

東北大學



NORTHEASTERN
UNIVERSITY

硕士学位论文

THESIS FOR MASTER'S DEGREE

论文题目：电流驱动 Co/Pt 纳米薄膜中不同拓扑度

斯格明子的微磁学研究

作 者：张志宇

学 号：2070585

学院(部)：材料科学与工程学院

专 业：材料工程

指导教师：徐民 副教授

二〇二三年七月

分类号_____密级_____

U D C_____

学 位 论 文

电流驱动 Co/Pt 纳米薄膜中不同拓扑度斯格明子 的微磁学研究

作 者 姓 名： 张志宇

指 导 教 师： 徐民 副教授

东北大学材料科学与工程学院

申请学位级别： 硕士

学 科 类 别： 工程

学科专业名称： 材料工程

论文提交日期： 2023 年 6 月

论文答辩日期： 2023 年 6 月 7 日

学位授予日期： 2023 年 7 月

答辩委员会主席： 申勇峰 教授

评 阅 人： 东北大学

崔 彤 副教授

中国科学院金属研究所 王胜刚 研究员

东 北 大 学

2023 年 7 月

A Thesis in Materials Engineering

**Micromagnetic Study on the Current-Driven
Skyrmion with Different Topology Degrees in
Co/Pt Nanofilms**

By Zhang Zhiyu

Supervisor: Associate Professor Xu Min

Northeastern University

July 2023

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

日 期：2023 年 6 月 7 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 一年 一年半 两年

学位论文作者签名：

签字日期：2023 年 6 月 7 日

导师签名：

签字日期：2023 年 6 月 7 日

摘要

斯格明子是一种具有类似粒子特性且具有拓扑保护性质的自旋结构，它于 2009 年首次在实验中被观察到。由于它的高稳定性、纳米级尺寸以及低驱动电流密度等特点，斯格明子被认为可以作为信息载体并应用于下一代自旋电子器件，例如赛道存储器、自旋纳米振荡器和二极管等。近年来，一些实验已经证明在室温下使用自旋极化电流可以形成和驱动斯格明子，这增强了斯格明子作为信息载体的应用前景。

斯格明子最有前途的应用之一是赛道存储器。然而，一个斯格明子只能代表一个二进制位信息，并且斯格明子之间的排斥力使它们间距相对较大，这不利于高密度信息存储。斯格明子袋可以很好地解决这个问题，它由一个斯格明子和任意数量的内部反斯格明子构成，而不同内部反斯格明子的数量可以代表不同的二进制位信息。研究表明，斯格明子袋可以像斯格明子一样在自旋电流的驱动下沿着纳米轨道移动并在通过缺陷时能够表现出良好的拓扑保护性，这更有利于作为信息载体并应用于高密度赛道存储器。

本论文通过微磁学模拟的方法，研究了在合成反铁磁赛道上电流驱动不同拓扑度的斯格明子通过压控磁各向异性（VCMA）电压门的动力学。首先，研究了斯格明子通过电压门时速度的变化，以及电压门产生的垂直磁各向异性（PMA）梯度与驱动电流密度和斯格明子最小速度的关系；其次，探讨了材料参数对 Co/Pt 薄膜磁化结构的影响，确认了斯格明子袋能够稳定存在的参数范围；最后，研究了斯格明子袋在电流的驱动下通过电压门控制的 PMA 梯度时发生的不同拓扑结构转变。主要研究结果如下：

- (1) 斯格明子正向通过电压门的临界电流密度远小于它负向通过相同的电压门的临界电流密度，这是斯格明子二极管的基本原理。斯格明子正向和负向通过不同的电压门时其最小速度和驱动电流密度具有线性相关性，这是斯格明子二极管的特性，类似于电子二极管的伏安特性。
- (2) 斯格明子的各向异性能量随位置的变化曲线具有可逆性，即该曲线可以同时表现出斯格明子正向和负向进入电压门的过程。曲线斜率的大小可以近似表示斯格明子通过电压门时受到的平均阻力大小，曲线斜率的绝对值越大表示斯格明子受到的平均阻力越大。
- (3) 斯格明子袋 S(4) 通过不同电压门时会发生不同拓扑结构的转变。通过控制电压门内的 PMA 梯度和驱动电流密度可以实现从 S(4) 到 S(N) ($N = 0 - 4$) 的转变，这本质上是斯格明子袋内反斯格明子之间排斥力变化的结果。
- (4) 通过在一个赛道上设置三个电压门可以实现从 S(4) 到 S(1) 的连续拓扑转变，即每个电压门只阻止一个内部反斯格明子通过。通过计算，每个内部反斯格明子的能量在 10^{-19} J 量级。

关键词：斯格明子；斯格明子袋；合成反铁磁赛道；压控磁各向异性；微磁模拟

Abstract

Magnetic skyrmions, as topologically protected magnetization configurations with particle-like properties, were first experimentally observed in 2009. Due to their stability, nanoscale size and low driving current density, skyrmions are considered as promising candidates in the next generation of spintronic devices, such as racetrack memories, nano-oscillators, and diodes. In recent years, some experiments have revealed that skyrmions can be generated and driven by electric current at room temperature, which enhances the application prospects of skyrmions as information carriers.

One of the most promising applications for skyrmion is racetrack memories. However, one skyrmion can only represent one bit and the repulsion between skyrmions keeps them at a relatively long distance, which is not conducive to high-density information storage. An elegant solution to this could be the skyrmion bag, which are nested skyrmionic structures with high degree of freedom of topological charge numbers. Skyrmion bags are composed of a single skyrmion outer boundary and a number of inner antiskyrmions, which enables them to represent different information with different topological charges. In recent research, skyrmion bags can move along nanotrails driven by spin current, just like skyrmions. In addition, skyrmion bags exhibit good topological protection when passing through defects, which makes them have greater advantages in application to the racetrack memory.

In this paper, we investigate the dynamics of the skyrmion with different topological charges driven by spin current on synthetic antiferromagnetic racetracks with a voltage-controlled magnetic anisotropy (VCMA) gate using micromagnetic simulations. To begin with, we study the variation of velocity when skyrmion passes through different voltage gates, and the minimum velocity of skyrmion as a function of the perpendicular magnetic anisotropy (PMA) gradient and the driving current density. Furthermore, we explore the effect of material parameters on the magnetization structure of Co/Pt films, and confirm the parameter range in which the skyrmion bag can exist stably. Finally, we investigate the different topological transitions of skyrmion bag as it passes through voltage gates driven by a current. The main research results are as follows:

- (1) The critical current required for skyrmion to positively pass through a voltage gate where the PMA constant increases gradually, is much less than that for skyrmion to negatively pass through the voltage gate where the PMA constant decreases gradually. When the skyrmion passes through different voltage gates in the positive and negative direction, the minimum velocity (V_{min}) of skyrmion is linearly correlated with the driving current density (J_{spin}). The J_{spin} - V_{min} characteristics of the skyrmion diode are similar to the volt–ampere characteristics of the electronic diode.

- (2) The variation curves of the PMA energy with the position of skyrmion are very similar when the skyrmion passes through the same voltage gate positively and negatively. In other words, a variation curve can contain both the stage of positive entry of skyrmion into the voltage gate and the negative entry of the skyrmion into the voltage gate. The average resistance of the skyrmion passing through the voltage gate can be seen from the slope of the curve, and a larger absolute value of the slope of the curve means that the skyrmion is subjected to a higher average resistance.
- (3) Skyrmion bag S(4) undergoes different topological transitions when it passes through different voltage gates. The transition from S(4) to S(N) ($N = 0 - 4$) can be achieved by controlling the PMA gradient in the voltage gate and driving current density. The different topological transitions of skyrmion bag are related to the repulsive forces between the inner antiskyrmions.
- (4) A continuous topological transition from S(4) to S(1) can be achieved by placing three voltage gates on a racetrack, i.e., each voltage gate prevents only one inner antiskyrmion from passing. By calculation, the energy of each inner antiskyrmion is on the order of 10^{-19} J.

Keywords: skyrmion, skyrmion bag, synthetic antiferromagnetic racetrack, voltage-controlled magnetic anisotropy, micromagnetic simulation

目录

独创性声明	I
摘要	III
Abstract	V
第 1 章 绪论	1
1.1 自旋电子学概述	1
1.1.1 巨磁电阻 (GMR)	1
1.1.2 隧道磁电阻 (TMR)	2
1.1.3 自旋霍尔效应 (SHE)	3
1.2 斯格明子研究进展	5
1.2.1 斯格明子赛道存储器	6
1.2.2 斯格明子霍尔效应	8
1.2.3 斯格明子二极管	9
1.3 斯格明子袋研究进展	11
1.3.1 斯格明子袋在实验中的发现	11
1.3.2 斯格明子袋在电流驱动下的特性	13
1.4 研究内容	15
1.5 研究目的及意义	15
第 2 章 微磁学原理及数值计算方法	17
2.1 微磁学基本能量	17
2.1.1 Zeeman 能	17
2.1.2 单轴各向异性能	18
2.1.3 交换能	18
2.1.4 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) 能	18
2.1.5 Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) 能	18
2.1.6 退磁能	18
2.2 磁化动力学方程	18
2.2.1 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程	18
2.2.2 自旋转移力矩 (STT)	18

2.3 微磁模拟软件 (Ubermag)	18
2.3.1 微磁建模 (Micromagneticmodel)	18
2.3.2 微磁计算求解器 (OOMMF)	18
2.3.3 数据分析 (Micromagneticdata)	18
2.3.4 开源性	18
参考文献	20
致谢	IX
攻读硕士期间发表的论文	XI

