

# Fast Motion of Transverse Magnetic Domain Walls in Trapezoidal Cross-Section Nanostrips

Zhengyun Lei<sup>1</sup>, Ruifang Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Xiamen University, Xiamen Fujian

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Centre for Optoelectronic Semiconductors and Efficient Devices, Xiamen University, Xiamen Fujian

Email: wangrf@xmu.edu.cn

Received: May 14<sup>th</sup>, 2019; accepted: May 21<sup>st</sup>, 2019; published: May 28<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In the past, most of the researches discuss on the dynamics of transverse magnetic domain walls were based on nanostrips with rectangular cross-section. Unlike the uniform thickness of rectangular cross-section nanostrips, the thickness is larger in the middle than at the sides for trapezoidal nanostrips. Transverse domain wall motion in trapezoidal nanostrips driven by external magnetic field is studied and the morphology variation of the transverse magnetic domain walls is discussed in detail. The micromagnetic simulation results show that the velocity of magnetic domain wall motion is faster than that of rectangular nanostrips due to the design of trapezoidal cross-section. It is found that the magnetic domain wall velocity is closely related to the base angle of the trapezoidal cross-section. As a result, the magnetic domain wall has a high velocity in the nanostrips with small base angle. We find that the velocity of magnetic domain wall is not linearly related to the average width of magnetic domain wall, but is proportional to the width of the upper and lower ends of the magnetic domain wall. In addition, the contribution of demagnetization to the fast motion of the domain wall is discussed through the precession speed distribution of the magnetization in the domain wall region under the effective field. The study of the magnetic domain wall motion in trapezoidal cross-section nanostrips provides a new idea for the magnetic domain wall dynamics.

## Keywords

Magnetic Domain Wall, Spin Dynamics, Trapezoidal Cross Section

---

## 横向磁畴壁在梯形截面纳米带中的快速运动

雷郑云<sup>1</sup>, 王瑞方<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>厦门大学物理学系, 福建 厦门

<sup>2</sup>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: 2019年5月14日; 录用日期: 2019年5月21日; 发布日期: 2019年5月28日

## 摘要

以往大多是以矩形截面的纳米带为载体探讨横向磁畴壁的动力学。矩形截面纳米带具有均匀的厚度, 而梯形截面纳米带的中间区域厚度大于两侧。我们研究了外磁场驱动下梯形截面纳米带中的横向磁畴壁运动, 并详细探讨了梯形截面纳米带中的横向磁畴壁的形貌变化。微磁模拟计算表明梯形截面的设计使得磁畴壁运动速度比在矩形截面纳米带中更快。我们发现, 磁畴壁速度与梯形截面纳米带底角具有密切关系, 结果表明, 磁畴壁在小底角的纳米带中具有高的运动速度。我们还发现磁畴壁的速度与磁畴壁平均宽度并不成线性关系, 而是与磁畴壁上下端宽度具有正比关系。除此之外, 我们通过磁畴壁区域的磁矩在有效场下的旋进速度分布深入探讨了退磁场对磁畴壁高速运动的贡献。梯形截面纳米带中磁畴壁运动的研究为磁畴壁动力学中提出了新的思路。

## 关键词

磁畴壁, 自旋动力学, 梯形截面

Copyright © 2019 by author(s) 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

控制磁畴壁位移实现数据存储和逻辑计算是个极具吸引力的方案。在实验中, 通过操控横向磁畴壁的运动, 已经实现了数据存储[1] [2]和逻辑计算[3] [4] [5]的多种设想。磁场[6]和极化电流[7] [8]可以做为激励源驱动磁畴壁运动。在小的外磁场下, 磁畴壁可以保持匀速运动, 其速度与外磁场呈线性关系。然而, 在大的外磁场下, 磁畴壁结构会变得不稳定, 导致畴壁运动速度迅速下降, 这一效应被称为沃克击穿(Walker breakdown)或沃克极限(Walker limit) [9]。沃克击穿的存在阻碍了磁畴壁的高速运动, 限制了信息的处理速度。为了满足信息快速处理的要求, 高速的磁畴壁运动成为了一个重要的研究课题[10]。由于沃克极限磁场的存在, 磁畴壁高速运动的研究主要有两个方向。

