

## 消磁场对纳米铁磁线磁畴壁动力学行为的影响\*

范喆<sup>1)</sup> 马晓萍<sup>1)</sup> 李尚赫<sup>2)</sup> 沈帝虎<sup>2)</sup> 朴红光<sup>1)2)†</sup> 金东炫<sup>2)</sup>

1) (淮海工学院理学院, 连云港 222005)

2) (忠北国立大学物理系, 清州 361-763, 韩国)

(2011年7月28日收到; 2011年10月14日收到修改稿)

为了实现基于磁畴壁运动的自旋电子学装置, 掌握磁畴壁动力学行为是重要争论之一. 研究了在外磁场驱动下 L-型纳米铁磁线磁畴壁的动力学行为. 通过微磁学模拟, 在各种外磁场的驱动下考察了纳米铁磁线磁畴壁的动力学特性; 在较强外磁场的驱动下, 在不同厚度纳米线上考察了纳米线表面消磁场对磁畴壁动力学行为的影响. 为了进一步证实消磁场对磁畴壁动力学的影响, 在垂直于纳米线表面的外磁场辅助下分析了磁畴壁的动力学行为变化. 结果表明, 随着纳米线厚度和外驱动磁场强度的增加, 增强了纳米线表面的消磁场的形成, 使得磁畴壁内部自旋结构发生周期性变化, 导致磁畴壁在纳米线上传播时出现 Walker 崩溃现象. 在垂直于纳米线表面的外磁场辅助下, 发现辅助磁场可以调节消磁场的强度和方向. 这意味着利用辅助磁场可以有效地控制纳米铁磁线磁畴壁的动力学行为.

**关键词:** 铁磁性纳米线, 磁畴壁运动, Walker 崩溃, 微磁学模拟

**PACS:** 75.60.Ch, 75.78.-n, 75.78.Cd

## 1 引言

磁畴壁是指在磁性材料中不同磁畴之间的临界区域<sup>[1,2]</sup>. 从磁畴壁内的电子自旋结构来看, 相邻的自旋之间是以微小的角度相错位, 使得内部的每个自旋多少偏离了易磁化轴. 因此, 磁畴壁的能量主要是以各向异性能和交换能的形式来储存. 当施加外磁场时, 磁畴壁为了达到 Zeeman 能最小化而开始移动, 表现出类似于粒子的动力学行为特性. 这种磁畴壁的伪粒子动力学特性引起了许多研究者的关注, 并提出了各种基于磁畴壁运动的自旋电子学元件<sup>[3-6]</sup>. 近年来, 自旋矩 (spin torque) 现象的研究变得格外火热, 它不是施加外磁场来驱动磁畴壁, 而是以自旋电流来实现磁畴壁的驱动<sup>[7]</sup>. 这一革命性进展, 再一次推动了基于磁畴壁运动的逻辑元件、信息存储装置及其他自旋电子学装置的研发进程<sup>[8-10]</sup>. 因此, 在外磁场或自旋电流的驱动下, 掌握几百或几十纳米宽的纳米线上的磁畴壁动力学行为成为目前微磁学研究的重

要热门课题之一. 最近几年, 关于纳米铁磁线磁畴壁传播的动力学行为及其内部自旋结构的微磁学模拟结果<sup>[11-14]</sup>和相关实验结果<sup>[15,16]</sup>已有许多报道. 众所周知, 在较弱外磁场下, 由于横向磁畴壁 (transverse domain wall) 内部的自旋和外磁场又乘而形成一种场矩 (field torque), 这种场矩使磁畴壁内部自旋转向纳米线表面且形成许多自由磁极, 从而在纳米线表面上产生消磁场. 在这种消磁场的作用下, 磁畴壁内部的自旋形成另一种与外磁场方向一致的场矩作用, 从而使横向磁畴壁沿着外磁场方向移动. 然而, 随着外磁场强度的增加, 来自外磁场的场矩克服纳米线表面的消磁作用, 使得横向磁畴壁内部自旋结构发生复杂的变化, 形成反旋涡形磁畴壁 (antivortex domain wall) 结构, 从而导致磁畴壁的平均运动速度骤然降低. 这种现象我们称之为 Walker 崩溃 (Walker breakdown) 现象<sup>[17]</sup>. 为了实现基于磁畴壁运动的超高速自旋电子学装置, 理解和控制 Walker 崩溃现象成为新的挑战之一. 通过以前的工作, 我们认识到纳米铁磁线厚度直接影响

\* 韩国国家研究基金 (批准号: 2010-0004535, 2010-0021735) 资助的课题.