第1章 绪论

1.1 自旋电子学概述

自旋电子学是一种新型电子学技术，与传统电子学依靠电子的电荷自由度不同，它利用电子的自旋自由度来传输、存储和处理信息。从上世纪 80 年代观察到的磁电阻现象起，自旋电子学逐渐在磁性存储器、传感器、计算机和通信设备等领域展现出了广泛的应用前景。由于它的应用涉及到电子自旋的操纵、传输和检测，而自旋与磁性密切相关，因此磁性材料在自旋电子学中具有重要的地位。一些新型材料的发现也促进了自旋电子学的进一步发展，如半金属铁磁体（ CrO_2 和 Fe_3O_4 ）、半金属反铁磁体、拓扑绝缘体和磁性半导体等。此外，自旋电子学的研究还涉及到新的现象，如自旋霍尔效应和自旋轨道效应等，这些现象为自旋电子学的应用提供了新的机遇和挑战。

如今，自旋电子器件在数据存储的两个不同技术中发挥着重要作用。一方面，自旋阀磁记录读取头大幅增加了磁性硬盘驱动器（HDD）的存储容量；另一方面，自旋电子学的发展为实现无运动机械部件的固态存储器提供了可能性。其中，磁性随机存储器（MRAM）是一种非常有前景的存储技术，它将磁性元素的磁化方向代表数据信息进行存储。2008 年，Parkin 等人^[1]提出了一种新型存储技术——基于磁畴壁的赛道存储器。与现在的任何其他固态存储设备不同，这种存储器可以将编码在手性磁畴壁中的磁性数据沿着磁性纳米赛道移动，通过在单个赛道中存储许多磁畴壁（可能是 100 个或更多）就可以实现非常密集的存储。这种潜在的固态非易失性存储器的存储容量可与磁盘驱动器相媲美，而且性能更好、能耗更低。

对于使用斯格明子作为赛道存储器数据位的兴趣是源于观察到单晶 B20 化合物 MnSi 中的斯格明子可以用非常小的电流移动，这个电流密度比使用自旋轨道力矩（SOT）驱动磁畴壁的临界电流密度还低几个数量级。尽管非常低的电流密度会导致斯格明子运动非常缓慢，但对于一些赛道存储器的应用，例如替代垂直 NAND 闪存存储器，小电流密度是非常有利的，而且数据位的缓慢运动也是可以接受的。基于斯格明子的赛道存储器给存储技术提供了一种新的选择，使赛道存储设备在更低的能耗和更高的读写速度之间取得平衡，这非常有吸引力并具有光明的应用前景。

1.1.1 巨磁电阻（GMR）

自旋极化电流从铁磁性（FM）材料注入到非磁性（NM）材料中是 1975 年的隧道磁电阻（TMR）、1988 年的巨磁电阻（GMR）和 1993 年的 Johnson 晶体管演示所使用的最常用的产生自旋的方法，并由此开启了磁输运的研究^[2-5]。注入效率取决于铁磁材料的自旋极化和 FM/NM 界面处的自旋散射。此外，消除铁磁材料的杂散场对于注入效率也非常重要。磁输运的一个关键发现是由 Fert^[3]和 Grünberg^[4]发现的多层磁性金属材料中的巨磁电阻效应，他们因此发现获得了 2007 年的诺贝尔物理学奖。巨磁电阻效应

是指在一个金属层系统中，当外部磁场改变铁磁层的磁化时其电阻发生巨大变化^[6]。两个铁磁层的磁矩平行排列通常比反平行排列时具有更低的电阻，如图1.1所示。磁电阻比率（ P_{MR} ）可以定义为：

$$P_{MR} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \quad (1-1)$$

式中： R_P 和 R_{AP} 分别表示两个铁磁层中磁化方向平行和反平行时的电阻。1998年，IBM 发现了称为自旋阀的低场 GMR 传感器。相比于先前存在的基于各向异性磁电阻（AMR）的磁电阻传感器，这些传感器能够提供更大的信号变化，而且在硬盘驱动器中读取存储数据时具有更好的稳定性。随后，在温度为 300 K 下 $[\text{Co}(0.8)/\text{Cu}(0.83)]_{60}$ （厚度单位为 nm）结构中 P_{MR} 已经提高到 65%^[7]。通过将铁磁材料替换为半金属铁磁材料 $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ ，室温下最大 P_{MR} 可达 82%^[8]。

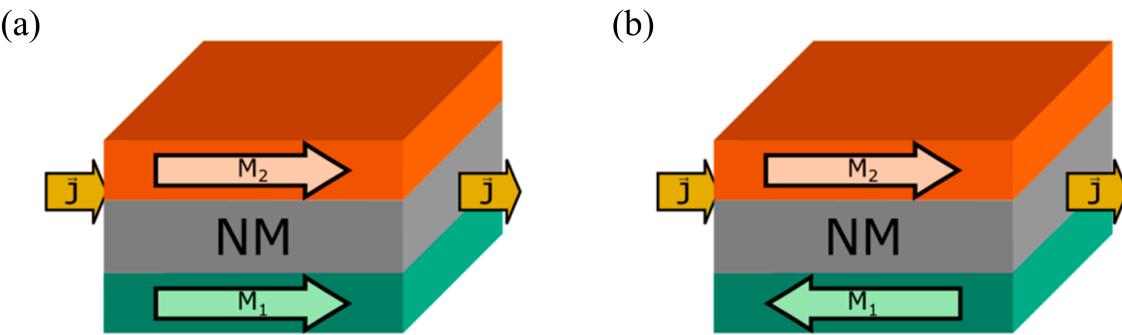


图 1.1 平面内电流（CIP）结构中的 GMR 双层^[6]

Fig. 1.1 GMR double layer in Current in Plane (CIP) configuration^[6]

1.1.2 隧道磁电阻（TMR）

TMR 效应是指由于两个铁磁电极的磁矩相对取向不同引起的磁隧道结（MTJ）的电阻变化。MTJ 由两个铁磁层和一个中间非磁性层组成，在低温下能够展现出磁化结构与电阻之间的关系^[9]，如图1.2所示。Miyazaki^[10]和 Moodera^[11]等人先后在室温下实现了 TMR。自那以后，在由 $\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.4}\text{B}_{0.2}/\text{AlOx}/\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_{0.4}\text{B}_{0.2}$ 组成的 MTJ 中，TMR 比率（一种衡量 MTJ 效率的指标）迅速提高到了 80%^[12]。这里，TMR 比率（ P_{TMR} ）可以被定义为^[9]：

$$P_{TMR} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} = \frac{2P_1 P_2}{1 - P_1 P_2} \quad (1-2)$$

式中： R_{AP} 和 R_P 分别表示 MTJ 的两个磁性层在磁化方向相反和相同时的电阻， P_1 和 P_2 分别是两个磁性层的自旋极化率，它可以被定义为：

$$P = \frac{N_{majority} - N_{minority}}{N_{majority} + N_{minority}} \quad (1-3)$$

式中： $N_{majority}$ 和 $N_{minority}$ 分别表示磁性层电子的两种空间取向的数量。通过用外延 MgO 替换非晶态 AlOx ，理论预测在 Fe/MgO 界面上由于相干隧穿可以实现超过 1000% 的 P_{TMR} ^[13-14]。 Fe/MgO （后来发现还有 CoFeB/MgO ）界面使它们的 $\Delta 1$ 能带（处于禁

带之上的能带)能够平滑连接,而其它能级相对较高的能带(如 Δ_2 和 Δ_5)则不能。由于 Δ_1 能带在Fe和CoFe合金中的自旋极化率为100%,这使得电子可以通过MgO壁垒进行隧穿并使MgO呈现出近似半金属性质,从而在MgO作为非金属层的MTJ中观察到非常高的 P_{TMR} 。对于相干隧穿, $P_{1(2)}$ 可以达到100%,导致 P_{TMR} 趋于无穷大。Parkin^[8]和Yuasa^[15]分别在自己的实验中实现了巨大的 P_{TMR} 。此外,在室温下由 $\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.6}\text{B}_{0.2}/\text{MgO}/\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.6}\text{B}_{0.2}$ 组成的MTJ可以实现高达604%的 P_{TMR} ^[7]。随着过去十年间磁盘驱动器面密度增加了近四倍以及近期GB级别的MRAM的发展, P_{TMR} 的急剧增加已迅速应用于自旋电子器件中。

尽管GMR和TMR这两种效应都与磁场对材料电阻的影响有关,但是它们的物理机制和实现方式不同。相比于GMR效应,TMR具有磁灵敏度高、工作磁场低和非易失性等特点。2005年,研究人员成功利用TMR效应研发出TMR磁头。TMR磁头比GMR磁头具有更高的灵敏度和稳定性。此外,TMR效应可以应用于检测微弱磁场信号的磁性传感器以及基于MTJ结构的磁随机存储器。

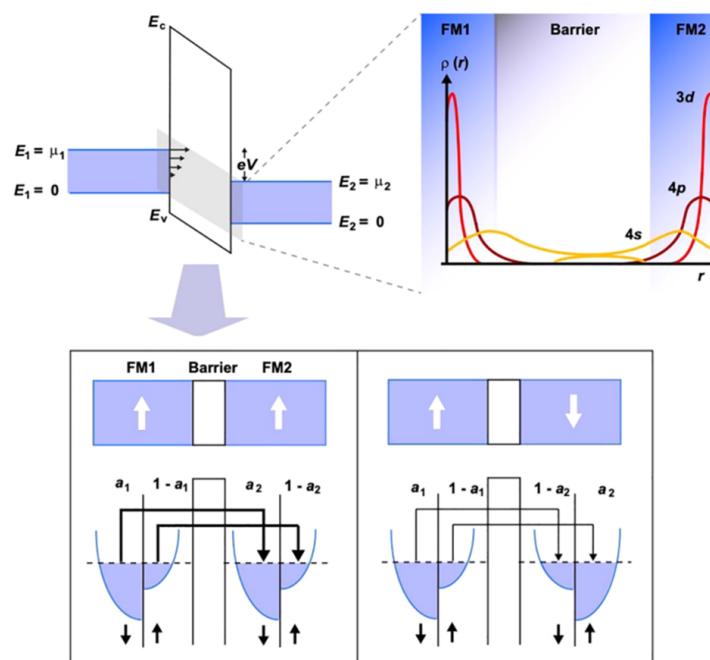


图1.2 自旋极化电子隧穿示意图^[9]