一方面, 在高于沃克极限的磁场下, 避免和抑制沃克击穿现象的发生。2003年, Yoshinobu Nakatani 等人提出沃克击穿现象在边缘粗糙的纳米带中可以得到抑制, 磁畴壁可以实现在高于沃克击穿磁场下的高速运动[11]。2010年, E.R.Lewis 等人利用梳状的坡莫合金纳米带结构抑制沃克击穿的产生, 实现了磁畴壁在高于沃克极限磁场下的高速运动[12]。2011年, Ming Yan 等人提出在坡莫合金纳米管中可以实现畴壁的高速运动[13] [14]。

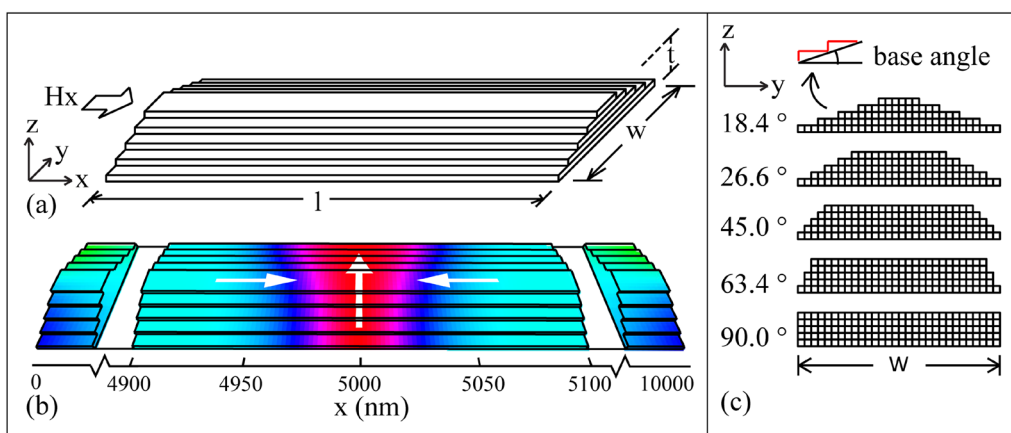
另一方面, 在低于沃克极限的磁场下, 提高磁畴壁运动的效率。通过增大纳米带宽度和降低纳米带厚度, 磁畴壁的宽度也会增大[15], 磁畴壁可以具有更高的运动速度[16]。增大宽度或者是降低厚度都是对纳米带的整体调控, 这些操控都无法体现纳米带边界对磁畴壁运动的作用。通常研究的矩形截面纳米

带的侧面垂直于平面, 而梯形截面纳米带的两侧表面是倾斜的。带有倾角的斜面可以凸显出边界对磁畴壁运动的影响, 而在实验上沉积和磁控溅射等方法容易形成梯形截面的纳米带[17]。因此出于理论研究和应用的考虑, 我们将坡莫合金的纳米带设计成梯形截面。

在本文中, 我们采用微磁模拟的方法对不同底角的梯形截面纳米带中磁畴壁动力学进行了研究。施加 15 Oe 的恒定磁场, 我们发现梯形截面纳米带中磁畴壁速度快于传统的梯形截面纳米带, 并且磁畴壁速度与梯形截面纳米带底角具有密切关系, 即磁畴壁在小底角的纳米带中具有高的运动速度。我们从磁畴壁宽度和磁矩在有效场下的旋进速度分布方面深入探讨了磁畴壁高速运动的现象。不同于人们对磁畴壁速度与磁畴壁平均宽度成线性关系的固有认知, 我们在梯形截面纳米带中的研究表明磁畴壁速度是与磁畴壁上下端宽度具有正比关系, 而非平均宽度。除此之外, 我们通过磁畴壁区域的磁矩在有效场下的旋进速度分布深入探讨了退磁场对磁畴壁高速运动的贡献。