† E-mail: hgpiiao@tsinghua.edu.cn

磁畴壁传播的动力学行为<sup>[18]</sup>,但至今没有对其物理学机理进行深入探讨的相关报道.

考虑到纳米铁磁线的磁畴壁动力学行为与纳米线厚度有着密切关联,而且纳米线表面消磁场的形成又直接关系到磁畴壁的动力学行为,本文利用微磁学模拟的方法,在外磁场驱动条件下研究了L-型纳米线磁畴壁的动力学行为.通过改变驱动磁场的强度,分析了纳米线磁畴壁传播的Walker崩溃现象;而且,在Walker崩溃区域较强外磁场的驱动下,考察了在不同厚度纳米线上磁畴壁的动力学行为特征.此外,在垂直于纳米线表面的外磁场辅助下,进一步分析了纳米线表面的消磁场对磁畴壁动力学行为的各种影响.

## 2 微磁学模拟

本文利用OOMMF (the object oriented micro-magnetic framework) 软件<sup>[19]</sup>,对纳米铁磁线的微磁学进行模拟<sup>[20-22]</sup>.OOMMF是基于Landau-Lifshitz-Gilbert磁化矢量动力学方程的微磁学模拟软件<sup>[23,24]</sup>:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = - \left| \frac{\gamma}{1-\alpha^2} \right| \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \left| \frac{\gamma}{1-\alpha^2} \right| \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}), \quad (1)$$

其中, $\alpha$ 表示为吉尔伯特阻尼系数, $\gamma$ 表示为空间

旋磁率, $\mathbf{M}$ 表示为磁化量, $M_s$ 表示为饱和磁化量, $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ 表示为有效磁场.

为了符合实际情况,我们设计了一个L-型纳米铁磁线.纳米线的有效直线长度为2000 nm,宽度为50 nm,而纳米线的厚度设为可变参量 $t$  nm.为了易于形成一个横向磁畴壁,在笔直纳米线的左端设计了一个1/4环形纳米线,其内径为450 nm,外径为500 nm.为了防止在纳米线的右端和1/4环形纳米线左上端形成多余的磁畴壁,我们特意设计了高宽比为3:1的等腰三角形末端<sup>[13,18]</sup>.关于纳米铁磁线的形状和尺度具体描述在图1中.在本文所有微磁学模拟中,吉尔伯特阻尼系数设置为 $\alpha = 0.01$ ,最小单元的尺度设置为 $5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm} \times t \text{ nm}$ .为了充分地利用纳米线形状的各向异性,其物质参数选择了磁晶各向异性较小的坡莫合金(permalloy),而且饱和磁化量设置为 $M_s = 8 \times 10^5 \text{ A/m}$ ,交换能常数设置为 $A = 13 \times 10^{-12} \text{ J/m}$ .

在所有微磁学模拟开始之前,我们利用 $45^\circ$  倾斜的 $H_s = 50\sqrt{2} \text{ mT}$  外磁场,对L-型纳米铁磁线进行饱和磁化,如图1所示.然后,在无任何外磁场的条件下,经过5 ns充分的松弛时间使纳米线内自旋分布处于亚稳定状态<sup>[18]</sup>.此时,一个横向磁畴壁巧妙地形成在1/4环形纳米线上,其磁畴壁的磁化状况详细描述在图1中.初始化完毕后,在外磁场 $H_x$ 驱动下具体模拟了磁畴壁的各种动力学行为.