Fig. 1.2 Schematic diagram of spin-polarized electron tunnelling^[9]

1.1.3 自旋霍尔效应(SHE)

自旋霍尔效应(SHE)是一种相对论性的自旋轨道耦合现象,它可用于在非磁性系统中生成或检测自旋电流。SHE早在50年前就被预测,理论学家Dyakonov^[16]和Pere^[17]提出,在相对论性自旋轨道耦合的系统中,非极化电流能够导致横向自旋电流。在他们的理论中,自旋轨道耦合通过电子在非极化杂质上的Mott散射产生了SHE,这导致具有相反自旋的电子空间分离。因为自旋的极化轴垂直于横向自旋电流和纵向电流的驱动平

面，因此该效应具有霍尔对称性。

在提出这一原始理论近 30 年后，Hirsch^[18]和 Zhang^[19]引入了实验探测该现象的概念。Hirsch 提出了一种器件，其中自旋电流通过 SHE 在器件的一个部分产生，并注入到另一个部分，在那里通过逆自旋霍尔效应（iSHE）被检测。在 iSHE 中，自旋电流产生一个横向电流，当电荷在样品的边缘积累时，可以通过电学方法检测到。同时依赖 SHE 和 iSHE 来观察此现象的方法在实验上面临着很大的挑战，因此这种方法直到最近才被实现^[20]。然而，SHE 有一个逆向对应物的提议在建立该现象的基本物理规律和利用该效应作为非磁性材料中注入和检测自旋电流的工具方面发挥了关键作用。

Zhang 提出了使用附加的铁磁探针探测由 SHE 产生的边缘自旋积累的方法。该方法基于检测铁磁电极上的电化学势与其磁化方向及其下方非磁性体系中积累的自旋的相对取向之间的依赖关系。这种方法的可行性证明花费了几年的时间。然而，从更广泛的角度来看，将 SHE 与在非磁性体系中利用铁磁体注入和检测自旋的领域联系起来的想法，推动了大量重要的自旋霍尔器件的研究。

SHE 的实验发现源于从不同角度研究 SHE 的理论工作。受到有关铁磁体中类似反常霍尔效应的内在本质研究的启发，Murakami 等人和 Sinova 等人预测非磁性体系中电子的自旋相关横向偏转可以直接来自导体的相对论性能带结构，而不涉及 Mott 散射。与 Hirsch 和 Zhang 提出的利用电学方案检测外在、散射诱导的 SHE 不同，内在 SHE 聚焦于半导体，并利用这些材料的光学活性来检测 SHE。Kato 等人使用磁光科尓显微镜扫描隧道中的自旋极化，如图1.3所示。Wunderlich 等人使用共面 P-N 二极管检测自旋霍尔通道相反边缘的圆偏振电致发光。值得注意的是，Wunderlich 等人将观察到的信号归因于内在 SHE，而 Kato 等人将其归因于外在 SHE。

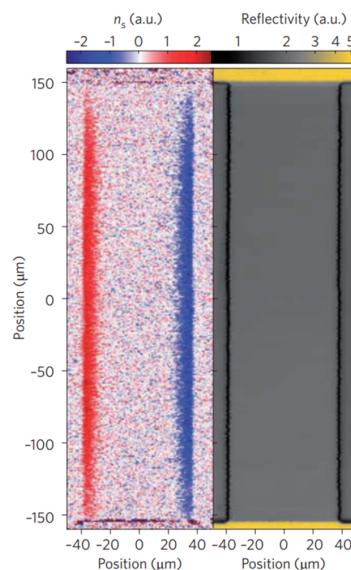


图 1.3 磁光科尓显微镜观察到的 SHE

Fig. 1.3 Observation of SHE by the magneto-optical Kerr microscope

1.2 斯格明子研究进展

磁斯格明子是一种手性自旋结构，它在 1989 年被预测可以存在于破缺反演对称的磁性材料中。2009 年，Mühlbauer 等人在低温下（大约 29 K）利用中子散射技术首次观测到斯格明子晶格结构存在于手性磁体 MnSi 中。随后，在非中心对称的 B20 化合物以及具有界面 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用（DMI）的多层结构（铁磁体和重金属的堆叠）中也发现了斯格明子。由于其非凡的拓扑性质，斯格明子可以被视为局域准粒子并表现出与其拓扑性质相关的静态和动态特性。在二维体系下，斯格明子的拓扑结构由其拓扑电荷数表征：

$$Q = \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{m} \cdot (\partial_x \mathbf{m} \times \partial_y \mathbf{m}) dx dy \quad (1-4)$$

式中： \mathbf{m} 是单位磁化矢量场。 Q 表示在整个平面空间内 \mathbf{m} 绕二维表面的圈数。最常见的斯格明子包括 Bloch 型和 Néel 型斯格明子，其拓扑电荷数均为 $Q = -1$ ，如图 1.4 所示。

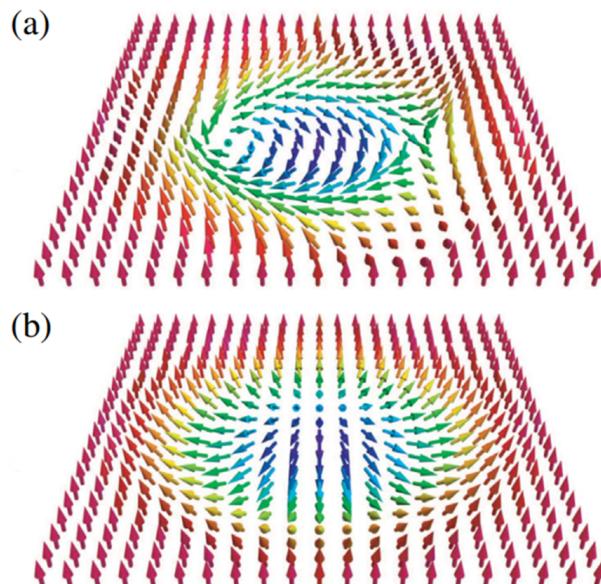


图 1.4 不同类型斯格明子的磁化结构

Fig. 1.4 Magnetization configurations of different types of skyrmion

(a) Bloch 型斯格明子；(b) Néel 型斯格明子

自旋极化电流通过对磁矩产生自旋转移力矩（STT）或自旋轨道力矩（SOT）从而推动斯格明子运动，这是斯格明子应用于自旋电子器件重要的驱动力之一。此外，自旋极化电流也可以用来创建斯格明子。因此，自旋电流产生和驱动斯格明子在新一代电子器件和信息存储技术方面具有巨大潜力，这体现在它们可以提供更高的存储密度、更快的数据处理速度、更好的稳定性和抗干扰性。

2017 年，Legrand 等人通过在 Co 多层膜中注入自旋极化电流形成了斯格明子。如图 1.5(a) 所示，他们在不同厚度的 Co 多层膜上注入了 1000 个持续时间为 200 ns 的电流脉冲后形成了多个直径小于 100 nm 的斯格明子。在此基础上，他们还研究了电流

($J = 2.85 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$) 驱动斯格明子的运动, 这些结果有助于设计电流控制的斯格明子器件。

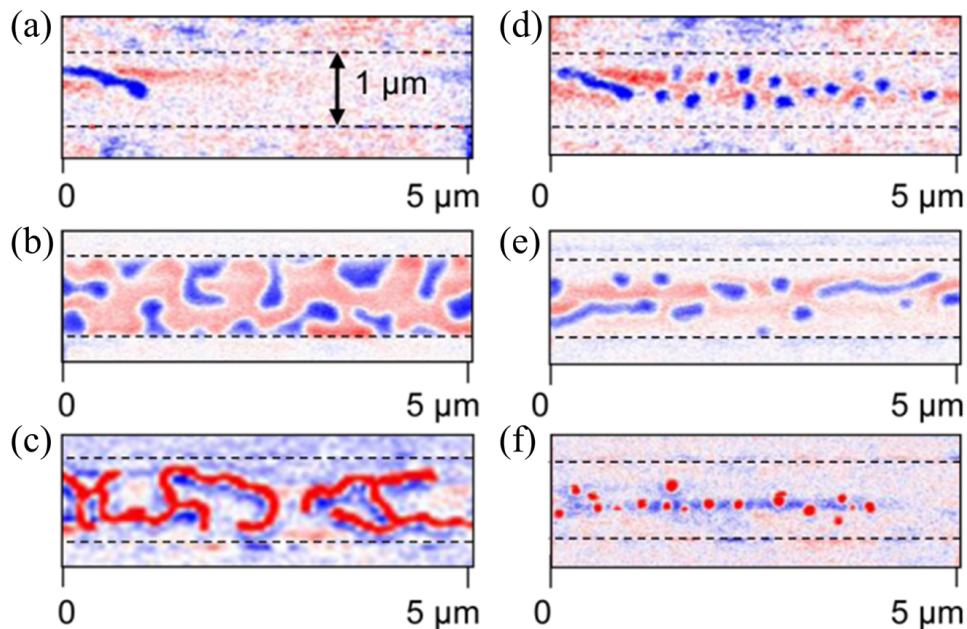


图 1.5 在具有不同厚度且宽度为 $1 \mu\text{m}$ 的 Co 多层膜上注入电流前后其磁化结构的变化

Fig. 1.5 The change in magnetic structure before and after injecting current on Co multilayers with different thicknesses and a width of $1 \mu\text{m}$