## 2. 模型

本文采用 OOMMF (Object Oriented Micromagnetic Framework) 进行微磁模拟[18]。OOMMF 的可靠性已经得到实验的广泛验证[12]。模型结构如图 1(a) 所示, 纳米带的截面被设置成梯形。纳米带长  $l = 10 \mu\text{m}$ , 底面宽度  $w = 60 \text{ nm}$ , 厚度  $t = 10 \text{ nm}$ 。几何学中, 梯形的斜面和底面的夹角是区别梯形的一个重要特征, 这个夹角也被称为底角(base angle)。梯形截面的底角分别被设置为  $18.4^\circ$ 、 $26.6^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $63.4^\circ$ 。此外, 我们还设置了一个底角为  $90^\circ$  的矩形截面, 用于模拟完美的长方体状纳米带中磁畴壁动力学。纳米带截面设计具体可见图 1(b)。为方便起见, 我们将本文中梯形截面纳米带的梯形底角直接称作纳米带的底角。如图 1(c) 所示, 我们将横向磁畴壁作为初始态放置在纳米带中间。



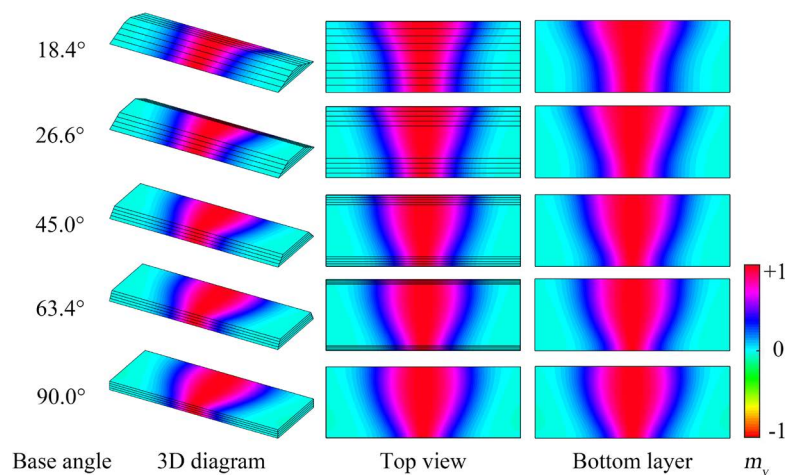
**Figure 1.** Trapezoidal nanostrips model. (a) The schematic diagram in the upper left corner represents the structure of nanostrips with trapezoidal cross-section. The length of the nanostrip is  $l$  and the thickness is  $t$ . The base of the trapezoidal has width  $w$ . The external magnetic field is applied to the length of the nanostrips. (b) The side view of the trapezoidal nanostrips is placed on the right. Definition of the base angle is indicated above the side view, namely the angle between the trapezoidal bevel and base edge. The base angles of trapezoidal cross-section nanostrips were set to  $18.4^\circ$ ,  $26.6^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $63.4^\circ$  respectively, and the base angle of rectangular cross-section nanostrip is marked at  $90^\circ$ . In the numerical simulation, the trapezoidal cross section is composed of a series of cells. (c) A transverse magnetic domain wall is placed in the middle of the nanostrip, and the white arrow represents the approximate orientation of the magnetization, and the color represents the direction of the magnetization

**图 1.** 梯形截面纳米带模型。(a) 左上角的示意图表示梯形截面纳米带的结构, 纳米带的长度为  $l$ 、厚度  $t$  和底表面宽度  $w$ 。外磁场施加在纳米带长度方向。(b) 梯形截面纳米带的侧视图放置在右侧。侧视图的上方标明了底角的定义, 即梯形斜边与底边的夹角。梯形截面纳米带的底角分别被设置为  $18.4^\circ$ 、 $26.6^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $63.4^\circ$ , 矩形截面纳米带的底角标记为  $90^\circ$ 。图中的小方格代表在数值模拟中梯形截面是由一系列网格组成。(c) 横向磁畴壁放置在纳米带的中间, 白色箭头表示磁矩的大致朝向, 颜色代表磁化强度方向