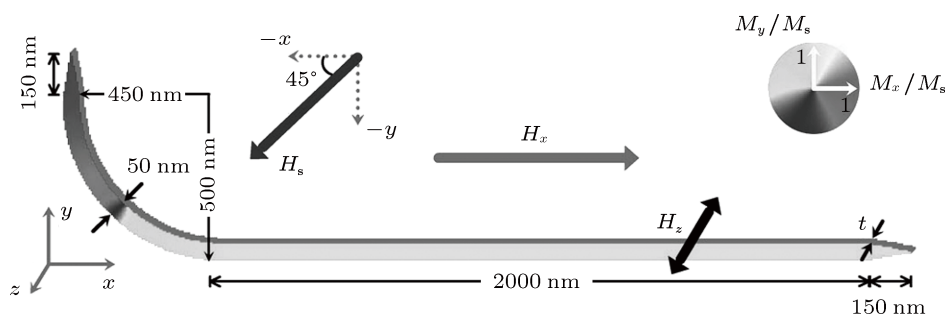


图1 L-型铁磁性纳米线的几何形状及尺寸.粗箭头表示饱和磁场( $H_s$ )、外驱动磁场( $H_x$ )及辅助磁场( $H_z$ )的方向.码表示在 $xy$ 平面上自旋的方向

## 3 磁畴壁的动力学行为

为了研究在不同外磁场驱动下L-型纳米线磁畴壁的动力学行为,我们系统地改变了外磁场的强度,其变化区间从2 mT到5 mT.通过微磁

学模拟,我们分析了一个典型的磁畴壁动力学特征——Walker崩溃现象,并获得了磁畴壁随时间变化的位置曲线.如图2(a)所示,我们发现在较弱(小于2.2 mT)的外磁场驱动下,磁畴壁无法从环形纳米线移动到笔直纳米线上.这是由于在环形纳米

线的边缘粗糙结构对磁畴壁的钉扎作用 (pinning effect), 使得磁畴壁牢牢地钉扎在环形纳米线上. 当外驱动磁场的强度等于 2.2 mT 时, 磁畴壁获得足够大的 Zeeman 能, 摆脱这种粗糙结构的钉扎作用, 而在纳米线上突然以  $\bar{v} = 392.8$  m/s 的速度开始快速移动. 而且, 随着外磁场强度的逐渐增加, 磁畴壁的平均速度也随之加快. 然而, 当外磁场强度增加到 2.9 mT 时, 磁畴壁传播过程中开始出现 Walker 崩溃现象. 在 Walker 崩溃现象出现后, 发现在磁畴壁传播过程中呈现了一种周期往返的振荡行为. 而且, 这种振荡行为随着外磁场强度的增加, 振荡周期明显缩短, 其空间振荡幅度也明显减小. 因此磁畴壁的平均移动速度也从  $\bar{v} = 451.4$  m/s ( $H_{\text{ext}} = 2.8$  mT) 急剧跌落至  $\bar{v} = 74.4$  m/s ( $H_{\text{ext}} = 50$  mT).