(a)-(c) 注入电流前且 Co 的厚度分别为 0.6 nm , 0.8 nm , 1.0 nm 时的磁化结构; (d)-(f) 注入电流后且 Co 的厚度分别为 0.6 nm , 0.8 nm , 1.0 nm 时的磁化结构

1.2.1 斯格明子赛道存储器

斯格明子的拓扑结构稳定、纳米级尺寸和驱动电流密度低等特点使它有望成为下一代自旋电子器件的信息载体, 而斯格明子最有潜力的应用之一是赛道存储器。2013 年, Fert 等人提出可以使用斯格明子来建立磁赛道存储器, 它类似基于磁畴壁的磁赛道存储器。在基于斯格明子的磁赛道存储器中, 信息可以通过斯格明子的存在和不存在来编码, 例如让斯格明子的存在表示数据位 “1”, 缺失表示数据位 “0”, 如图 1.6 所示。2015 年, Tomasello 等人展示了通过在铁磁层或重金属基底中产生自旋霍尔效应引起的自旋电流来操纵 Bloch 型和 Néel 型斯格明子的技术优势和局限性。他们发现, 由自旋霍尔效应引起的自旋力矩驱动 Néel 型斯格明子是实现下一代斯格明子赛道存储器最有前途的方法。2017 年, Yu 等人在实验上实现了一种室温下基于斯格明子运动的存储器件, 这为建立完全功能的斯格明子赛道存储器提供了基础。

然而, 这种方法在读取赛道中的长序列数据位时并不稳定, 尤其是考虑到热扰动的影响。例如, 对于一个由 “0” 位 (即缺失斯格明子) 组成的数据序列, 实际上很难确定纳米轨道中传输了多少个 “0” 数据位, 因为两个斯格明子之间的间距可能是变化的。此外, 时钟同步是一个难以解决的问题, 因为数据位 “0” 的位置是不可预测的。2016

年 Wang 等人提出了一种新型赛道存储器模型以解决上述问题。通过电压调控，他们将“0”和“1”两种数据位均用存在斯格明子表示，并将它们同步移动，如图1.7所示。利用电压控制的Y形结构赛道，可以将斯格明子驱动到L型或R型纳米轨道中，具体取决于输入的数据位，如图1.7(b)所示。例如，如果输入数据位为“0”，则开启L支路并关闭R支路使斯格明子移动到L型纳米轨道。如果输入的数据位是“1”，斯格明子将移动到R型纳米轨道中。

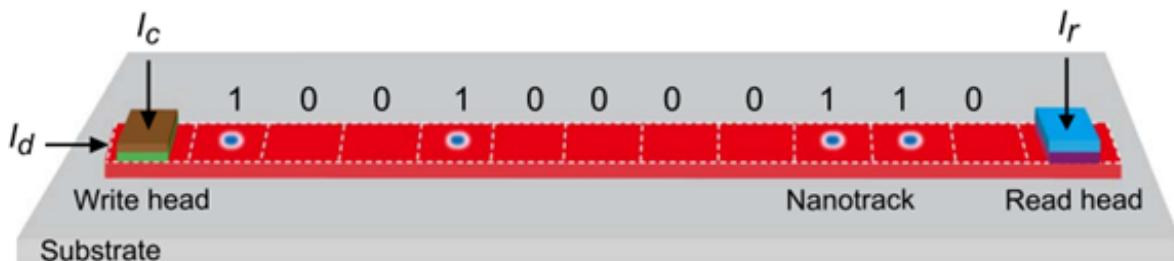


图 1.6 斯格明子用于信息编码的赛道模型

Fig. 1.6 Skyrmion racetrack model for information encoding

需要注意的是，当斯格明子被驱动到其中一条纳米轨道时，与之对应的铁磁态（无斯格明子状态）也会同时被驱动到另一条纳米轨道，因为两条纳米轨道的驱动电流是同时打开的。这样就可以形成互补型的数据表示，并且可以通过区分斯格明子的位置（在 L 型纳米轨道或 R 型纳米轨道中）来检测数据位。互补型斯格明子赛道存储器的设计大大提高了斯格明子检测的稳定性。

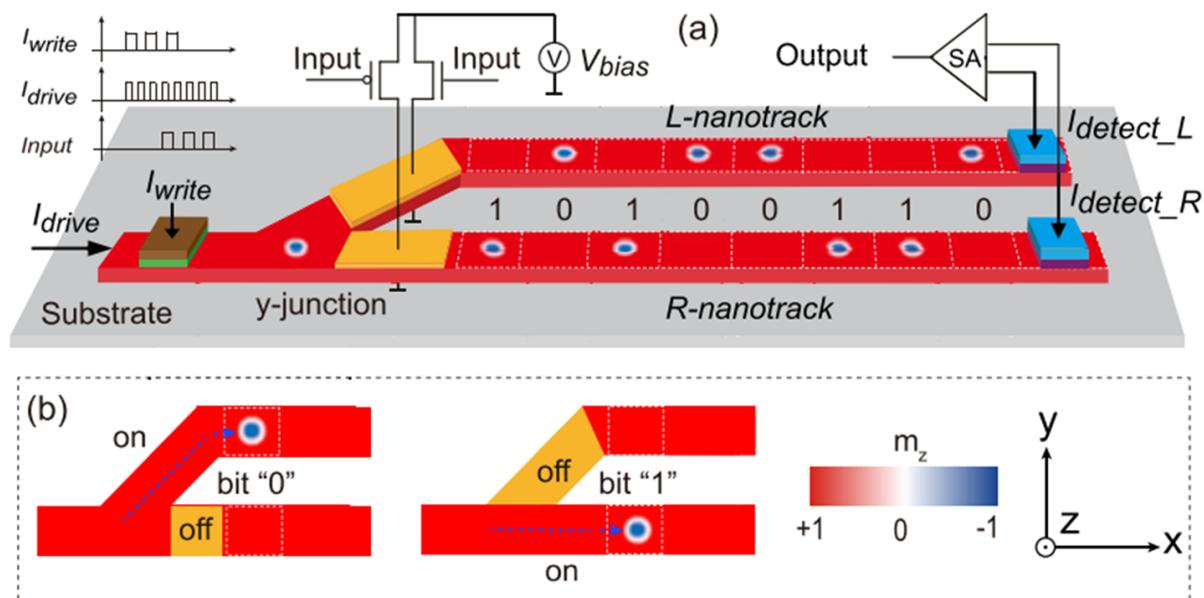


图 1.7 互补型斯格明子赛道存储器

Fig. 1.7 Complementary skyrmion racetrack memory

(a) 存储器模型示意图；(b) 电压控制的 Y 型结构的数据表示和编码

1.2.2 斯格明子霍尔效应

斯格明子作为一种具有类似粒子特性的磁化结构，其拓扑电荷不为零，这使它在运动时方向会发生偏转，就像带电粒子在磁场中的运动，这被称为斯格明子霍尔效应（SkHE），这种使斯格明子运动时方向发生偏转的力被称为马格努斯力。当斯格明子应用于赛道存储器时，它可能会因为马格努斯力的存在而运动到赛道边缘并湮灭，但是当斯格明子应用于逻辑器件时，马格努斯力的存在会使斯格明子的运动轨迹偏转从而实现某种逻辑运算。因此研究 SkHE 对于斯格明子的应用是十分必要的。

2017 年，Jiang 等人研究电流驱动斯格明子时，使用磁光科尔（MOKE）显微镜在室温下 CoFeB 中直接观察到了 SkHE，如图1.8所示。他们通过施加不同方向的电流来驱动具有不同拓扑电荷 ($Q = +1$ 和 $Q = -1$) 的斯格明子，揭示了带电粒子的传统霍尔效应和斯格明子的 SkHE 之间的强相关性。此外，他们发现当斯格明子在靠近赛道边缘运动时，斯格明子会同时受到驱动力、马格努斯力和边缘排斥力的影响，这也会影响它的运动轨迹发生变化。