模型采用典型的坡莫合金参数: 磁晶各向异性常数  $K = 0 \text{ J/m}^3$ 、饱和磁化强度  $M_s = 8.0 \times 10^5 \text{ A/m}$ 、交换系数  $A = 1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}$ 、阻尼系数  $\alpha = 0.01$ 。纳米带被划分为一系列大小为  $2.0 \times 2.0 \times 2.0 \text{ nm}^3$  的网格。

### 3. 横向磁畴壁在梯形截面纳米带中的结构

横向磁畴壁在梯形截面纳米带和矩形截面纳米带中的结构如图 2 所示, 随着纳米带底角改变, 磁畴壁结构出现很大的不同。与在底角为  $90^\circ$  的矩形截面纳米带中的“草莓状”结构不同, 横向磁畴壁在梯形截面纳米带中具有上下端宽度增宽、中部变窄的趋势。尤其在底角为  $18.4^\circ$  的小底角梯形截面纳米带中, 磁畴壁呈现出磁畴壁上端宽度远大于中间宽度的“束腰”形结构。事实上, 横向磁畴壁是一种面内磁化的磁畴壁, 它通过增大磁畴壁上下端的面磁荷来减少纳米带体磁荷。磁荷实际上代表了退磁场的分布[19], 对于横向磁畴壁而言, 磁畴壁上下端宽度的增大有利于增大边界处退磁场对于磁畴壁的推动作用。



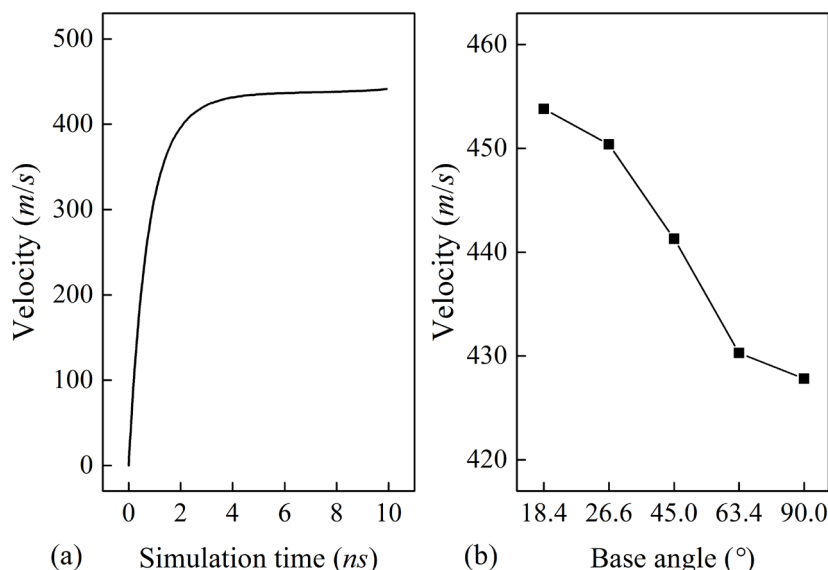
**Figure 2.** Structure of the stable transverse magnetic domain wall. The 3D, top view and bottom layer diagrams of the magnetic domain walls in the trapezoidal nanostrips with base angle of  $18.4^\circ$ ,  $26.6^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $63.4^\circ$ , along with a rectangular nanostrip, are listed in the diagram. The color bar on the right represents the component of the normalized magnetization in the y direction

**图 2.** 稳态横向磁畴壁的结构。图中分别列出了磁畴壁在底角为  $18.4^\circ$ 、 $26.6^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $63.4^\circ$  的梯形截面纳米带以及底角为  $90^\circ$  的矩形截面纳米带中的三维视图、俯视图以及纳米带底层的结构。右侧色彩条状图代表归一化磁化强度在 y 方向上的分量

