

磁性多层膜中斯格明子的前景与挑战*

江万军[†]

(清华大学物理系 低维量子物理国家重点实验室 北京 100084)

2020-02-11收到

[†] email: Jiang_lab@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200202

Skyrmions in magnetic multilayers: current status and future challenges

JIANG Wan-Jun[†]

(Department of Physics and State Key Laboratory of Low-Dimensional Quantum Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要 拓扑磁学是近年内磁学领域内衍生出的一个子学科,它以寻找、研究和利用磁性材料中的拓扑自旋结构为核心目标,相关研究在凝聚态物理领域内已成为一个较大的分支。这些拓扑自旋结构包括:磁涡旋(magnetic vortex)、磁性斯格明子(magnetic skyrmion)、磁浮子(magnetic bobber)等。文章将以磁性多层膜中的斯格明子为对象,从材料优化、拓扑物理、表征、操控、探测等角度出发,详细讨论当前的主要研究热点,以及未来功能器件应用方面的一些挑战。

关键词 磁性斯格明子, 磁性多层膜, 界面磁学, 自旋轨道力矩, 自旋拓扑物理

Abstract Topological magnetism is an emerging research field in nanomagnetism, the objective of which is to explore novel topological spin textures and potential device applications. These topological spin textures include magnetic vortices, magnetic skyrmions, magnetic bobbers, etc. In this article we use skyrmions in magnetic multilayers as an example to address the following important issues: material systems with optimized properties, topologic physics, characterization, manipulation and detection schemes, and challenges for future device applications.

Keywords magnetic skyrmions, magnetic multilayer, interfacial magnetism, spin-orbit torques, spin topology

1 引言

对称性破缺与强自旋轨道耦合给凝聚态物理注入了新的研究活力,并由此而衍生出了丰富的物理现象,拓扑绝缘体以及磁性斯格明子就是其中的例子^[1]。斯格明子是微纳米尺度上的一种具有粒子特性的空间自旋结构。在兼具丰富拓扑物理的同时,斯格明子在未来自旋存储器件方面也

有潜在应用的价值,相关研究因而受到很大关注。斯格明子材料一般具有空间反演对称破缺^[2-4],其哈密顿量中因此包含非共线 Dzyaloshinskii—Moriya(DM)相互作用: $\mathbf{D}_{ij} \cdot (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j)$, 其中 \mathbf{D}_{ij} 为 DM 矢量, $\mathbf{S}_{i,j}$ 为近邻自旋矢量。根据反演对称破缺的类型:晶体结构的非中心对称破缺,以及磁性多层膜中的界面反演对称破缺,DM 矢量的方向也不一样。由此而诞生出两种不同构型的斯格明子,块体材料中的涡旋构型斯格明子(vortex-type skyrmion)以及磁性多层膜中的奈耳构型斯格明子(Néel-type skyrmion)^[5]。

* 国家重点研发计划(批准号:2017YFA0206200,2016YFA0302300)、国家自然科学基金(批准号:11774194,51831005,1181101082,11804182)、北京市自然科学基金(批准号:Z190009)、北京市芯片技术高精尖创新中心资助项目,清华大学自主科研项目

依据拓扑电荷的定义：

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

\mathbf{m} 为约化磁矩矢量，可以发现斯格明子具有整数拓扑电荷^[4]，这正是斯格明子拓扑属性的物理起源。需要特别指出的是，尽管涡旋状和奈耳状斯格明子空间构型不同，它们具有等价的拓扑电荷。由于准粒子特性以及自身的拓扑保护，斯格明子在运动过程中不会受到样品缺陷和杂质的影响，因而极易受到外加电流驱动，从而可以被用来作为低能耗自旋器件中信息的优良载体^[4, 6-8]。同时，传导电子与斯格明子空间磁矩之间的相互作用，而产生出丰富的拓扑量子输运现象，譬如拓扑霍尔效应(topological Hall effect)^[9]、新兴磁电动力学(emerging magneto-electrodynamics)^[10]、斯格明子霍尔效应(skyrmion Hall effect)^[11-13]、拓扑能斯特效应(topological Nernst effect)^[14]等等。