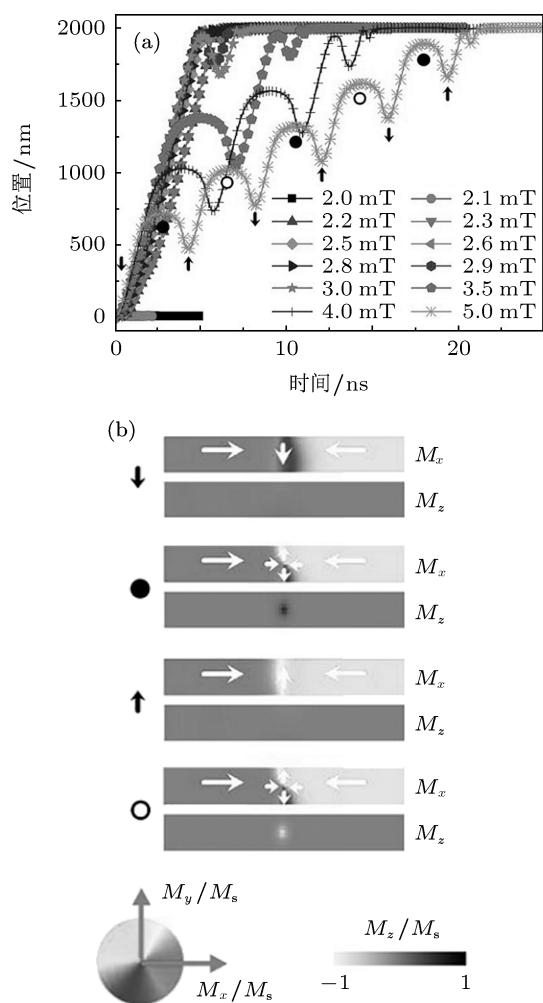


图2 (a) 在不同外磁场下, 5 nm 厚磁性纳米线磁畴壁随时间的位置变化曲线; (b) 在纳米线上磁畴壁传播过程中瞬间停顿时刻的自旋分布

为了进一步了解在 Walker 崩溃中磁畴壁的这种振荡行为, 我们分析了磁畴壁传播过程中其内部自旋结构的变化. 我们发现磁畴壁的这种振荡行为伴随着磁畴壁内部自旋结构的周期性变化. 如图 2(b) 所示, Walker 崩溃现象出现后, 在磁畴壁传播过程中大体上出现 4 种不同的磁畴壁自旋结构. 其中, “↓” 表示内部磁化方向向下 ( $-y$  轴) 的横向磁畴壁结构 (“↓” 型磁畴壁), “●” 表示漩涡中心的核自旋方向纸面向里 ( $+z$  轴) 的反漩涡形磁畴壁结构 (“●” 型磁畴壁), “↑” 表示内部磁化方向纸面向上 ( $+y$  轴) 的横向磁畴壁结构 (“↑” 型磁畴壁), “○” 表示漩涡中心的核自旋方向纸面向外 ( $-z$  轴) 的反漩涡形磁畴壁结构 (“○” 型磁畴壁). 从图 2(a) 可以看出, 以上 4 种磁畴壁按 “↓” 型  $\Rightarrow$  “●” 型  $\Rightarrow$  “↑” 型  $\Rightarrow$  “○” 型磁畴壁结构的顺序反复交替形成. 在这过程中, 反漩涡形磁畴壁的核 (core) 自旋形成在纳米线的一侧边缘后慢慢地横穿纳米线到另一侧边缘消失. 此时, 横向磁畴壁内部  $y$  轴方向磁化分量发生反转, 从而磁畴壁内部自旋所受到的来自外磁场的合成力矩方向也随之发生改变. 因此纳米线表面消磁场与对磁畴壁自旋的作用力方向也随之反复改变, 从而导致磁畴壁传播过程中形成反复往返运动的周期性振荡行为. 以上结果说明, 磁畴壁内部自旋结构不仅直接影响磁畴壁的动力学行为特征, 而且受到纳米线表面消磁场的直接影响.

考虑到纳米线表面消磁场的形成与纳米线厚度有着密切关联 [18], 我们研究了在不同厚度的纳米线上, 纳米线表面消磁场对磁畴壁动力学行为的影响. 在这里我们系统地改变了纳米线的厚度  $t = 0.5\text{--}12$  nm, 而且为了更好地体现出消磁场对磁畴壁运动的影响, 我们特意施加了大于 Walker 崩溃场的  $H_{\text{ext}} = 5$  mT 驱动外磁场. 如图 3(a) 所示, 我们发现随着纳米线厚度的增加, 磁畴壁的平均传播速度逐渐减小. 甚至, 当纳米线的厚度增加至 12 nm 时, 5 mT 外磁场无法驱动磁畴壁在纳米线上传播. 这说明随着纳米线厚度的增加, 磁畴壁内的自旋更加容易克服纳米线表面的消磁作用而进行 Larmor 旋进 (Larmor precession) 运动 [25], 从而使磁畴壁的运动变得更加缓慢. 有趣的是, 当纳米线的厚度为 0.5 nm 时, 磁畴壁高速传播过程中始终保持着横向磁畴壁结构, 且不呈现出 Walker 崩溃现象, 其速度达到了约 731 m/s. 然而, 其他情况下 (厚度为  $t = 12$  nm 情况除外) 都出现了磁畴壁