### 4. 梯形截面纳米带中横向磁畴壁的运动

在梯形截面纳米带和矩形截面纳米带中分别施加恒定的小磁场  $H = 15 \text{ Oe}$  来推动朝上畴壁的运动, 磁场方向与纳米带长轴方向平行。图 3(a)显示了加场后的  $0 \text{ ns} \sim 10 \text{ ns}$  内, 横向磁畴壁在底角为  $45^\circ$  的梯形截面纳米带中的速度变化曲线。在梯形截面纳米带和矩形截面纳米带中, 磁畴壁都是先沿纳米带长轴方向加速, 之后以达到饱和速度以匀速向前运动。

施加同样方向和大小的恒定磁场驱动磁畴壁, 我们观测到磁畴壁在不同底角的纳米带中的饱和运动速度存在显著的差别。磁畴壁在小底角的纳米带中的运动速度明显快于在大底角纳米带中的速度。如图 3(b)所示, 在底角为  $90^\circ$  的矩形截面纳米带中, 磁畴壁以最低的饱和速度  $427 \text{ m/s}$  匀速运动。然而, 不同于在矩形截面纳米带中的低速运动, 磁畴壁在梯形截面纳米带中速度更快。在底角为  $63.4^\circ$  的梯形截面纳米带中, 磁畴壁饱和速度为  $430 \text{ m/s}$ 。磁畴壁速度随着纳米带底角的减小而增大, 在  $18.4^\circ$  的梯形截面纳米带中, 磁畴壁饱和速度增大到  $454 \text{ m/s}$ 。磁畴壁在梯形截面纳米带中比传统的矩形截面纳米带要更快。



**Figure 3.** Domain walls movement driven by magnetic field  $H = 15$  Oe. (a) The velocity of magnetic domain wall in the nanostrip with a base angle of  $45^\circ$ . (b) The saturation velocity of the magnetic domain wall in the nanostrips with different base angles

**图 3.** 外加磁场  $H = 15$  Oe 驱动磁畴壁运动。(a) 磁畴壁在底角为  $45^\circ$  的纳米带中的速度。(b) 磁畴壁在底角不同的纳米带中的饱和速度

## 5. 理论分析

磁畴壁运动的可以从磁畴壁整体运动和磁畴壁区域磁矩旋进两个方面来考虑。一方面, 将磁畴壁看作是一个整体, 磁畴壁速度与磁畴壁宽度成正比关系, 宽度不同的磁畴壁其速度也不同。另一方面, 磁畴壁的运动实际上是磁矩在有效场作用下旋进的结果。在本文中, 将从磁畴壁宽度和磁畴壁区域磁矩旋进两个方面来解释梯形截面纳米带中的高速运动。

磁畴壁宽度与磁畴壁速度具有密切关系。对一维磁畴壁的计算表明, 在低磁场区域和高磁场区域时存在不同的两种状态。高于阈值磁场或称作沃克磁场的区域, 磁畴壁发生沃克击穿。在低磁场区域, 磁畴壁速度  $v$  随场磁场  $H$  的增大而线性增长[11]:

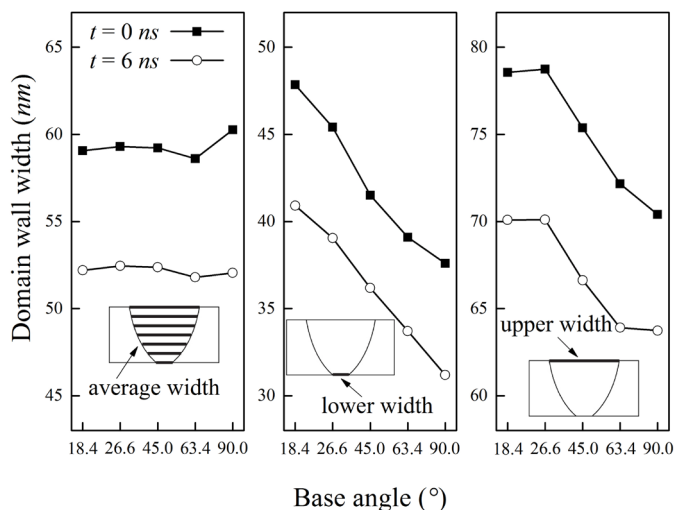
$$v = (\gamma_0 \Delta / \alpha) H \quad (1)$$