因此，探究斯格明子新材料体系，相关拓扑物理和原型器件已成为当下凝聚态领域内的研究

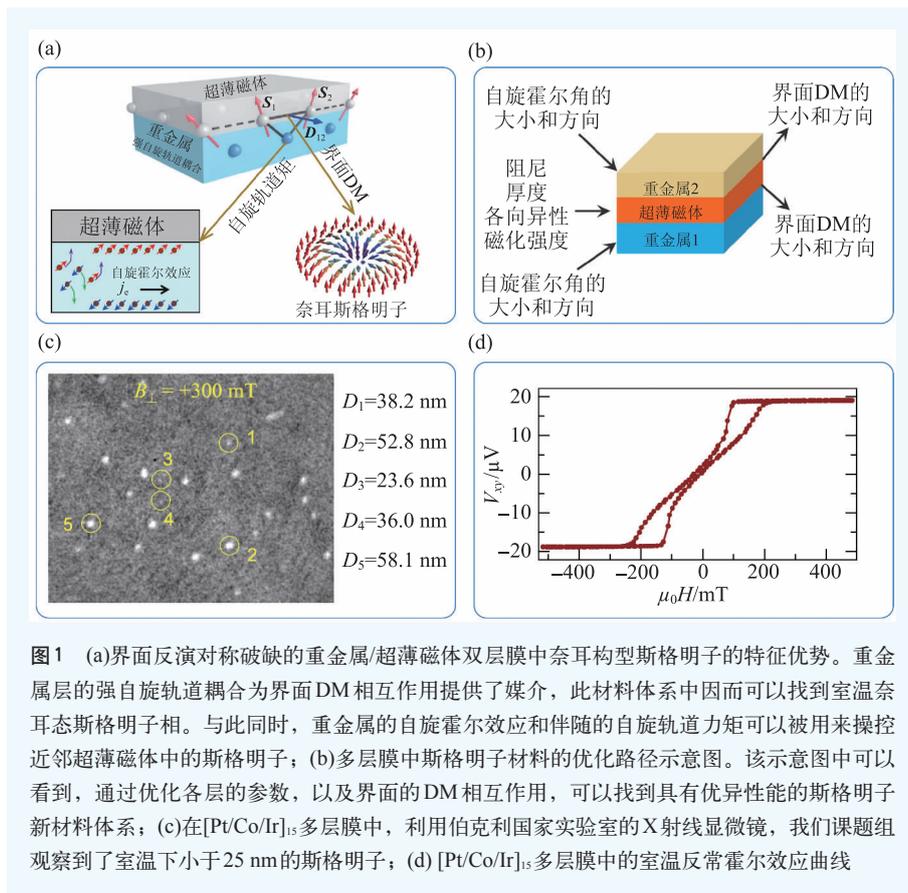
热点之一。相关综述文章也有很多，若读者有兴趣进行深入阅读和研究，可参阅以下文献[1, 4, 5, 15-25]。本文仅针对磁性多层膜中的斯格明子相关研究，块体材料中的涡旋状斯格明子^[4]和复合材料中人工斯格明子^[26, 27]可以参考其他文献。将主要讨论如下几个问题：(1)如何实现具有优化性能的室温斯格明子材料体系；(2)多层膜中的拓扑输运；(3)斯格明子的表征、操控和探测技术。同时由于笔者专业知识有限，若讨论过程中有不足和遗漏，敬请读者批评指正。

2 具有优越性能的室温斯格明子多层膜体系

德国汉堡大学 Roland Wiesendanger 研究组在多层膜中的斯格明子方面做出了许多重要工作^[28-31]。通过分子束外延生长出界面反演对称破缺的重金属/超薄磁性薄膜，利用原位自旋极化扫描隧道显微镜成像技术，在 4.2 K 的低温以及

1.4 T 的磁场环境下，他们在 Ir/Fe/Pd 体系中发现了 5 nm 大小的奈耳态斯格明子。通过调控 Fe 的厚度，进一步发现了约为 0.5 nm 的奈耳态斯格明子。这些薄膜体系中，斯格明子尽管需要低温和强磁场环境才能被稳定，但亚 5 nm 的尺寸也印证了斯格明子在面向未来高密度存储器件的应用前景。该类材料中的重金属层，在提供界面 DM 相互作用的同时，也能通过自旋霍尔效应，产生自旋轨道矩，进而实现电学操控斯格明子^[32, 33]。该特征优势总结在图 1(a)中。