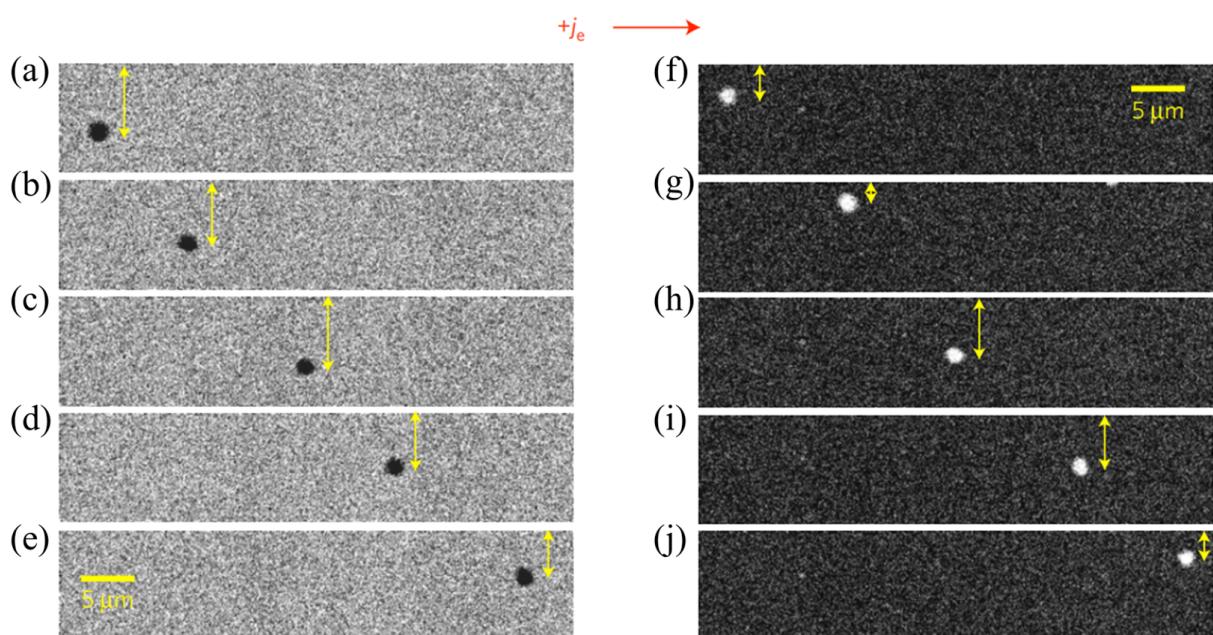


图 1.8 脉冲电流驱动斯格明子运动的 MOKE 显微镜图像

Fig. 1.8 MOKE microscopy images of pulse current-driven skyrmion motion

(a)-(e) $Q = -1$ 的斯格明子的运动轨迹；(f)-(j) $Q = +1$ 的斯格明子的运动轨迹

2019 年，Juge 等人研究了在室温下 Pt/Co/MgO 薄膜上电流驱动斯格明子的动力学。他们使用扫描电子显微镜（SEM）观测到了斯格明子，计算得到在电流驱动下斯格明子的最快速度可达到 100 m/s，并发现斯格明子的运动过程伴随着相应的 SkHE，如图1.9所示。此外，他们通过微磁模拟研究了 SOT 和材料缺陷对于斯格明子的运动速度以及 SkHE 的不同影响机制，结果表明材料缺陷（钉扎）对 SkHE 起主导性作用。这些结果对基于斯格明子的应用具有重要作用。

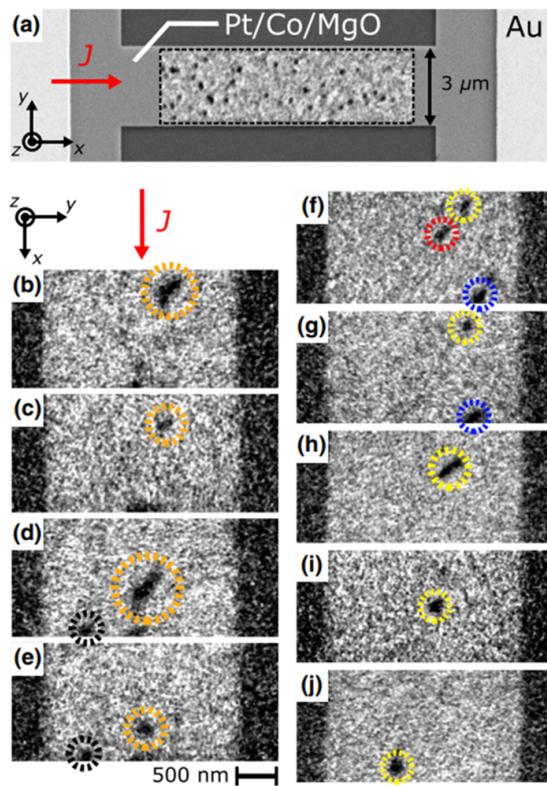


图 1.9 电流驱动斯格明子的模型及运动过程

Fig. 1.9 Model and motion process of current-driven skyrmion

- (a) 模型的 SEM 图像，包括一个 $3 \mu\text{m}$ 宽的 Pt/Co/MgO 赛道和与之接触的 Ti/Au 垫片用来注入电流；
(b) 电流驱动斯格明子的运动过程

1.2.3 斯格明子二极管

二极管是一种具有使电流单向导通特性的半导体元件，已被广泛应用于计算、通信、传感等领域，它极大的促进了当代科学的发展。受到电子二极管单向导通性能的启发，研究人员将目光投向其它可能实现单向导通性的领域，如微流体、光、热、磁等。其中磁斯格明子具有拓扑结构稳定、运动速度快以及尺寸小等优势，这使它能够作为信息载体并应用于二极管。

2020 年 Zhao 等人设计了一个基于斯格明子的二极管模型，并通过微磁模拟证明了斯格明子在该模型下能够实现单向导通，如图 1.10 所示。他们通过压控磁各向异性 (VCMA) 技术提高赛道边缘的垂直磁各向异性 (PMA)，这不仅能够通过减小 SkHE 来防止斯格明子湮灭，还能够有效提高斯格明子的运动速度。此外，调节驱动电流大小以及 VCMA 门宽度等参数可以控制斯格明子正向的导通和反向的钉扎。这对于斯格明子二极管的设计提供了新的思路。

2022 年，Feng 等人利用 SkHE 设计了斯格明子二极管。当斯格明子沿赛道从左向右运动时，它受到驱动力、马格努斯力和赛道上边缘的排斥力，这使它能够到达赛道右端。当斯格明子从右向左运动时，它受到的合力使斯格明子向赛道下边界运动并湮灭，

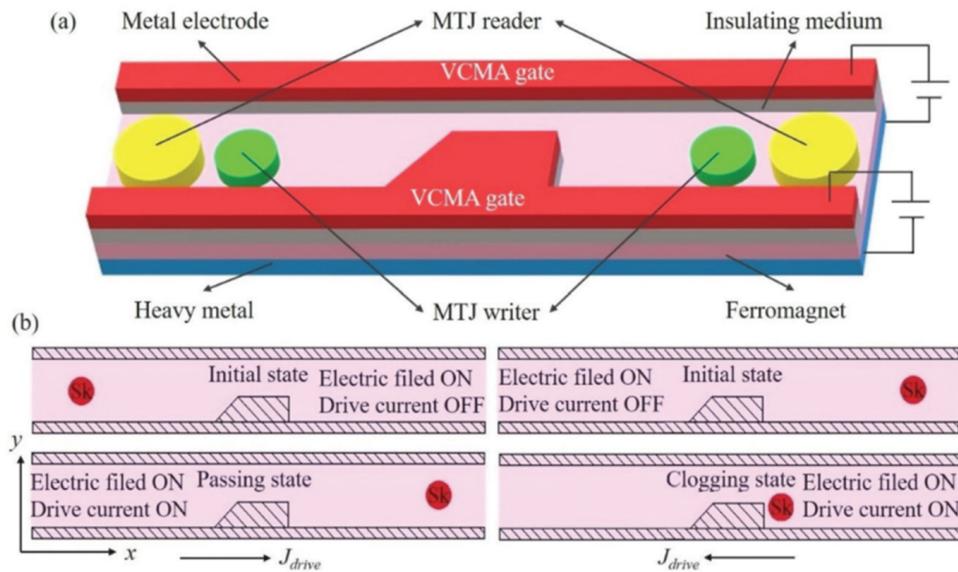


图 1.10 基于斯格明子二极管的模型及其单向导通性

Fig. 1.10 Schematic of the skyrmion-based diode and the one-way motion of the skyrmion

(a) 基于斯格明子的二极管模型; (b) 斯格明子正向导通和反向钉扎

如图1.11所示。此外，他们还研究了斯格明子在这种非对称赛道中运动的动力学以及热扰动下斯格明子的稳定性，这对于设计斯格明子二极管具有重要作用。

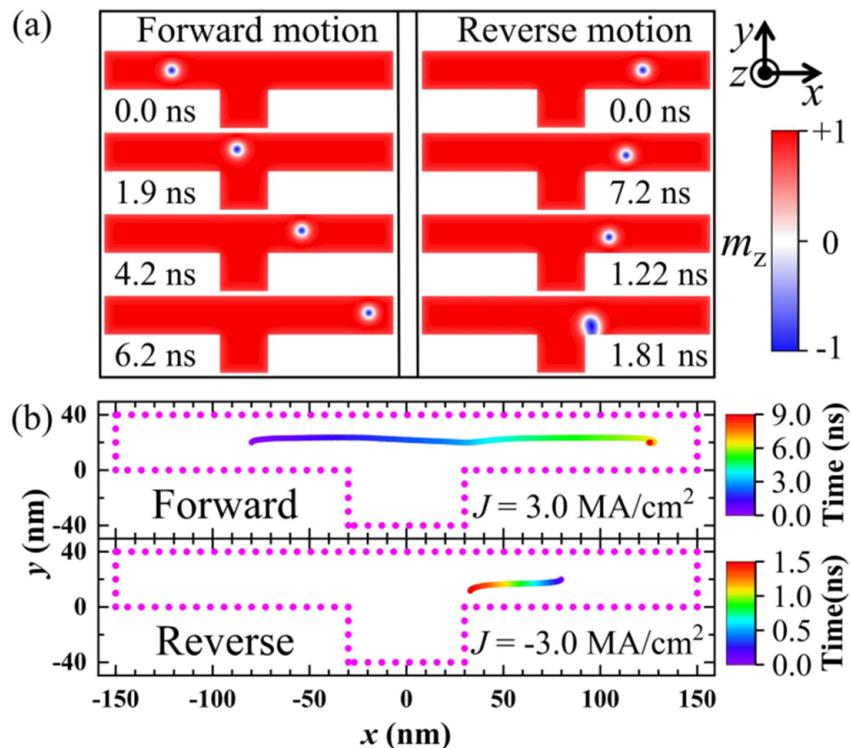


图 1.11 斯格明子在非对称结构赛道中的运动

Fig. 1.11 Skyrmion motions in the asymmetric structure racetrack

(a) 斯格明子的运动过程; (b) 斯格明子的运动轨迹

1.3 斯格明子袋研究进展

斯格明子袋是一种稳定的、具有高拓扑度和类似斯格明子的磁化结构，它由一个大的斯格明子嵌套任意数量的内部反斯格明子组成，如图1.12所示。在磁性薄膜中，可以通过总的拓扑电荷数 Q 来描述斯格明子袋，见公式(1-4)。 $Q = -1$ 表示一个斯格明子； $Q = +1$ 表示斯格明子袋内的一个反斯格明子。这里，可以用符号 $S(N)$ 来表示由一个外部斯格明子和任意数量的内部反斯格明子组成的斯格明子袋，其中 N 是内部反斯格明子的数量，斯格明子袋的总拓扑数为 $Q = N - 1$ 。换句话说， $S(0)$ 表示一个斯格明子， $S(N)$ ($N > 0$) 代表有 N 个内部反斯格明子的斯格明子袋。