其中,  $\gamma_0$  是旋磁比,  $\Delta$  是磁畴壁宽度,  $H$  是外加恒定磁场。也即在小的恒定磁场下磁畴壁速度与其宽度紧密相关, 磁畴壁宽度越宽其速度越快。不同于一维磁畴壁有均匀的宽度, 纳米带中的横向磁畴壁是一种不对称的结构, 其宽度一般用平均宽度来定义。

图 4 展示了  $t = 0$  ns 和  $t = 6$  ns 时磁畴壁在梯形截面和矩形截面的纳米带中磁畴壁宽度。在  $t = 0$  ns 时刻, 磁畴壁在矩形截面纳米带中的平均宽度要大于在梯形截面纳米带中的平均宽度。在外磁场驱动下, 磁畴壁平均宽度变窄。在加场后 6 ns, 磁畴壁已经趋于稳定的匀速运动, 磁畴壁速度不随纳米带底角变化而变化。一般而言, 磁畴壁宽度是指磁畴壁平均宽度, 即磁畴壁速度与磁畴壁宽度成正比关系。事实上, 在梯形截面纳米带中, 磁畴壁的速度随着纳米带底角的增大而缩小, 如图 3(b) 所示。因此, 磁畴壁速度与磁畴壁平均宽度之间并不再保持式(1)的正比关系。

事实上, 磁畴壁的上端宽度和下端宽度对磁畴壁速度有着正相关关系。如图 4 所示, 在  $t = 0$  ns 和  $t = 6$  ns 时, 磁畴壁的上端和下端的宽度都随着纳米带底角增大而减小。换言之, 梯形截面纳米带的设计没有改变磁畴壁的整体宽度, 而是通过缩小磁畴壁中间区域宽度来增大磁畴壁上端宽度和下端宽度。

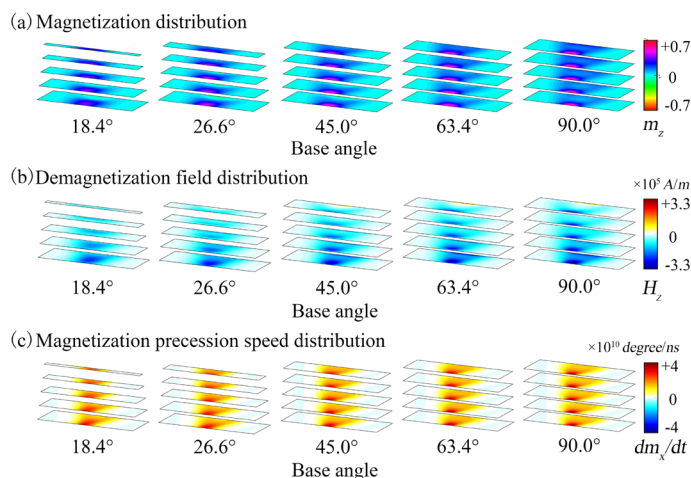




**Figure 4.** Domain wall width. Drawings on the left, middle, and right side are average width, lower width and upper width of magnetic domain walls in nanostrips with different base angles. The illustration represents the area where the width of the magnetic domain wall is measured