在具有界面反演对称



破缺的重金属/超薄磁性薄膜/不同重金属多层膜中,不但能实现增强的DM相互作用,从而找到室温下,甚至无外场,亚100 nm尺度的斯格明子^[7, 28-30, 34-40]。图1(b)所示为该磁性多层膜的结构示意图,通过调节不同层的物理特性和参数,以及层间的DM相互作用,笔者认为这可能是优化此类材料的指导方针。前期的工作中,美国麻省理工学院的Geoffrey Beach教授课题组^[41]和法国CNRS的Albert Fert教授课题组^[38]分别独立证明了这种思路的可行性。譬如利用Pt/Co(DM相互作用大小约为1.4 mJ/m²)以及Ir/Co(DM相互作用大小约为1.0 mJ/m²)这两个界面的相反的DM相互作用,将它们放在超薄Co薄膜上下两个相反的界面,则可以增强有效的DM相互作用,从而找到室温下约50 nm大小的斯格明子。通过进一步优化不同层薄膜的厚度,我们课题组也在同类材料[Pt/Co/Ir]₁₅多层膜中,观察到室温下尺寸小于25 nm的斯格明子,如图1(c)所示。对[Pt/Co/Ir]₁₅多层膜进行反常霍尔效应测量后,可以看到标准的奈耳构型斯格明子回线(其形状与磁滞回线几乎完全相同),如图1(d)所示。在[Pt/Co/Ir]₁₅多层膜中,尽管斯格明子的尺寸已经普遍小于50 nm,但其霍尔效应曲线却没有表现出手性磁体中的特征拓扑霍尔信号。在接下来的拓扑物理部分中,我们会开展详细讨论。

通过将具有相反自旋霍尔角的材料沉积在超薄磁体的上下两个表面,可以增强自旋轨道矩。譬如在[Pt/Co/Ta]₁₅和[Pt/Co/W]₁₅的磁性多层膜中,由于Pt(+10%)与Ta/W(≈-20%)的自旋霍尔角符号相反,此类材料体系中的斯格明子,理论上具有更低能耗的潜能。需要指出的是,利用自旋轨道矩操控的过程中,由于电流不需要流经超薄铁磁体,自旋轨道矩这一操控手段甚至可以用来研究磁性绝缘体中的斯格明子^[42]。

综合考虑磁性层的一些重要材料参数:阻尼、厚度、各向异性以及饱和磁化强度等,多层膜材料还有很大的优化空间。磁性层的阻尼、厚度和饱和磁化强度的减小均可以增强自旋轨道矩。各向异性的增强可以产生更小尺度的斯格明

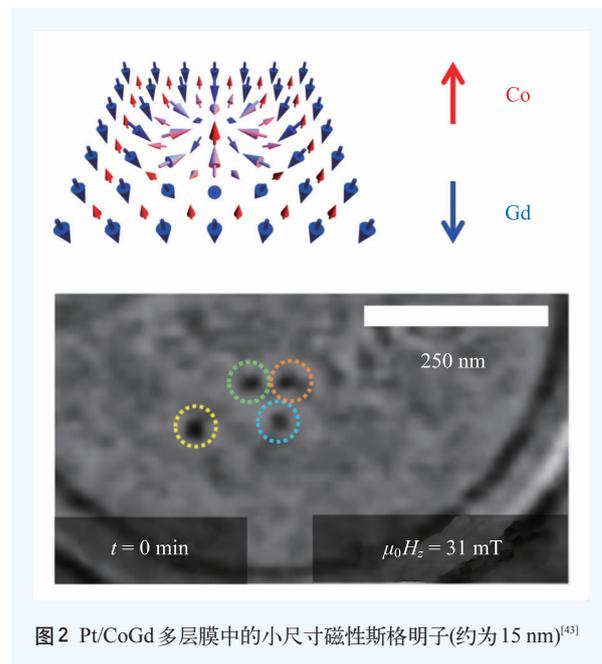


图2 Pt/CoGd 多层膜中的小尺寸磁性斯格明子(约为15 nm)^[43]