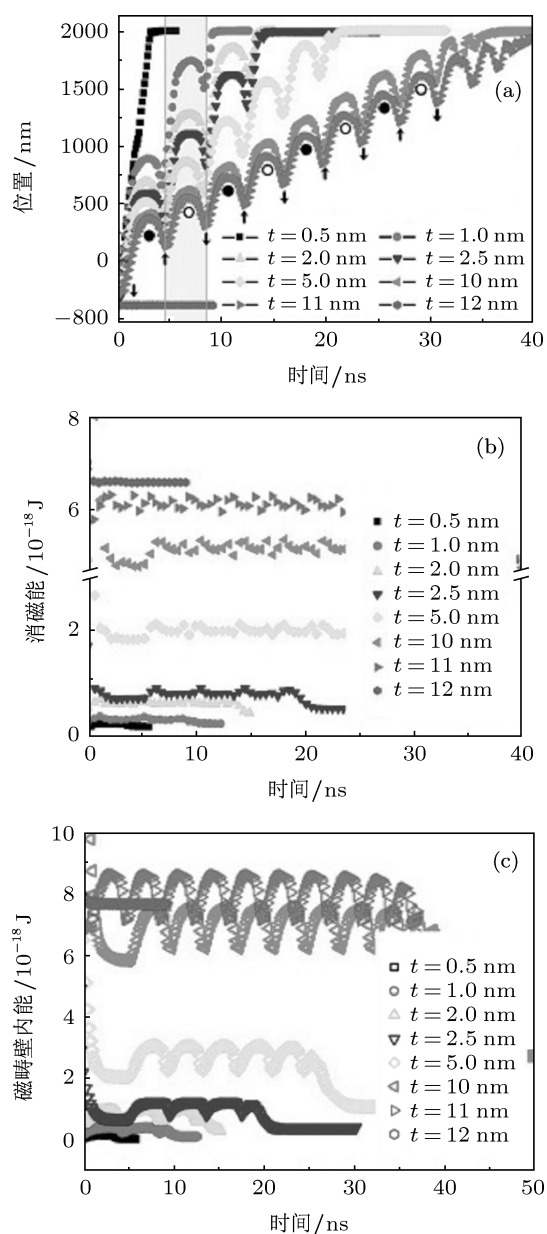


图3 在  $H_x = 5$  mT 外磁场的驱动下, 磁畴壁在不同厚度铁磁性纳米线中传播时 (a) 磁畴壁的位置; (b) 消耗能及 (c) 磁畴壁内能随时间的变化曲线

运动的 Walker 崩溃现象. 如图所示, 随着纳米线厚度的变化, 磁畴壁的运动规律非常类似于随外驱动磁场强度变化的磁畴壁动力学行为. 这说明纳米线厚度的变化和外驱动磁场强度的变化对磁畴壁的动力学行为的影响几乎等效, 即都是通过纳米线表面对磁畴壁的消磁作用来影响磁畴壁的动力学行为. 然而, 值得注意的是, 在 Walker 崩溃区域内, 在不同厚度的纳米线上磁畴壁运动的振荡周期几乎相同 (见图 3(a) 的阴影部分). 这种现象说明磁畴壁运动的振荡周期不受纳米线厚度

的影响, 而是受其他物理量的影响. 对此我们认为, 反漩涡形磁畴壁的核横穿纳米线所需要的时间应该依赖于纳米线的宽度. 在我们的研究体系中, 由于纳米线的宽度是固定的, 因此在不同厚度的纳米线上磁畴壁运动的振荡周期没有明显的变化.

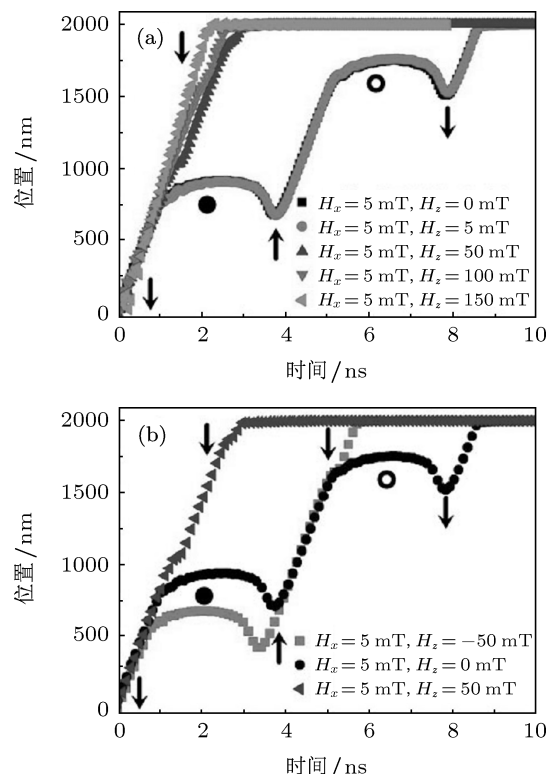


图4 在  $H_x = 5$  mT 外磁场驱动条件下, 改变垂直于纳米线平面辅助磁场  $H_z$  的 (a) 强度和 (b) 方向时, 5 nm 厚铁磁性纳米线磁畴壁位置随时间的变化曲线