**图 4.** 磁畴壁宽度。左侧、中部和右侧的图分别是磁畴壁在不同底角的纳米带中的平均宽度、上端宽度和下端宽度。插图表示磁畴壁宽度测量的区域

除了磁畴壁宽度，磁畴壁的运动与磁畴壁区域磁矩在有效磁场下的运动紧密相关。梯形截面纳米带的设计改变了磁畴壁的宽度，也影响了畴壁区域磁化强度和磁场的分布。如图 5(a)所示，在恒定磁场下磁畴壁被挤压，导致宽度变窄，使得磁畴壁下端磁矩由面内向着垂向转动。在矩形截面纳米带中，归一化磁化强度垂向分量  $m_z$  的最大值达到-0.68。与矩形截面纳米带相比，梯形截面纳米带极大地抑制了磁畴壁下端磁矩的垂向转动使得磁矩主要在面内分布。随着纳米带底角的减少，对磁矩的垂向抑制越发强烈，在底角为  $18.4^\circ$  的纳米带中，归一化磁化强度垂向分量  $m_z$  的最大值降低到-0.3。



**Figure 5.** The structure of magnetic domain wall that move uniformly after external magnetic field applied for 6 ns. (a) The distribution of the magnetization  $z$ -component  $m_z$  in the domain wall region in nanostrips with different base angles. (b) The distribution of the  $z$ -component of demagnetization field  $H_z$  in domain wall region. (c) The distribution of the  $x$ -component of precession velocity of magnetization of  $dm_x/dt$  in domain wall region. The color bars on the right side represent the relationship between  $m_z$ ,  $dm_x/dt$ ,  $H_z$  and the color

**图 5.** 加场后 6 ns 时匀速运动的磁畴壁。(a) 在底角不同的纳米带中，磁化强度在  $z$  方向上的分量  $m_z$  在磁畴壁区域的分布。(b) 退磁场在  $z$  方向上的分量  $H_z$  在磁畴壁区域的分布。(c) 磁化强度在  $z$  方向上的旋进速度分量  $dm_x/dt$  在磁畴壁区域的分布。(c)。右侧色彩条状图分别代表  $m_z$ 、 $dm_x/dt$  和  $H_z$  与颜色对应关系

磁矩与纳米带表面保持平行有利于降低退磁场能, 梯形截面的设计正是通过这点抑制了磁矩的垂向转动。如图 5(b)所示, 在矩形截面纳米带中, 磁矩的垂向分布增大了纳米带上下表面磁荷, 使得退磁场增大。而梯形截面纳米带中, 表面磁荷减少, 退磁场场强也被减弱。大底角的纳米带中退磁场分布很不均匀, 在矩形截面纳米带中退磁场还出现了 $+z$ 方向的分量。然而, 斜面的设计使得纳米带中间区域离表面更近, 使得退磁场分布更均匀。此外, 磁矩的面内分布有利于磁矩和退磁场间的夹角成趋向正交关系, 利于磁畴壁区域磁矩向 $+x$ 方向运动。因此, 小底角纳米带中, 退磁场得以增大磁矩的旋进速度。事实上磁畴壁的运动就是磁畴壁区域磁矩的旋进, 磁畴壁区域就的旋进速度分布见如图 5(c)所示。大底角纳米带中磁矩旋进聚集在磁畴壁下端, 而小底角纳米带中磁矩旋进均匀分布于磁畴壁区域。

## 6. 总结

在低于沃克极限磁场下, 纳米带宽度和厚度一直被认为是调控横向磁畴壁速度的主要因素。然而, 梯形截面纳米带的设计引入了调控磁畴壁运动的新因素, 即侧面倾角对磁畴壁速度的影响。

在梯形截面纳米带中, 我们发现磁畴壁在小底角纳米带中的速度要大于在大底角纳米带中的速度。梯形截面的纳米带中磁畴壁上下端宽度要比矩形纳米带中的更宽。随着纳米带底角的降低, 磁畴壁上下端的宽度都会增宽。然而, 磁畴壁上下端宽度的增大并不会改变稳定运动的磁畴壁的整体宽度。基于这一结论, 我们提出是磁畴壁上下端宽度与磁畴壁速度呈正相关关系, 而非一维磁畴壁的整体宽度。