子。但以[Pt/Co/Ir]₁₅这一广泛研究的多层膜为例,尽管表现出增强的DM相互作用,Co自身的磁阻尼约为0.2,因此具有较大的临界电流,这也是Co基多层膜中的普遍问题。若采用非晶CoFeB为磁性层,尽管阻尼和临界电流均会下降,但斯格明子的尺寸却增加到100 nm左右。若将铁磁薄膜(Co或CoFeB)用亚铁磁薄膜(CoGd或CoTb)取代^[43],利用3d过渡金属与4f稀土元素之间的反铁磁相互作用以及增强的各向异性,可以实现室温下约为15 nm的亚铁磁斯格明子,如图2所示。但亚铁磁材料同样具有较大的阻尼,且其磁化强度有较强的温度依赖关系,斯格明子的热稳定性因而也会降低。

界面DM相互作用是稳定奈耳构型斯格明子的决定性因素,但其物理起源准确图像尚不完全清楚,比较认可的是它的大小和方向可能跟3d和5d过渡族金属的界面自旋轨道耦合能相关^[44]。在未来的研究中,通过第一性原理计算,找出不同材料体系中的界面自旋轨道耦合能,为斯格明子磁性多层膜的优化提供理论帮助和指导。同时,最近在石墨烯/Co双层膜中发现了奈耳构型的自旋结构,这类手性自旋结构被认为与界面的Rashba效应相关^[45]。与其他拓扑量子材料,甚至超导材料的结合,可能会给

未来斯格明子研究提供新的契机,以拓扑绝缘体为例,其自旋极化的表面态^[46]可以用来更高效地操控斯格明子。

3 斯格明子磁性多层膜中的拓扑物理

斯格明子的一个拓扑属性来源于其拓扑电荷。由于传导电子与斯格明子空间磁矩之间的相互作用,手性磁体(FeGe、MnSi)的霍尔曲线中包含三项:正常霍尔效应,反常霍尔效应以及拓扑霍尔效应^[4, 47]。在很多材料中,都能看到“类拓扑霍尔效应”的信号,简单用此类输运信号来作为斯格明子存在的判据,目前还存在一些争议^[48]。这类信号是否与斯格明子相关,可以结合斯格明子运动过程中所衍生的新兴磁电动力学来进行验证^[4, 10]。这起源于在不同电流密度的驱动下,斯格明子运动所产生的磁电响应会抑制拓扑霍尔

效应。以[Pt/Co/Ir]₁₅多层膜为例,尽管斯格明子尺度上已经普遍小于50 nm,但原始霍尔效应曲线上,没有看到类似块体手性磁体中的拓扑霍尔特征曲线,如图1(d)所示。由于自旋极化强度未知,拓扑霍尔电压的量级在磁性多层膜中也不完全清楚,通过研究单个亚100 nm斯格明子的反常霍尔输运和理论计算, Davide Maccariello等发现拓扑霍尔效应的贡献微乎其微^[49]。

由于斯格明子是一种具有拓扑属性的准粒子,其本身在运动过程中也会呈现出类似霍尔效应的现象。譬如笔者在Ta/CoFeB/TaO_x体系中,通过研究自旋轨道矩与具有不同拓扑电荷($Q=\pm 1$)的斯格明子之间的依赖关系,观测到了由马格努斯力(magnus force)引起的斯格明子霍尔效应以及斯格明子堆积现象^[12, 13, 50],如图3所示。同样需要指出的是,尽管Ta/CoFeB/TaO_x多层膜中能看到明显的斯格明子霍尔效应,它的霍尔电压曲线却与图1(d)非常类似,仍然不包含任何特征拓扑霍尔信号。由于马格努斯力的影响,斯格明子在高速运动过程中会与器件边界产生强烈的偶极相互作用,导致斯格明子自旋结构失稳甚至湮灭^[51]。同时,斯格明子在运动过程中,由于磁阻尼和类场自旋轨道矩(field-like torque)的影响,会发生一定的形变,导致丰富的动力学效应^[13]。这些现象均会影响斯格明子的动力学,以及相关器件的稳定性。由于马格努斯力以及斯格明子的霍尔效应会在亚铁磁^[52]、反铁磁^[53]和人工合成反铁磁材料^[54-57]中部分或完全抵消,因而这些材料目前已受到较大关注。其他准粒子(磁振子、光子等)与斯格明子的相互作用,也会衍生出拓扑输运现象,譬如磁振子的拓扑霍尔效应等等。

