

电调控磁拓扑的实现*

韦文森¹ 吴耀东^{1,2} 汤进^{1,†}

(1 中国科学院强磁场科学中心 极端条件凝聚态物理安徽省重点实验室 合肥 230031)

(2 合肥师范学院 物理与材料工程学院 合肥 230601)

2021-08-26收到

† email: tangjin@hmf.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20211005

作为数学的一个重要分支,拓扑学主要研究空间在连续形变下的拓扑不变性。拓扑磁性是研究磁性材料中自旋的整体排列在空间具有某些不变性的学科,一般用磁性拓扑荷来描述(topological charge Q)。磁性拓扑荷表征一个磁结构的磁矩分布状态映射到一个序参量空间(通常为一个单位布洛赫球)时环绕序参量空间的次数。当环绕次数为1时($Q=1$),该磁结构具有拓扑非平庸特性。当环绕次数为0时($Q=0$),磁结构具有拓扑平庸特性^[1, 2]。具有不同拓扑荷的磁结构不可以通过磁矩连续变化实现相互转换,因此具有拓扑保护特性。如何破坏这种拓扑保护特性,实现磁拓扑态的可调控性是新型拓扑磁结构研究领域中的热点。

在中心对称晶体 Fe_3Sn_2 纳米结构中,存在两种局域磁结构^[4-6]:拓扑荷为1的非平庸斯格明子磁泡(magnetic skyrmion bubble, 简称斯格明子)和拓扑荷为0的平庸磁泡(magnetic bubble)。可以从图1直观地看到拓扑荷为1的磁斯格明子和拓扑荷

为0的磁泡在磁矩排列分布上的区别。磁泡不同于斯格明子的地方在于靠近中间区域的磁矩分布有部分反转,指向了外磁场在平面分量的方向,使得其拓扑数为0,因此磁泡的洛伦兹模拟衬度图显示出哑铃状,明显区别于磁斯格明子的涡旋状。由于磁斯格明子与磁泡的拓扑荷不同,它们在电流驱动下的动力学行为如斯格明子霍尔效应和电探测下的拓扑霍尔效应完全不同。如果它们同时作为器件的信息载体,有望丰富拓扑磁电子学器件的设计。在前期研究中,我们提出了一种新型斯格明子—磁泡存储器方案,即用磁斯格明子和磁泡分别代表数据存储的二进制信息比特“1”和“0”进行编码,并在 Fe_3Sn_2 纳米条带中实现了单磁斯格明子—磁泡链^[7];通过调节面内磁场,我们进一步实现了 Fe_3Sn_2 纳米盘中单斯格明子—磁泡之间的拓扑磁转变^[8]。基于磁拓扑发展出了一门新兴学科:拓扑磁电子学。拓扑磁电子学的关键科学和技术问题是信息载体的选择、操控与电探测,分别对应科学探索过程中的磁拓扑态的发现、电操控磁拓扑态的动力学和磁拓扑态的磁电信号转变。磁斯格明子和磁泡两类磁状态之间的拓扑磁转变可以用于实现器件中数据的写入和删除等功能,但以前文献报道的磁场操控磁拓扑态的方法并不兼容于当代和未来电子学器件的设计和应用,还需要进一步开发在微纳米器件中实现电学操控拓扑磁转变的方法。

为了实现电操控拓扑磁转变,我们利用聚焦离子束技术制备了 Fe_3Sn_2 纳米条带电学微器件样品,利用先期自主开发的电学测量系统,结合洛伦兹透射电子显微镜,研究了纳秒脉冲电流驱动下两种不同磁拓扑态的原位实时磁动力学行为。实验过程中,如果设置斯格明子晶格为初始态,

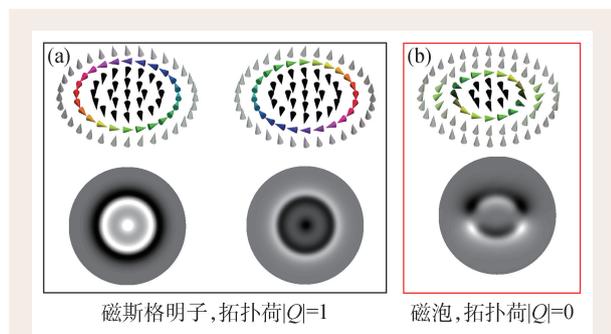


图1 磁斯格明子和磁泡示意图^[3] (a)右旋和左旋磁斯格明子示意图及其对应的洛伦兹模拟衬度,虽然不同旋向斯格明子的磁衬度不同,但它们的拓扑荷等价;(b)磁泡示意图及其洛伦兹模拟衬度