我们详细分析了保持匀速运动的磁畴壁在纳米带中的磁矩和退磁场分布。我们发现矩形截面纳米带中磁畴壁区域磁矩趋向于朝向垂向分布。而梯形截面纳米带中磁畴壁区域的磁矩被抑制在面内有效降低了退磁场能。同时梯形截面的设计使得磁畴壁内部可以更贴近侧面, 因此退磁场可以较均匀的分布于磁畴壁区域。此外, 磁矩的面内分布有利于磁矩和退磁场间的夹角成趋向正交关系, 利于磁畴壁区域磁矩向 $+x$ 方向运动。

## 基金项目

作者感谢国家自然科学基金项目 10974163 和 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] Franken, J.H., Swagten, H.J.M. and Koopmans, B. (2012) Shift Registers Based on Magnetic Domain Wall Ratchets with Perpendicular Anisotropy. *Nature Nanotechnology*, **7**, 499-503. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.111>
- [3] Allwood, D.A., Xiong, G., Cooke, M.D, Faulkner, C.C., Atkinson, D., Vernier, N. and Cowburn, R.P. (2002) Submicrometer Ferromagnetic NOT Gate and Shift Register. *Science*, **296**, 2003-2006. <https://doi.org/10.1126/science.1070595>
- [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] Omari, K.A. and Hayward, T.J. (2014) Chirality-Based Vortex Domain-Wall Logic Gates. *Physical Review Applied*, **2**, Article ID: 044001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.2.044001>
- [6] Ono, T. (1999) Propagation of a Magnetic Domain Wall in a Submicrometer Magnetic Wire. *Science*, **284**, 468-470. <https://doi.org/10.1126/science.284.5413.468>
- [7] Slonczewski, J.C. (1996) Current Driven Excitation of Magnetic Multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **159**, L1-L7. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(96\)00062-5](https://doi.org/10.1016/0304-8853(96)00062-5)
- [8] Yamaguchi, A., Ono, T., Nasu, S., Miyake, K., Mibu, K. and Shinjo, T. (2004) Real-Space Observation of Current-Driven Domain Wall Motion in Submicron Magnetic Wires. *Physical Review Letters*, **92**, Article ID: 077205. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.077205>
- [9] Thiele, A.A. (1973) Steady-State Motion of Magnetic Domains. *Physical Review Letters*, **30**, 230-233.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.230>

- [10] 王友君, 王瑞方. 交变共振磁场下横向磁畴壁的快速输运[J]. 凝聚态物理学进展, 2018, 7(2): 67-75.
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] Yan, M., Andreas, C., Kakay, A., Garcia-Sanchez, F. and Hertel, R. (2011) Fast Domain Wall Dynamics in Magnetic Nanotubes: Suppression of Walker Breakdown and Cherenkov-Like Spin Wave Emission. *Applied Physics Letters*, **99**, Article ID: 122505. <https://doi.org/10.1063/1.3643037>
- [14] 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**, Article ID: 057201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.057201>
- [15] 姜寿亭, 李卫. 凝聚态磁性物理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [16] McMichael, R.D. and Donahue, M.J. (1997) Head to Head Domain Wall Structures in Thin Magnetic Strips. *IEEE Transactions on Magnetics*, **33**, 4167-4169. <https://doi.org/10.1109/20.619698>
- [17] Zhang, J., Ho, P., Currivan-Incorvia, J.A., Afroz, S.A. and Ross, C.A. (2015) Edge-Modulated Perpendicular Magnetic Anisotropy in [Co/Pd]<sub>n</sub> and L<sub>10</sub>-FePt Thin Film Wires. *Applied Physics Letters*, **107**, Article ID: 182408. <https://doi.org/10.1063/1.4935104>
- [18] Donahue, M.J. and Porter, D.G. (1999) OOMMF User's Guide. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6376>
- [19] O'Handley, R.C. (2000) Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. Wiley, New York.

**Hans** 汉斯

#### 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](mailto:cmp@hanspub.org)