4 斯格明子的表征、操控和探测技术

斯格明子的精确表征、操控和探测是理解拓扑物理和制备自旋存储器件所必须要解决的几个关键问题。利用具有极低温强磁场环境的自旋极化扫描隧道显微镜,已经发现了5 nm大小的奈耳态斯格明子,通过自旋极化电流的局域注入,也

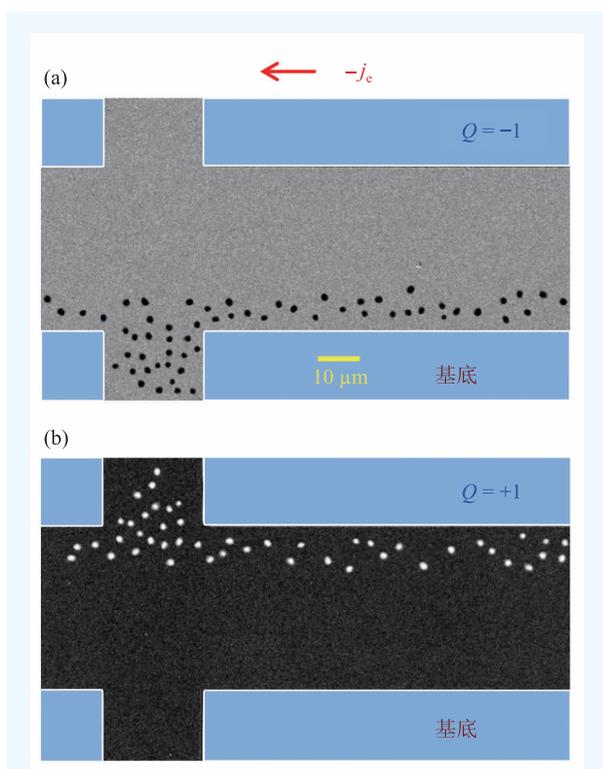


图3 斯格明子霍尔效应的实验观测。由于斯格明子在运动过程中会受到马格努斯力的影响,表现出宏观的斯格明子堆积效应。改变外加磁场的方向就改变了拓扑电荷符号,可以看到斯格明子的堆积反向,这非常类似于传统空穴和电子所体现出的霍尔效应

实现了单个斯格明子的生成和擦除，采用拓扑隧穿电阻效应，还能成功读取出单个奈耳斯格明子。由于自旋极化扫描隧道显微镜工作环境苛刻，且对样品表面质量要求极高，此部分中，我们将讨论在室温下工作的相关技术。

多层膜斯格明子的表征研究中，应用较多的是磁光克尔效应显微镜、磁力显微镜、洛伦兹透射电子显微镜、自旋极化扫描隧道显微镜、自旋极化低能电子显微镜、基于同步辐射的光发射电子显微镜等其他成像技术。这些技术在斯格明子研究中的详细讨论可参见综述文章[20]。磁光克尔显微镜尽管能提供多样化的样品环境，但不能提供高的空间分辨率，因此不能用来研究小尺寸的斯格明子。磁力显微镜也不能提取出奈耳构型的信息。自旋极化扫描隧道显微镜需要极低温和强磁场的工作环境，自旋极化低能电子显微镜不能外加磁场^[58]，同时这两种手段对薄膜表面质量要求非常高，一般需要原位分子束外延技术制备的高质量单晶薄膜。光发射电子显微镜可以达到10 nm的空间分辨率，通过旋转样品与入射X射线的相对夹角，可以得到奈耳构型斯格明子面内磁矩的分布，同时也能施加一定大小的外磁场^[39]。在涡旋状斯格明子材料的研究中，广为采用的是洛伦兹透射电子显微镜。拓展该技术到磁性多层膜中，在不偏转样品的条件下，不能探测到任何磁性衬度。偏转样品可以帮助确定斯格明子的大小，但仍不能确定斯格明子的手性^[59]。借助于高分辨扫描式洛伦兹电子显微镜，我们课题组尚未发表的工作表明可以得到奈耳构型斯格明子的手性信息。由于偶极相互作用的影响，在 $[\text{Ta}/\text{CoFeB}/\text{MgO}]_{16}$ 的多层膜中，层与层之间的磁结构甚至都不一样，形成了复杂的三维结构，如图4所示。另外，这种三维磁结构与界面DM相互作用的大小也有一定的依赖关系^[60, 61]。而大多数成像手段都仅对表面磁性层的磁结构敏感，因此多层膜中奈耳斯格明子的三维磁结构的准确图像还是一个有挑战性的课题，仍需要深入的研究。