为了证实不同厚度的纳米线表面对磁畴壁的消磁作用的不同影响, 我们分析了在不同厚度的纳米线上磁畴壁传播时消耗能随时间的变化情况. 如图 3(b) 所示, 我们发现随着纳米线厚度的增加, 纳米线内消耗能也变得更高. 这说明纳米线的厚度越厚, 磁畴壁内的自旋越容易克服纳米线表面的消磁作用, 从而在纳米线表面更加容易形成更多的自由磁极. 换句话说, 纳米线的厚度越薄, 磁纳米线表面对磁畴壁内自旋的抑制作用得到增强, 使得磁畴壁内自旋不易克服纳米线表面的消磁作用而改变自身内部的自旋结构. 此外, 从图中可以看出, 当磁畴壁的运动出现 Walker 崩溃现象时, 消耗能随着磁畴壁的往返振荡运动而有规律地振荡. 这说明在 Walker 崩溃下磁畴壁在纳米线上传播时, 由于磁畴壁内部自旋结构的周期性变化, 在纳米线表面

形成的消磁能也随之发生周期性的变化. 反之, 当纳米线的厚度为  $t = 0.5 \text{ nm}$  和  $12 \text{ nm}$  时, 由于磁畴壁的内部自旋结构不发生明显的变化, 在纳米线表面形成的消磁能同样不呈现明显的变化. 同时, 我们利用总磁能减去 Zeeman 能的方法, 近似地分析了磁畴壁的能量随时间的变化规律<sup>[26,27]</sup>. 如图 3(c) 所示, 我们发现磁畴壁的能量随时间的变化规律与消磁能随时间的变化规律基本同步, 而且随着纳米线厚度增加的规律也与消磁能的变化规律基本相同. 此外, 我们还发现, 如果磁畴壁在运动过程中不发生内部自旋结构的变化时, 磁畴壁内能也不发生明显的变化. 然而, 在 Walker 崩溃下, 磁畴壁内部结构发生周期性变化时, 磁畴壁的能量也随之表现出明显的周期性变化.

考虑到纳米线表面的消磁场对磁畴壁动力学的直接影响, 我们在垂直于纳米线表面的 ( $z$  轴) 外磁场的辅助下进一步研究了磁畴壁的动力学行为. 我们利用辅助磁场调节纳米线表面对磁畴壁的消磁作用, 间接地控制了  $H_x = 5 \text{ mT}$  外磁场的驱动下磁畴壁的动力学行为. 如图 4(a) 所示, 我们发现利用  $z$  轴方向辅助磁场可以有效地控制磁畴壁的动力学行为. 无辅助磁场 ( $H_z = 0 \text{ mT}$ ) 时, 在磁畴壁传播过程中呈现了典型的 Walker 崩溃现象. 当施加强度较小 ( $H_z = 5 \text{ mT}$ ) 的辅助磁场时, 磁畴壁的运动规律没有明显的变化. 然而, 当施加强度较大 ( $H_z \geq 5 \text{ mT}$ ) 的辅助磁场时, 发现磁畴壁的运动规律有了明显的改变, 并且有效地抑制了 Walker 崩溃现象. 不仅如此, 随着  $z$  轴方向辅助磁场强度的增加 ( $50 \rightarrow 150 \text{ mT}$ ) 磁畴壁的平均移动速度也有明显提高 ( $\sim 694 \rightarrow \sim 897 \text{ m/s}$ ). 这说明纳米线表面的消磁场与磁畴壁动力学行为之间确实存在较强的关联, 因此利用  $z$  轴方向辅助磁场对消磁场的调节作用可以控制磁畴壁的动力学行为<sup>[28]</sup>. 此外, 考虑到磁场与自旋之间相互作用遵守手征特性, 我们进一步分析了在  $\pm z$  轴方向  $H_z = 50 \text{ mT}$  辅助磁场下纳米线磁畴壁的动力学行为变化. 如图 4(b) 所示, 发现在  $H_z = 50 \text{ mT}$  磁场辅助下有效地抑制