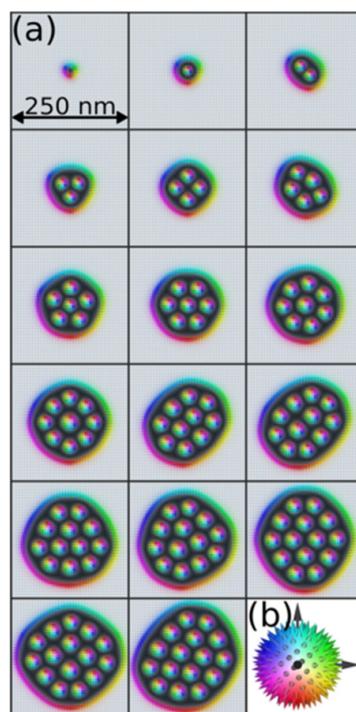


图 1.12 斯格明子袋的磁化结构

Fig. 1.12 Magnetic configurations of skyrmion bags

(a) 使用 MuMax3 模拟的 $S(N)$ ($N = 0 - 16$)；(b) 使用 Runge 色球表示 S_2 上的方向

1.3.1 斯格明子袋在实验中的发现

当斯格明子应用于赛道存储器时，一个斯格明子只能代表一个二进制位比特，而且斯格明子之间的排斥力决定了存储密度的上限。此外，实际的磁性材料是具有缺陷和杂质的，这会影响斯格明子移动并可能导致信息编码发生错误。在这样的背景下，将斯格明子替换为斯格明子袋将可能解决上述问题。

2019 年，Foster 和 Kind 等人通过实验证明了斯格明子袋可以稳定存在于液晶中，并且通过微磁模拟的方法研究了它在磁性材料中的性质。研究表明，在 FeGe 薄膜中斯格明子袋在 1 MA/cm^2 的电流驱动下达到的速度约为 1 m/s 。他们通过对具有不同磁化结

构的斯格明子袋赋予不同的二进制位信息，成功表达出了单词“SKYRME”，如图1.13所示。此外，斯格明子袋之间的排斥力随着距离的减小而显著增大，这也类似于斯格明子之间的相互作用，如图1.14所示。这表明斯格明子袋在运动过程中不会发生碰撞而湮灭。

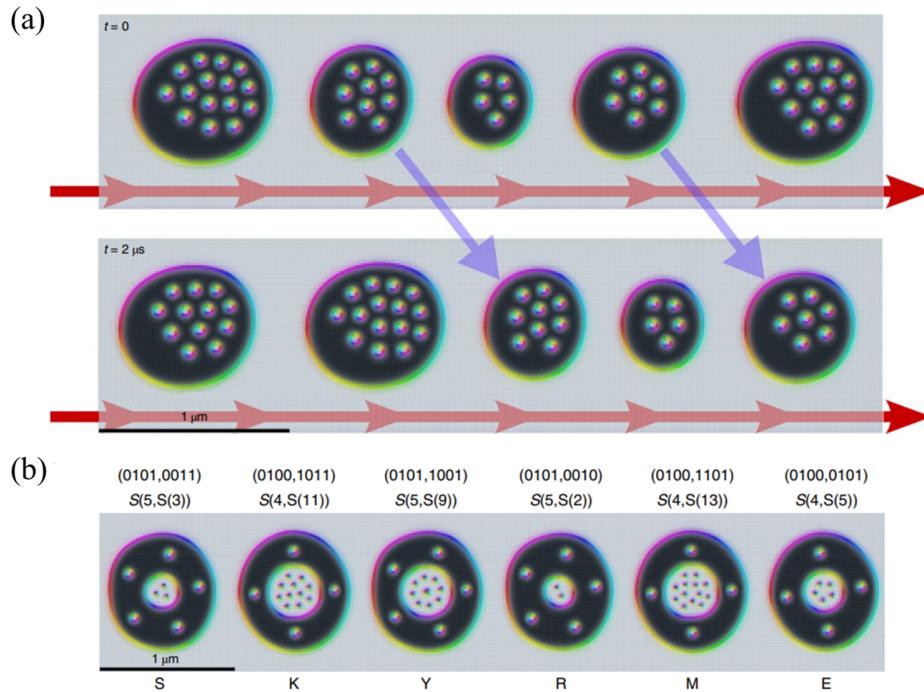


图 1.13 电流驱动斯格明子袋运动和不同拓扑度斯格明子袋的信息编码

Fig. 1.13 Current-induced motions and data encoding of skyrmion bag

(a) 电流驱动斯格明子袋运动的不同阶段；(b) 使用 ACSII 二进制编码的单词“SKYRME”，其中外面的斯格明子袋表示前四位比特，内部的斯格明子袋表示后四位比特，每个完整的斯格明子袋代表一个字母

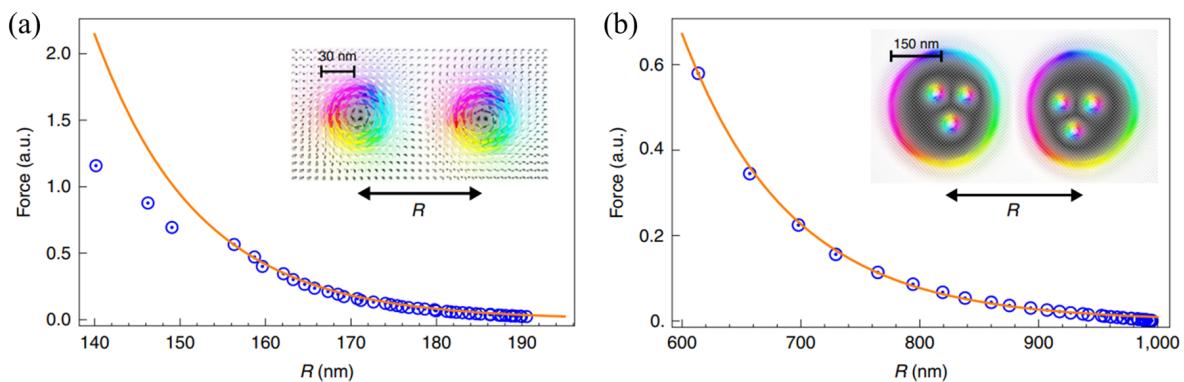


图 1.14 斯格明子和斯格明子袋之间的排斥力随它们间距的变化

Fig. 1.14 The repulsive force as a function of distance of skyrmions and skyrmion bags

(a) 斯格明子之间的排斥力随间距的变化；(b) 斯格明子袋之间的排斥力随间距的变化

2021 年，Tang 等人使用洛伦兹透射电子显微镜（LTEM）在厚度为 150 nm 的 FeGe

片中观测到了三维斯格明子袋，并研究了电流脉冲对它的影响。图1.15显示了斯格明子束（skyrmion bundle）的磁化结构，其内部截面为斯格明子袋。他们从实验上证明了斯格明子束是一种稳定并具有高拓扑度的磁化结构，它在电流驱动下也具有斯格明子霍尔效应，并且斯格明子霍尔角随斯格明子袋的拓扑电荷变化而变化。这对于在二维手性磁体中实现斯格明子袋并进一步应用于高密度赛道存储器具有重要意义。

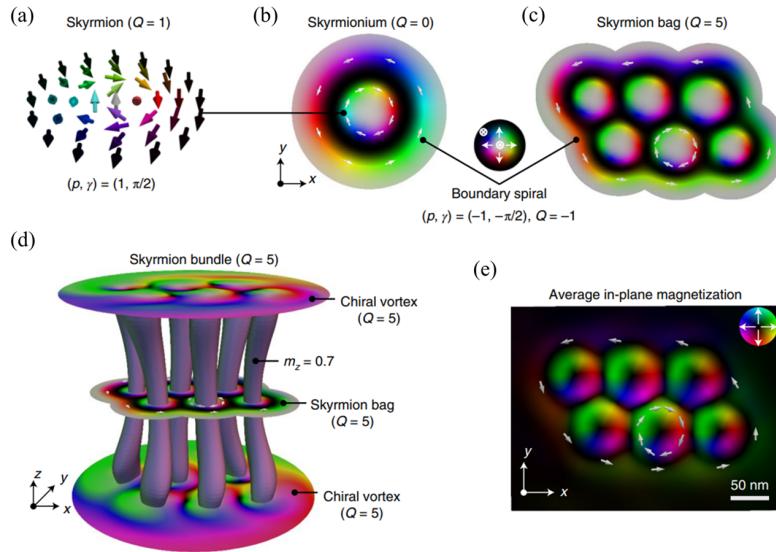


图 1.15 磁斯格明子束的示意图

Fig. 1.15 Schematics of a magnetic skyrmion bundle

(a) 拓扑电荷 $Q = 1$ 的斯格明子；(b) $Q = 0$ 的嵌套斯格明子（skyrmionium）；(c) $Q = 5$ 的斯格明子袋；(d) 在厚度为 150 nm 的 FeGe 片中的 $Q = 5$ 的斯格明子束；(e) 斯格明子束的面内磁化结构