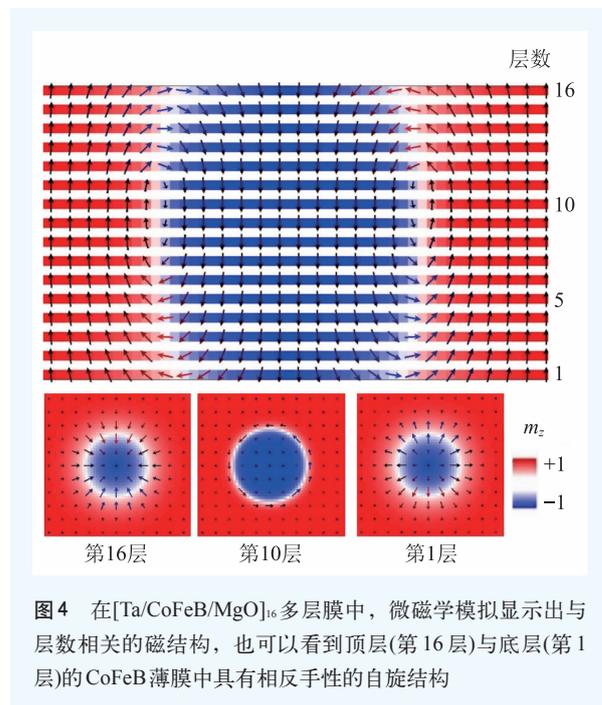


图4 在 $[\text{Ta}/\text{CoFeB}/\text{MgO}]_{16}$ 多层膜中，微磁学模拟显示出与层数相关的磁结构，也可以看到顶层(第16层)与底层(第1层)的CoFeB薄膜中具有相反手性的自旋结构

多层膜中斯格明子可以利用电流^[8, 62-66]、电场^[67-69]、超快激光脉冲^[70]、热学^[71]以及磁力显微镜针尖^[72]等方式来进行操控。在金属材料体系，研究比较多的是利用空间分布不均匀电流产生的自旋轨道矩，作用在畴壁^[8, 73]、器件边界或者缺陷处^[62, 64, 66]，从而产生出斯格明子。这是由于样品边界和缺陷处，能量势垒较低，斯格明子较为容易产生。利用外加电场同样可以降低能量势垒，实现斯格明子的可控产生、移位和擦除。该方法从能量上讲更具有优势^[67-69]，但目前已报道的实验研究工作还不是很多。利用温度和温度梯度实现斯格明子的产生和操控的实验研究尚未见报导。这种方法可以推广用来产生和调控绝缘体中的斯格明子。同时斯格明子与温度或者温度梯度的结合，也有可能促进自旋热动力学、磁振子学的发展。

若材料体系的磁各向异性性能较低，且与随机热涨落所提供的热激发能相比拟时，斯格明子在宏观薄膜材料中会表现出类似布朗运动的行为。通过研究不同温度下斯格明子布朗运动的扩散系数，可以验证爱因斯坦关系是否可以用来表征这种具有拓扑属性的准粒子。Jakub Zázvorka等认为，还可以据此制备信号重组器(reshuffler)，用

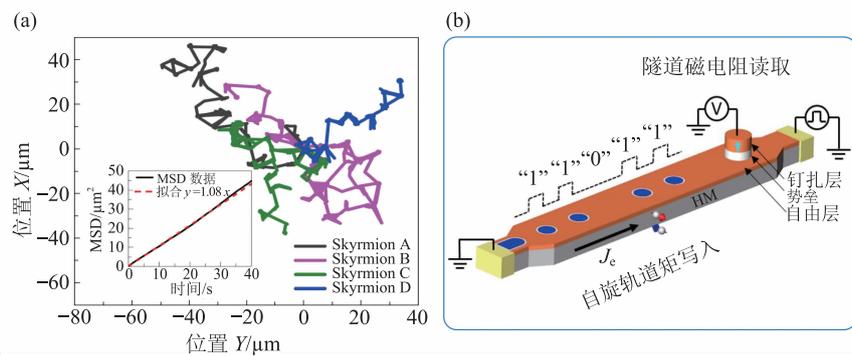


图5 (a) 斯格明子布朗运动的随机轨迹图^[74]; (b) 基于隧道磁电阻效应探测斯格明子的赛道存储器件示意图^[75]

