壁扭转模式、手风琴模式或者平移模式, 可以显著抑制沃克解体的出现, 磁畴壁的输运距离大幅提高。畴壁在交变磁场作用下产生的共振运动有效阻碍了横向畴在其宽度较窄一端生成反涡核, 从而避免了反涡核的旋进运动导致横向畴形态发现复杂变化, 以及由此带来的畴壁输运速度急剧下降现象。

未来, 我们将探讨纳米条带的本征振动模式与条带的截面形状(宽度与厚度之比)的关系, 并搞清楚交变磁场激发的畴壁共振运动抑制畴壁内部产生反涡核的物理机制, 以及呼吸模式未能有效提高畴壁输运速度的物理因素。

基金项目

作者感谢国家自然科学基金(项目编号 10974163、11174238)提供的经费支持。

参考文献

- [1] Parkin, S.S.P., Hayashi, M. and Thomas, L. (2008) Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory. *Science*, **320**, 190-194. <https://doi.org/10.1126/science.1145799>
- [2] Berger, L. (1996) Emission of Spin Waves by a Magnetic Multilayer Traversed by a Current. *Physical Review B*, **54**, 9353. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.9353>
- [3] Li, Z. and Zhang, S. (2003) Magnetization Dynamics with a Spin-Transfer Torque. *Physical Review B*, **68**, 024404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.024404>
- [4] Allwood, D.A., Xiong, G., Faulkner, C.C., Atkinson, D., Petit, D. and Cowburn, R.P. (2005) Magnetic Domain-Wall Logic. *Science*, **309**, 1688-1692. <https://doi.org/10.1126/science.1108813>
- [5] Wagner, K., Kákay, A., Schultheiss, K., Henschke, A., Sebastian, T. and Schultheiss, H. (2016) Magnetic Domain Walls as Reconfigurable Spin-Wave Nanochannels. *Nature Nanotechnology*, **11**, 432-436. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.339>
- [6] Hertel, R., Wulfhekel, W. and Kirschner, J. (2004) Domain-Wall Induced Phase Shifts in Spin Waves. *Physical Review Letters*, **93**, 257202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.257202>
- [7] Schryer, N.L. and Walker, L.R. (1974) The Motion of 180° Domain Walls in Uniform DC Magnetic Fields. *Journal of Applied Physics*, **45**, 5406. <https://doi.org/10.1063/1.1663252>
- [8] Nakatani, Y., Thiaville, A. and Miltat, J. (2003) Faster Magnetic Walls in Rough Wires. *Nature Materials*, **2**, 521-523. <https://doi.org/10.1038/nmat931>
- [9] Lewis, E.R., Petit, D., O'Brien, L., Fernandez-Pacheco, A., Sampaio, J., Jausovec, A.V., Zeng, H.T., Read, D.E. and Cowburn, R.P. (2010) Fast Domain Wall Motion in Magnetic Comb Structures. *Nature Materials*, **9**, 980-983. <https://doi.org/10.1038/nmat2857>
- [10] Yan, M., Kákay, A., Gliga, S. and Hertel, R. (2010) Beating the Walker Limit with Massless Domain Walls in Cylindrical Nanowires. *Physical Review Letters*, **104**, 057201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.057201>
- [11] Hertel, R. (2016) Ultrafast Domain Wall Dynamics in Magnetic Nanotubes and Nanowires. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **28**, 483002. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/28/48/483002>
- [12] Lee, J.Y., Lee, K.S. and Kim, S.K. (2007) Remarkable Enhancement of Domain-Wall Velocity in Magnetic Nanostripes. *Applied Physics Letters*, **91**, 122513. <https://doi.org/10.1063/1.2789176>
- [13] Weerts, K., Van Roy, W., Borghs, G. and Lagae, L. (2010) Suppression of Complex Domain Wall Behavior in $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ Nanowires by Oscillating Magnetic Fields. *Applied Physics Letters*, **96**, 062502. <https://doi.org/10.1063/1.3298641>
- [14] Metaxas, P.J., Albert, M., Lequeux, S., Cros, V., Grollier, J., Bortolotti, P., Anane, A. and Fangohr, H. (2016) Resonant Translational, Breathing, and Twisting Modes of Transverse Magnetic Domain Walls Pinned at Notches. *Physical Review B*, **93**, 054414. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.054414>
- [15] Bedau, D., Kläui, M., Krzyk, S., Rüdiger, U., Faini, G. and Vila, L. (2007) Detection of Current-Induced Resonance of Geometrically Confined Domain Walls. *Physical Review Letters*, **99**, 146601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.146601>

-
- [16] Wang, X.-G., Guo, G.-H., Zhang, G.-F., Nie, Y.-Z., Xia, Q.-L. and Li, Z.-X. (2013) Spin-Transfer Torque Induced Domain Wall Ferromagnetic Resonance in Nanostrips. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **332**, 56-60.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.12.013>
- [17] Mori, M., Koshibae, W., Hikino, S. and Maekawa, S. (2014) Possible Method to Observe the Breathing Mode of a Magnetic Domain Wall in the Josephson Junction. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **26**, 255702.
<https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/25/255702>
- [18] Yuan, H.Y. and Wang, X.R. (2014) Birth, Growth and Death of an Antivortex during the Propagation of a Transverse Domain Wall in Magnetic Nanostrips. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **368**, 70-74.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.05.019>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3512, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: cmp@hanspub.org