1.3.2 斯格明子袋在电流驱动下的特性

斯格明子袋能够像斯格明子一样在各种驱动方式下运动，如自旋极化电流和 PMA 梯度。由于斯格明子在电流驱动下能够表现出速度快和结构稳定等优势，因此研究人员更愿意将注意力放到电流驱动斯格明子的动力学。同理，电流驱动斯格明子袋的研究也正在吸引越来越多的研究人员。斯格明子袋在电流驱动下表现出的动力学特性（如速度和霍尔角等）与其自身的拓扑电荷数相关，这对于具有不同拓扑数的斯格明子袋应用于赛道存储器是十分有意义的。

2020 年，Wang 等人利用微磁模拟研究了斯格明子袋在 SOT 的驱动下的动力学。他们发现在具有周期性边界条件下的 Co/Pt 多层膜中用相同大小的电流驱动斯格明子袋时，斯格明子袋的速度随着其拓扑数的增加而逐渐减小，但斯格明子霍尔角随着它的拓扑数增加而增大；在无周期性边界条件的 Co/Pt 纳米条带上驱动斯格明子袋时，斯格明子袋的速度与其拓扑数基本无关，如图1.16所示。此外，他们证明了斯格明子袋在纳米条带上通过缺陷时仍然能表现出良好的拓扑保护性，如图1.17所示。这使斯格明子袋在应用于新一代自旋电子器件时更具优势。

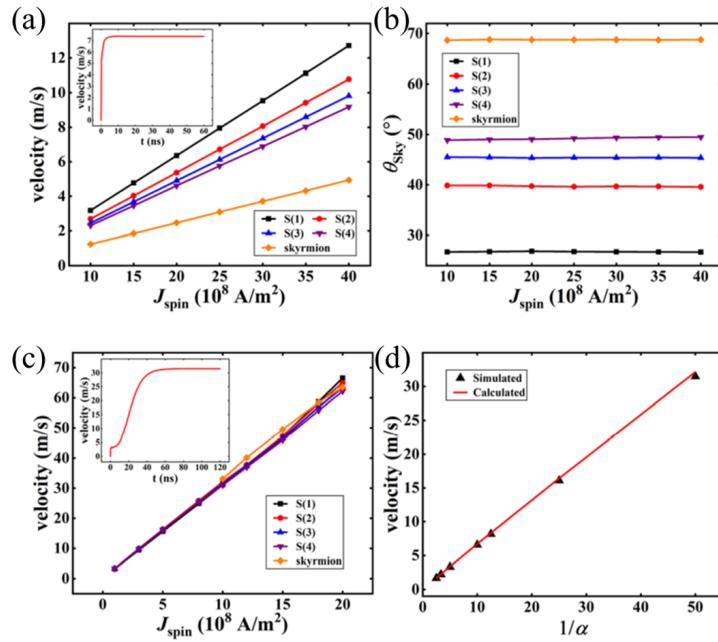


图 1.16 斯格明子袋在磁性薄膜和纳米条带中的运动

Fig. 1.16 The motion of the skyrmion bag in the ferromagnetic film and nanostrip

(a) 和 (b) 磁性薄膜中的斯格明子袋 $S(N)$ ($N = 1 - 4$) 和斯格明子在不同电流的驱动下它们的速度和斯格明子霍尔角的变化; (c) 和 (d) 纳米条带中的斯格明子袋 $S(N)$ ($N = 1 - 4$) 和斯格明子在不同电流和阻尼系数的条件下它们的速度的变化

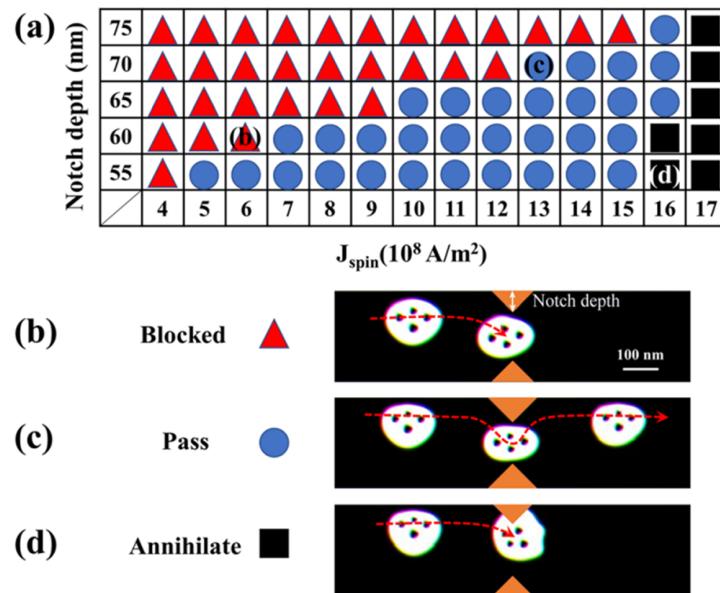


图 1.17 斯格明子袋通过缺陷时的钉扎状态和过程

Fig. 1.17 The pinning state and process of skyrmion bag passing through a defect

2021 年, Kind 等人研究了平面内电流 (CIP) 和平面外电流 (CPP) 驱动具有不同拓扑度的斯格明子袋的动力学。他们用 Thiele 方程和微磁模拟研究了在这两种方式的驱动下, 磁性薄膜中的斯格明子袋 $S(N)$ ($N = 0 - 16$) 的运动速度和斯格明子霍尔角随其拓

扑数的变化。结果显示，在 CIP 和 CPP 驱动下，当 $S(N)$ 的拓扑度较低时，例如 $N = 0 - 4$ ，斯格明子霍尔角会发生明显变化；当 $S(N)$ 的拓扑度较高时，斯格明子霍尔角几乎不变，并且当 N 趋于无穷大时，斯格明子霍尔角存在一个极限值。此外，在相同电流密度下，CPP 驱动的 $S(N)$ 具有更高的速度，但相应的偏转角也更大。

1.4 研究内容

斯格明子是一种特殊的自旋磁化结构并且具有类似粒子的特性。由于它具有拓扑稳定性好、驱动电流密度低以及尺寸小等优点，斯格明子在自旋电子学和磁学领域被广泛研究。目前对于斯格明子应用于二极管的研究仍停留在利用赛道结构的非对称性实现斯格明子的单向导通，并未解释斯格明子在运动过程中的速度变化以及相关的动力学行为，更没有得出斯格明子二极管的“伏安特性”曲线。另一方面，斯格明子袋作为一种嵌套式斯格明子结构，它具有的任意拓扑电荷数使它可以作为高密度赛道存储器的信息载体。已有研究表明斯格明子袋可以编码为不同的信息，但尚不知如何将斯格明子袋应用于赛道存储器才能实现高密度存储。本论文通过微磁学模拟的方法，研究在合成反铁磁赛道上电流驱动不同拓扑度的斯格明子通过电压门的动力学。研究内容包括：

- (1) 研究斯格明子从赛道两端开始运动并通过电压门时速度的变化，以及电压门产生的 PMA 梯度和驱动电流密度对斯格明子运动速度的影响，得到斯格明子的最高速度和驱动电流密度的关系曲线。
- (2) 从静态上探讨不同大小的 PMA 对斯格明子尺寸的影响，以及从动态上研究 PMA 梯度对运动的斯格明子阻力的大小。
- (3) 探讨材料参数（如 PMA 常数 K_u 、DMI 常数 D 、海森堡交换常数 A ）对 Co/Pt 薄膜磁化结构的影响，确认最适合斯格明子袋存在的参数范围。
- (4) 研究初始态为 $S(4)$ 的斯格明子袋在电流驱动下通过电压门控制的 PMA 梯度区域时发生的不同拓扑结构转变，并分析拓扑结构发生转变的原因。
- (5) 研究不同初始态的斯格明子袋通过电压门后发生的拓扑转变，并尝试通过在一个赛道上设置多个电压门实现从 $S(4)$ 到 $S(1)$ 的连续拓扑转变。

1.5 研究目的及意义

斯格明子是一种具有拓扑保护的纳米自旋结构，它具有尺寸小、拓扑结构稳定和低驱动电流密度等优点。这些特性使得斯格明子可以作为赛道存储器、逻辑器件和纳米振荡器中的信息载体。目前关于斯格明子的形成、稳定和运动等研究已不计其数，这些基础研究对于实现斯格明子的应用奠定了基础。

一方面，当斯格明子应用于二极管时，利用赛道结构或者能量的不对称性可以实现斯格明子的单向导通。但是斯格明子在运动过程中的速度变化以及相关的动力学行为尚未有具体解释。更重要的是，已有的关于斯格明子二极管的研究没有给出类似电子二极管的“伏安特性”，这表明斯格明子二极管的研究结果仍不完整。本论文研究了自旋

电流驱动斯格明子在带有 VCMA 的合成反铁磁赛道上的动力学。通过分析斯格明子正向和负向通过不同电压门时其最小速度与驱动电流密度和 PMA 梯度的关系，得到了斯格明子二极管的驱动电流密度—最小速度特性曲线，这类似于电子二极管的伏安特性曲线。这些工作完善了斯格明子二极管的理论研究。