以进行概率计算(probabilistic computing)^[74]。基于斯格明子的拓扑电荷($Q=\pm 1$)，由于马格努斯力的影响，笔者认为未来应该还能看到跟拓扑电荷 Q 相关的旋转布朗运动现象。

斯格明子的赛道器件原理清晰：一个斯格明子对应一个数据单元，其有无分别对应二进制基本数据信息1和0，利用自旋轨道矩可进行写入操作。利用霍尔电压或隧道磁电阻对数据进行读出。在纳米级的霍尔器件中，单个斯格明子可以利用霍尔电压(或电阻)信号实现读取，但该电阻值约为 $30 \text{ n}\Omega \text{ cm}$ ，不具备应用前景^[49]。结合隧

道磁电阻效应探测斯格明子的技术^[75]，如图5(b)所示，目前国内众多课题组都在开展探索性的研究。

5 总结与展望

利用多样化的自旋相关成像技术，在室温、零磁场、低阻尼因子、高效自旋轨道矩、小尺寸斯格明子这些基础研究方面取得了很多

进展。基于这些小尺寸斯格明子，也发现了许多拓扑自旋输运现象。利用电流、电场、超快激光脉冲等方式，已经能产生、操控斯格明子。但其精准写入和擦除目前还面临一定的技术困难。同时斯格明子的电学探测技术以及微纳米原型器件的设计和制备目前还有较大的技术瓶颈，未来还需要加大探索的力度。

致谢 感谢课题组成员王子东博士、周恒安博士、许腾博士、郭明华博士、赵乐等在相关科研题目中的辛勤付出，感谢众多合作者提供的帮助。

参考文献

- [1] Soumyanarayanan A *et al.* Nature, 2016, 539: 509
- [2] Moriya T. Physical Review, 1960, 120: 91
- [3] Braun H B. Advances in Physics, 2012, 61: 1
- [4] Nagaosa N *et al.* Nature Nanotechnology, 2013, 8: 899
- [5] Frances H *et al.* Review of Modern Physics, 2017, 89: 025006
- [6] Jonietz F *et al.* Science, 2010, 330: 1648
- [7] Fert A *et al.* Nature Nanotechnology, 2013, 8: 152
- [8] Jiang W *et al.* Science, 2015, 349: 283
- [9] Neubauer A *et al.* Physical Review Letters, 2009, 102: 186602
- [10] Schulz T *et al.* Nature Physics, 2012, 8: 301
- [11] Kong L Y *et al.* Physical Review Letters, 2013, 111: 067203
- [12] Jiang W *et al.* Nature Physics, 2017, 13: 162
- [13] Litzius K *et al.* Nature Physics, 2017, 13: 170
- [14] Shiomi Y *et al.* Physical Review B, 2013, 88: 064409
- [15] 丁贝等. 物理, 2017, 47: 15
- [16] 张志东. 物理学报, 2015, 64: 067503
- [17] Everschor-Sitte K *et al.* Journal of Applied Physics, 2014, 115: 172602
- [18] Fert A *et al.* Nat. Rev. Mater., 2017, 2: 17031
- [19] Finocchio G *et al.* J. Phys. D: Appl. Phys., 2016, 49: 423001
- [20] Jiang W *et al.* Physics Reports-Review Section of Physics Letters, 2017, 704: 1
- [21] Jiang W *et al.* AIP Advances, 2016, 6: 055602
- [22] Kang W *et al.* Proc. IEEE, 2016, 104: 2040
- [23] Hoffmann A *et al.* Physical Review Applied, 2015, 4: 047001
- [24] Reichhardt C *et al.* Physical Review Letters, 2015, 114: 217202
- [25] Everschor-Sitte K *et al.* Journal of Applied Physics, 2018, 124: 240901
- [26] Li J *et al.* Nature Communications, 2014, 5: 4704
- [27] Miao B F *et al.* Physical Review B, 2014, 90: 174411
- [28] Heinze S *et al.* Nature Physics, 2011, 7: 713
- [29] Romming N *et al.* Science, 2013, 341: 636
- [30] Romming N *et al.* Physical Review Letters, 2015, 114: 177203
- [31] Hsu P J *et al.* Physical Review Letters, 2016, 116: 017201