* 国家自然科学基金(批准号:11804343, 11904368)资助项目

通入高密度电流后，磁斯格明子晶格迅速转变为磁泡晶格；如果我们再次切回到低密度电流，磁泡晶格则缓慢地转化为磁斯格明子晶格(图2(b))。这一现象也可以从磁斯格明子和磁泡的数目随着时间/脉冲数目变化的曲线中看到，如图2(a)所示。从图中可以看到，从低电流密度转到高电流密度时，磁泡数目迅速增加(红色曲线)，对应的则是斯格明子数目的迅速减少(蓝色曲线)；当从高电流密度转到低电流密度时，磁泡数目则缓慢地减少，而磁斯格明子数目的增加也较为缓慢。实验结果表明，电流控制磁斯格明子和磁泡之间的拓扑磁转变具有非常好的可逆性和可重复性。

为了揭示电流调控拓扑磁转变的微观机理，我们利用微磁学手段进行了模拟，主要结果如图3所示。在 Fe_3Sn_2 中的磁泡和磁斯格明子都是稳定相，由于拓扑保护特性，它们之间存在一个能量壁垒。磁泡虽然处在高能量状态上，但是由于能量壁垒的存在，使得它依然处在稳定状态上。电流的效应主要有两种：焦耳热效应；自旋转移力矩效应，即电流经过磁性样品，发生自旋极化后与磁性材料进一步发生自旋耦合相互作用。材料中的可控拓扑磁转变可以归因于这两种电流效应结合的综合效果。高电流密度下，电流的焦耳热效应使得体系的饱和磁化强度降低，对应于材料达到饱和铁磁态所需的磁场减小，因此即使在外磁场固定的情况下，焦耳热效应导致能量壁垒变化，磁斯格明子先转变为铁磁态。随后，样品在恢复到室温的过程中饱和磁

化强度增加，尽管磁斯格明子相更为稳定，但由于铁磁态到斯格明子态转变过程中需要越过一个

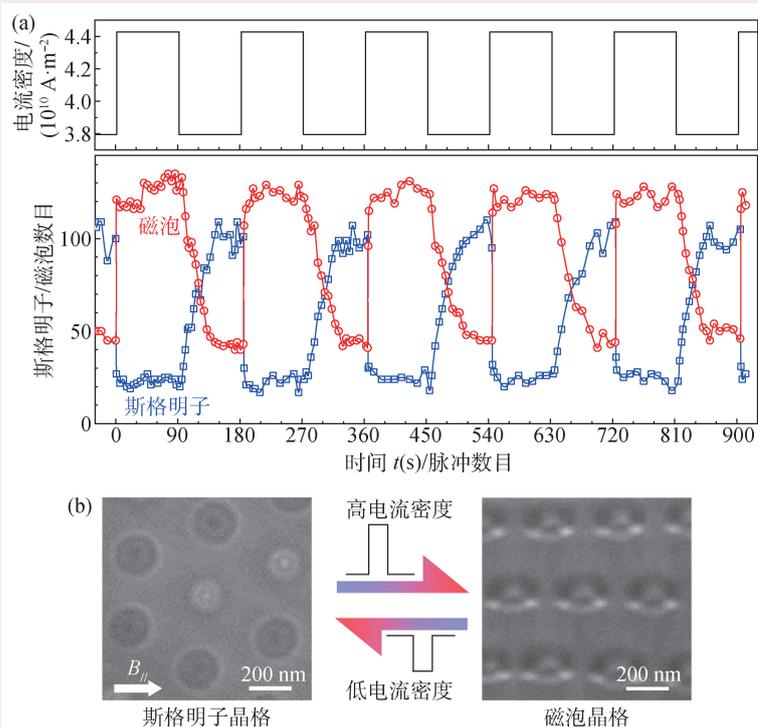


图2 高低电流密度切换过程中实现的斯格明子—磁泡拓扑磁转变现象^[3] (a)电流密度以及对斯格明子、磁泡数目随着时间 t 变化的关系图。实验时，施加在样品上的两个脉冲的电流间隔时间为1 s；(b)斯格明子—磁泡相互转变过程中洛伦兹镜观察到的磁衬度图