了 Walker 崩溃现象. 然而在  $H_z = -50 \text{ mT}$  辅助磁场下却没有完全抑制住磁畴壁的 Walker 崩溃现象. 然而, 我们发现当横向磁畴壁的磁化方向发生反转后, Walker 崩溃现象再也没有出现 (见图中, 红色正方形曲线), 而且在此过程中磁畴壁的平均速度从  $\sim 149 \text{ m/s}$  ( $H_z = 0 \text{ mT}$ ) 提升到  $\sim 275 \text{ m/s}$  ( $H_z = -50 \text{ mT}$ ). 以上结果说明, 由于磁场与自旋之间相互作用的手征特性, 在纳米线表面不仅能形成消磁场而且也能推动磁畴壁运动.

## 4 结论

本文利用微磁学模拟, 在 L-型纳米铁磁线上研究了磁畴壁的动力学行为. 在不同强度外磁场的驱动下, 系统地考察了磁畴壁运动的 Walker 崩溃现象, 分析了 Walker 崩溃出现时磁畴壁内部自旋结构的周期性变化规律. 我们发现磁畴壁的动力学行为不仅受到磁畴壁内部自旋结构的影响, 而且也受到纳米线表面消磁场的影响. 为了验证纳米线表面消磁场对磁畴壁动力学的影响, 我们在  $5 \text{ mT}$  较强的外磁场驱动 (Walker 崩溃区域) 下, 考察了不同厚度的纳米线上磁畴壁的动力学行为. 发现随着纳米线厚度的减小, 磁畴壁的平均速度加快, 甚至纳米线厚度为  $0.5 \text{ nm}$  时, 磁畴壁的 Walker 崩溃现象有效地被抑制. 分析结果表明, 随着纳米线厚度的减小, 磁畴壁内自旋更加不易克服纳米线表面的消磁作用, 然而在消磁场的作用下, 磁畴壁的自旋却受到外磁场方向的力矩作用从而推动磁畴壁沿着纳米线方向快速运动. 为了进一步证实纳米线表面的消磁场对磁畴壁动力学的影响, 我们利用  $z$  轴方向辅助外磁场干扰了纳米线表面的消磁场, 并企图间接影响磁畴壁的动力学行为. 结果发现随着辅助磁场强度的增加, 不仅加强了纳米线表面对磁畴壁的消磁作用, 而且加快了磁畴壁的平均移动速度. 换句话说, 只要利用某种手段调控纳米线表面对磁畴壁的消磁作用, 就可以有效地控制纳米铁磁线磁畴壁的动力学行为.

- [1] Hubert A, Schafer R 1998 *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures* (Berlin: Springer)  
 [2] Stöhr J, Siegmann H C 2006 *Magnetism: From Fundamentals to*

*Nanoscale Dynamics* (Berlin: Springer)

- [3] McMichael R D, Eicke J, Donahue M J, Porter D G 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 7058