- [32] Liu L Q *et al.* Science, 2012, 336:555
 [33] Hoffmann A. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49:5172
 [34] Bogdanov A N *et al.* Physical Review Letters, 2001, 87:037203
 [35] Bode M *et al.* Nature, 2007, 447:190
 [36] Sampaio J *et al.* Nature Nanotechnology, 2013, 8:839
 [37] Woo S *et al.* Nature Materials, 2016, 15:501
 [38] Moreau-Luchaire C *et al.* Nature Nanotechnology, 2016, 11:444
 [39] Boulle O *et al.* Nature Nanotechnology, 2016, 11:449
 [40] He M *et al.* Applied Physics Letters, 2017, 111:202403
 [41] Woo S *et al.* Nature Materials, 2016, 15:501
 [42] Ding S *et al.* Physical Review B, 2019, 100:100406(R)
 [43] Caretta L *et al.* Nature Nanotechnology, 2018, 13:1154
 [44] Yang H *et al.* Physical Review Letters, 2015, 115:267210
 [45] Yang H *et al.* Nature Materials, 2018, 17:605
 [46] Fan Y *et al.* Nature Materials, 2014, 13:699
 [47] Neubauer A *et al.* Physical Review Letters, 2009, 102:186602
 [48] Matsuno J *et al.* Science Advances, 2016, 2:e1600304
 [49] Maccariello D *et al.* Nat. Nanotechnol., 2018, 13:233
 [50] Woo S *et al.* Nature Communications, 2018, 9:959
 [51] Zhang X C *et al.* Scientific Reports, 2015, 5:7643
 [52] Woo S *et al.* Nature Communications, 2018, 9:959
 [53] Barker J *et al.* Physical Review Letters, 2016, 116:147203
 [54] Zhang X *et al.* Nature Communications, 2016, 7:10293
 [55] Legrand W *et al.* Nat. Mater., 2020, 19:34
 [56] Dohi T *et al.* Nat. Commun., 2019, 10:5153
 [57] Gomonay O *et al.* Nature Physics, 2018, 14:213
 [58] Chen G *et al.* Advanced Materials, 2015, 27:5738
 [59] Benitez M J *et al.* Nature Communications, 2015, 6:8957
 [60] Li W *et al.* Adv. Mater., 2019, 31:1807683
 [61] Legrand W *et al.* Science Advances, 2018, 4:0415
 [62] Büttner F *et al.* Nature Nanotechnology, 2017, 12:1040
 [63] Hrabec A *et al.* Nature Communications, 2017, 8:15765
 [64] Iwasaki J *et al.* Nature Nanotechnology, 2013, 8:742
 [65] Yu G Q *et al.* Nano Letters, 2016, 16:1981
 [66] Legrand W *et al.* Nano Letters, 2017, 17:2703
 [67] Hsu P J *et al.* Nature Nanotechnology, 2017, 12:123
 [68] Ma C *et al.* Nano Letters, 2019, 19:353
 [69] Schott M *et al.* Nano Letters, 2017, 17:3006
 [70] Je S G *et al.* Nano Letters, 2018, 18:7362
 [71] Lin S Z *et al.* Physical Review Letters, 2014, 112:187203
 [72] Zhang S *et al.* Applied Physics Letters, 2018, 112:132405
 [73] Zhou Y *et al.* Nature Communications, 2014, 5:4652
 [74] Zázvorka J *et al.* Nature Nanotechnology, 2019, 14:658
 [75] Yu G *et al.* Nano Letters, 2017, 17:261

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
 ——<物理>四十年集萃》

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科南南路支行

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

户名：中国科学院物理研究所
 帐号：11 250 1010 4000 5699
 (请注明《物理》编辑部)
 咨询电话：010-82649029；82649277
 Email: physics@iphy.ac.cn