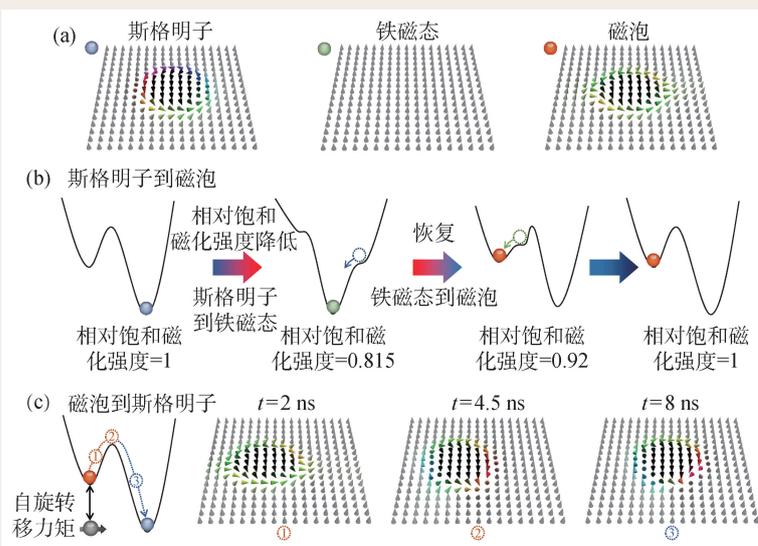


图3 斯格明子—磁泡相互转化的微观机理^[3] (a)斯格明子、铁磁态和磁泡的示意图，它们分别用蓝色、绿色和橙色小球表示；(b)饱和和磁化强度变化导致的斯格明子到铁磁态以及从铁磁态到磁泡的转变过程；(c)自旋转移力矩驱动磁泡到磁斯格明子的转变过程

能量壁垒，而铁磁态到磁泡态的转变过程无额外的能量壁垒，因此铁磁态更倾向于转变为磁泡态。这种焦耳热效应导致的饱和磁化强度变化过程中的磁滞效应能够很好地解释高电流密度下斯格明子到磁泡的转变行为。在低电流密度下，自旋转移力矩作为额外的激发，使得处于平衡态的磁泡发生变形和扭曲从而处于高能量动态非稳定平衡相，因此能够有机会越过磁泡和斯格明子之间的能量壁垒，转变到更低能量的磁斯格明子稳定相，如图3(c)所示。

综上，我们利用电学方法(脉冲电流)实现了拓扑非平庸的磁斯格明子和拓扑平庸的磁泡之间可逆且高度可重复的相互转化，并借助微磁学模拟手段揭示了拓扑磁结构之间相互转变的动力学机制是焦耳热和自旋转移力矩的综合效

应。在 $10^{10} \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 量级的小电流密度下，我们实现了高度可重复且可逆磁拓扑态的电调控，为微纳米结构器件中磁存储的数据写入和删除提供了可能的解决方案，有望推动未来可靠、低能耗和高效率的拓扑自旋电子学器件的研究和开发。该研究成果已于近期在 *Advanced Materials* 上发表^[1]。

参考文献

- [1] Nagaosa N, Tokura Y. *Nat. Nanotechnol.*, 2013, 8: 899
- [2] Wei W S *et al.* *Rare Metals*, 2021, 40: 3076
- [3] Wei W *et al.* *Adv. Mater.*, 2021, 33: 2101610
- [4] Tang J *et al.* *ACS. Nano*, 2020, 14: 10986
- [5] Tang J *et al.* *National Science Review*, 2021, 8: nwa200
- [6] Hou Z *et al.* *Adv. Mater.*, 2017, 29: 1701144
- [7] Wu Y *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118: 122406
- [8] Wu Y *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119: 012402



北京欧普特科技有限公司

Golden WAY SCIENTIFIC 专心/专注/专业

二十年的默默耕耘，风雨兼程，铸就了欧普特人“专心”、“专注”、“专业”的风格和品质，孜孜不倦地对创新和品质的追求，让欧普特具备了全线覆盖低、中、高，超高功率激光光学元件的加工生产和检测能力。伴随中国激光行业的蓬勃发展，欧普特愿与您共同进步，砥砺前行，为中国光电事业的发展进步共同尽一份心力和责任。

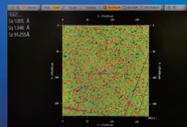
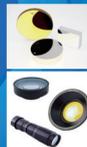
精密光学元件

1. 球面透镜
2. 柱面&非球面透镜
3. 光学棱镜
4. 反射镜(玻璃&金属)
5. 光学窗口
6. 偏振&消偏元件
7. 滤光片
8. 光栅

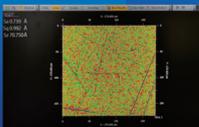


激光器件

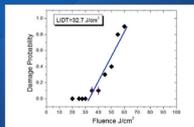
1. 扫描场镜(紫外-红外)
2. 线扫镜头
3. 紫外远心镜头
4. 中继镜
5. 扩束镜



(熔石英基材, 直径50.8mm光学窗口)



(单晶硅基材, 1070nm高反膜)



关注二维码



北京市朝阳区酒仙桥东路
1号M7栋东五层



www.goldway.com.cn
Email: optics@goldway.com.cn



Tel: +86-(0)10-8456 0667
Fax: +86-(0)10-8456 9901