- [4] Allwood D A, Xiong G, Cowburn R P 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2848
- [5] Hara M, Kimura T, Otani Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 242504
- [6] Piao H G, Djuhana D, On S K, Yu S C, Kim D H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 052501
- [7] Meier G, Bolte M, Eiselt R, Kraeuger B, Kim D H, Fischer P 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 187202
- [8] Yamanouchi M, Chiba D, Matsukura F, Ohno H 2004 *Nature* **428** 539
- [9] Allwood D A, Xiong G, Faulkner C C, Atkinson D, Petit D, Cowburn R P 2005 *Science* **309** 1688
- [10] Parkin S S P, Hayashi M, Thomas L 2008 *Science* **320** 190
- [11] Hayashi M, Thomas L, Moriya R, Rettner C, Parkin S S P 2008 *Science* **320** 209
- [12] Lee J Y, Lee K S, Choi S, Guslienko K Y, Kim S K 2007 *Phys. Rev. B* **76** 184408
- [13] Piao H G, Shim J H, Lee S H, Djuhana D, Oh S K, Yu S C, Kim D H 2009 *IEEE Trans. Magn.* **45** 3926
- [14] Lu H P, Han M G, Deng L J, Liang D F, Ou Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2090 (in Chinese) [陆海鹏, 韩满贵, 邓龙江, 梁迪飞, 欧雨 2010 物理学报 **59** 2090]
- [15] Hayashi M, Thomas L, Rettner C, Moriya R, Parkin S S P 2007 *Nat. Phys.* **3** 21
- [16] Koyama T, Chiba D, Ueda K, Kondou K, Tanigawa H, Fukami S, Suzuki T, Ohshima N, Ishiwata N, Nakatani Y, Kobayashi K, Ono T 2011 *Nat. Mat.* **10** 194
- [17] Schryer N L, Walker L R 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 5406
- [18] Piao H G, Djuhana D, Lee S H, Shim J H, Jun S H, Kim D H 2009 *Sae Mulli.* **58** 715
- [19] Donahue M J, Porter D G 1999 *NIST Interagency Report No. NISTIR 6376*
- [20] Rave W, Hubert A 2000 *IEEE Trans. Magn.* **36** 3886
- [21] Thiaville A, García J M, Miltat J 2002 *J. Mag. Mag. Mater.* **242-245** 1061
- [22] Porter D G, Donahue M J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 6729
- [23] Landau L D, Lifshitz E M 1935 *Phys. Z. Sowiet* **8** 153
- [24] Gilbert T L 2004 *IEEE Trans. Magn.* **40** 3443
- [25] Stöhr J, Siegmann H C 2006 *Magnetism Form Fundamentals to Nanoscale Dynamics* (Berlin: Springer-Verlag) p85
- [26] Hayashi M, Thomas L, Rettner C, Moriya R, Jiang X, Parkin S S P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 207205
- [27] Djuhana D, Piao H G, Lee S H, Kim D H, Ahn S M, Choe S B 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 022511
- [28] Kunz A, Reiff S C 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 082503

# Influences of the demagnetizing field on dynamic behaviors of the magnetic domain wall in ferromagnetic nanowires\*

Fan Zhe<sup>1)</sup> Ma Xiao-Ping<sup>1)</sup> Lee Sang-Hyuk<sup>2)</sup> Shim Je-Ho<sup>2)</sup>  
Piao Hong-Guang<sup>1)2)†</sup> Kim Dong-Hyun<sup>2)</sup>

1) (College of Science, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

2) (Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, South Korea)

(Received 28 July 2011; revised manuscript received 14 October 2011)

## Abstract

Understanding of magnetic domain wall dynamic behavior is one of the important issues in the realization of spintronic device based on domain wall motion. We investigate the dynamic behaviors of the magnetic domain wall propagation in L-shaped ferromagnetic nanowires under external magnetic driving fields. By micromagnetic simulation, we observe a dynamic characteristic of the magnetic domain wall in a ferromagnetic nanowire with varying the external field. By changing the nanowire thickness, we examine the influence of the demagnetizing field from the nanowire surface on the domain wall dynamics under a magnetic driving field after Walker breakdown field. Using an auxiliary magnetic field perpendicular to the nanowires, we analyze the effect of the demagnetizing field on the domain wall dynamic behaviors. The results show that the stronger external field or the thicker nanowire can enhance the generation of the demagnetizing field on the nanowire surface, leading to the occurrence of the Walker breakdown phenomenon with the periodic change of the inner spin structure of the domain wall during the domain wall propagation in the nanowires. By using an auxiliary magnetic field perpendicular to the nanowires, we find that the strength and the direction of the demagnetizing field can be modulated. It implies that the dynamic behavior of domain wall propagation in the nanowire is controllable.

**Keywords:** ferromagnetic nanowire, magnetic domain wall motion, Walker breakdown, micromagnetic simulation

**PACS:** 75.60.Ch, 75.78.-n, 75.78.Cd

---

\* Project supported by the National Research Foundation of Korea (Grant Nos. 2010-0004535, 2010-0021735).

† E-mail: hgpiao@tsinghua.edu.cn