另一方面，当斯格明子应用于赛道存储器时，一个斯格明子只能代表一个二进制位信息，并且斯格明子之间的排斥力使它们保持相对较长的距离，这不利于高密度信息存储。斯格明子袋是具有任意拓扑电荷数的嵌套式斯格明子结构，它可以很好地解决这个问题。已有研究表明斯格明子袋可以作为不同的编码信息，但是将斯格明子袋应用于赛道存储器的基本理论以及设计思路还没有出现。本论文提出了一种基于斯格明子袋的高密度赛道存储器，它通过在合成反铁磁赛道上施加自旋极化电流驱动斯格明子袋通过电压门并发生相应的拓扑结构转变来实现。此外，分析了斯格明子袋发生拓扑转变的根本原因，它与内部反斯格明子之间的相互作用力的变化有关。在此理论基础上，进一步通过在一个赛道上设置三个电压门实现了斯格明子袋从 S(4) 到 S(1) 的连续拓扑转变。这些结果为实现基于斯格明子袋的高密度赛道存储器提供了理论基础和设计思路。

第2章 微磁学原理及数值计算方法

微磁学模拟由于其出色的预测能力和对磁化动力学的表征及对实验结果的深入解释，已经成为纳米磁学研究中广泛使用的工具。在过去的二十年中，微磁学模拟从只能由高度专业化的团队实现，发展到现在已经有了多种开源和商业的软件包，使得非专家也能运行自己的模拟。微磁学的起源可以追溯到 20 世纪 60 年代，当时 Brown 建立了微磁学的理论基础，随后 Labonte 发表了他的薄膜中畴壁的内部结构的相关工作。从一开始显而易见的是，为了获得物理上有意义的结果，许多问题需要模拟大量参数，因此多年来对加速模拟的不同方法的探索一直没有停止。迄今为止，大部分的努力都集中在开发更高效计算静磁场的方法上，因为这是微磁模拟中耗时最多的部分。此外，在实现复杂的时间积分算法方面也取得了一些进展，从而允许使用更大的时长并能保持数值稳定性。

另一方面，在过去三十年中，显微技术的显著进步使人们可以制备和测量更小尺寸的样品，甚至可以研究纳米尺度的材料结构和性质。显微技术的巨大进步与计算机速度和容量的显著改善以及先前提到的更高效的计算方法的发展并驾齐驱。因此，随着时间的推移，使用个人电脑在合理的时间成本内进行具有真实器件尺寸的模拟变得越来越可行，这是微磁模拟变得流行的一个关键因素。

2.1 微磁学基本能量

磁性系统的能量可以通过哈密顿量来计算，它由不同的能量项组成。此外，影响 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程中磁化动态的有效场也可以从系统的哈密顿量中计算出来。本节介绍了几种微磁学中常用的能量项，并展示了它们对磁矩的影响。

2.1.1 Zeeman 能

Zeeman 能倾向于将所有磁矩与外磁场 H_{ext} 平行排列，其能量密度可以表示为：

2.1.2 单轴各向异性能

2.1.3 交换能

2.1.4 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) 能

2.1.5 Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) 能

2.1.6 退磁能

2.2 磁化动力学方程

2.2.1 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程

2.2.2 自旋转移力矩 (STT)

2.3 微磁模拟软件 (Ubermag)

2.3.1 微磁建模 (Micromagneticmodel)

2.3.2 微磁计算求解器 (OOMMF)

2.3.3 数据分析 (Micromagneticdata)

2.3.4 开源性

参考文献

- [1] PARKIN S S, HAYASHI M, THOMAS L. Magnetic domain-wall racetrack memory[J]. Science, 2008, 320(5873): 190-194.
- [2] JULLIERE M. Tunneling between ferromagnetic films[J]. Physics Letters A, 1975, 54(3): 225-226.
- [3] BAIBICH M N, BROTO J M, FERT A, et al. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(21): 2472.
- [4] BINASCH G, GRÜNBERG P, SAURENBACH F, et al. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange[J]. Physical Review B, 1989, 39(7): 4828.
- [5] JOHNSON M. Analysis of anomalous multilayer magnetoresistance within the thermomagnetoelectric system[J]. Physical Review Letters, 1991, 67(25): 3594.
- [6] ENNEN I, KAPPE D, REMPEL T, et al. Giant magnetoresistance: Basic concepts, microstructure, magnetic interactions and applications[J]. Sensors, 2016, 16(6): 904.
- [7] IKEDA S, HAYAKAWA J, ASHIZAWA Y, et al. Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(8): 082508.
- [8] PARKIN S, LI Z, SMITH D J. Giant magnetoresistance in antiferromagnetic Co/Cu multilayers[J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(23): 2710-2712.
- [9] HIROHATA A, YAMADA K, NAKATANI Y, et al. Review on spintronics: Principles and device applications[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 509: 166711.
- [10] MIYAZAKI T, TEZUKA N. Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1995, 139(3): L231-L234.
- [11] MOODERA J S, KINDER L R, WONG T M, et al. Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(16): 3273.
- [12] WEI H, QIN Q, MA M, et al. 80% tunneling magnetoresistance at room temperature for thin Al-O barrier magnetic tunnel junction with CoFeB as free and reference layers[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(9): 09B501.
- [13] BUTLER W, ZHANG X G, SCHULTHESS T, et al. Spin-dependent tunneling conductance of Fe|MgO|Fe sandwiches[J]. Physical Review B, 2001, 63(5): 054416.

- [14] MATHON J, UMERSKI A. Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction[J]. Physical Review B, 2001, 63(22): 220403.
- [15] YUASA S, NAGAHAMA T, FUKUSHIMA A, et al. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions[J]. Nature Materials, 2004, 3(12): 868-871.
- [16] DYAKONOV M I, PEREL V. Current-induced spin orientation of electrons in semiconductors[J]. Physics Letters A, 1971, 35(6): 459-460.
- [17] D'YAKONOV M I, PEREL V. Possibility of orienting electron spins with current[J]. Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 1971, 13: 467.
- [18] HIRSCH J. Spin Hall effect[J]. Physical Review Letters, 1999, 83(9): 1834.
- [19] ZHANG S. Spin Hall effect in the presence of spin diffusion[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(2): 393.
- [20] BRÜNE C, ROTH A, NOVIK E, et al. Evidence for the ballistic intrinsic spin Hall effect in HgTe nanostructures[J]. Nature Physics, 2010, 6(6): 448-454.

致谢

时光荏苒，三年的硕士生涯已接近尾声。东北大学“知行合一，自强不息”的校训已深刻我心，并激励着我不断前进。能够顺利的结束这三年的学习生活，我需要对许多人表示感谢。首先，我要感谢我的导师徐民老师。在我的研究过程中，徐老师一直给予我耐心的指导和支持：每一次投稿论文，他都能给出宝贵的意见并帮助我认真修改；每一次修改审稿意见，他都亲自与我讨论并给予鼓励。徐老师在学术上的卓越成就和科学热情激励着我不断前进，更重要的是，他总是鼓励我勇敢尝试，挑战自己，帮助我发现自己的优点和潜力，他的关心和帮助将使我受益终身。

其次，我要感谢我的师兄张津瑀和孟德响。他们带我走进了研究微磁学的大门，无论何时我向他们请教问题，他们总是富有激情并耐心的回答我。没有他们的帮助，我无法攻克一些难题。此外，我要感谢我的同门姜贵倩对我学习以及生活中的帮助，我们共同在实验室里做研究，互相讨论，她给了我很多灵感。课题组中师兄弟的支持和鼓励，让我感受到了一个大家庭的温暖和力量。

最后，我要感谢我的父母。他们无私的爱和支持，是我一路走来最坚实的后盾。他们从不让我感受到任何的压力和担忧，而是鼓励我自由探索和发展自己的潜力。他们的爱将永远是我前行的动力。

总之，我想感谢每一个帮助过我的人，他们给了我力量和勇气去探索未知的领域，也给了我一个温暖和有爱的大家庭。这些经历将会成为我生命中的珍贵财富，使我变得更加自信和坚定。

攻读硕士期间发表的论文

- [1] **Zhiyu Zhang**, Min Xu*, Guiqian Jiang, Jinyu Zhang, Dexiang Meng, Wenlong Chen, Yuliang Chen, and Changjing Hu. High-density racetrack memory based on magnetic skyrmion bags controlled by voltage gates[J]. **Journal of Applied Physics**, 2022, 132(11): 113901. **(Q2, IF 2.877)**
- [2] Min Xu*, **Zhiyu Zhang***, Jinyu Zhang, Guiqian Jiang, Yuliang Chen, Wenlong Chen, and Changjing Hu. Current-driven magnetic skyrmion diodes controlled by voltage gates in synthetic antiferromagnets[J]. **Applied Physics Letters**, 2023, 122(15): 152404. **(Q2, IF 3.971)**
- [3] Min Xu*, Guiqian Jiang*, **Zhiyu Zhang**, Runshui Li, Dexiang Meng and Jinyu Zhang. Fast switching of magnetic vortex state under an alternating magnetic field[J]. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2022, 55(32): 325303. **(Q2, IF 3.409)**
- [4] Min Xu*, Guiqian Jiang*, **Zhiyu Zhang**, Jinyu Zhang, Changjing Hu, Wenlong Chen and Yuliang Chen. Irreversible switching of vortex core in Pac-man nanodisks induced by rotating magnetic fields[J]. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2022, 56(5): 055301. **(Q2, IF 3.409)**
- [5] Jinyu Zhang*, Min Xu*, **Zhiyu Zhang**, Guiqian Jiang, Dexiang Meng. Generation and steady motion of skyrmionium in racetracks under successive pulsed currents and magnetic fields[J]. **Physics Letters A**, 2022, 451: 128433. **(Q2, IF 2.707)**