

宽温域跨室温磁斯格明子材料的发现及器件研究

侯志鹏 丁贝 李航 徐桂舟 王文洪 吴光恒

Observation of new-type magnetic skyrmions with extremely high temperature stability and fabrication of skyrmion-based race-track memory device

Hou Zhi-Peng Ding Bei Li Hang Xu Gui-Zhou Wang Wen-Hong Wu Guang-Heng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 137509 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180419

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180419>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2018/V67/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[磁畴壁手性和磁斯格明子的拓扑性表征及其调控](#)

Magnetic domain chirality and tuning of skyrmion topology

物理学报.2018, 67(13): 137508 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.137508>

[强磁场下 Sm-Fe 薄膜不同晶态组织演化及磁性能调控](#)

Evolutions of different crystalline textures in Sm-Fe film fabricated under high magnetic field and subsequent tuning magnetic properties

物理学报.2018, 67(9): 097501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180212>

[耦合电磁场对石墨烯量子磁振荡的影响](#)

The coupled electromagnetic field effects on quantum magnetic oscillations of graphene

物理学报.2016, 65(2): 027502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.027502>

[基于交换作用的纳磁逻辑电路片上时钟结构研究](#)

On-chip clocking for exchange-interaction-based nanomagnetic logic circuits

物理学报.2014, 63(22): 227503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.227503>

[Fe₃O₄ 纳米颗粒/聚二甲基硅氧烷复合材料磁电容效应的研究](#)

Effect of magnetic capacitance in the Fe₃O₄ nanopartides and polydimethylsiloxane composite material

物理学报.2014, 63(5): 057501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.057501>

专题: 磁斯格明子

宽温域跨室温磁斯格明子材料的发现及器件研究*

侯志鹏¹⁾ 丁贝¹⁾²⁾ 李航¹⁾²⁾ 徐桂舟³⁾ 王文洪^{1)†} 吴光恒¹⁾

1) (中国科学院物理研究所, 磁学国家重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (南京理工大学材料学院, 南京 210094)

(2018年3月10日收到; 2018年5月7日收到修改稿)

报道了阻挫型磁体 Fe_3Sn_2 单晶中宽温域跨室温磁斯格明子的发现及其“赛道型”微纳器件的初步探索. 通过合金化设计和实验, 突破晶体取向生长和克服包晶反应两个关键技术难关, 制备出了高质量的 Fe_3Sn_2 单晶. 原位洛伦兹电子显微镜结果表明, 在该材料体系中, 磁斯格明子具有多种拓扑结构, 并可以在一定磁场下相互转化. 基于高质量的 Fe_3Sn_2 单晶, 利用聚焦离子束技术, 进一步制备出了 600 nm 宽并具有磁斯格明子单链排列的“赛道性”微纳器件. 实验结果表明, 该单链磁斯格明子具有极高的温度稳定性: 单个磁斯格明子的尺寸以及相邻两个磁斯格明子之间的距离可以在室温到 630 K 宽温区内保持不变. 宽温域跨室温磁斯格明子材料 Fe_3Sn_2 的发现及单链“赛道型”微纳器件的成功制备, 从材料和器件两个方面推进了磁斯格明子材料的实用化.

关键词: 磁斯格明子, 阻挫型磁体, 室温宽温域, “赛道型”存储器

PACS: 75.75.-c, 75.75.Fk, 75.47.Np

DOI: 10.7498/aps.67.20180419

1 引言

磁斯格明子是一种具有拓扑保护的涡旋磁畴结构单元. 由于它具有拓扑保护性、低驱动电流密度(比驱动传统畴壁低 5—6 个数量级)以及磁场、温度和电场等多物理作用调控的特性, 被认为是未来高密度、高速度、低能耗存储器件的信息载体^[1-5]. 目前, 磁斯格明子多发现于具有非中心对称结构的材料体系中. 在这些材料中, 晶体结构的空对称破缺引入 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI), 同时考虑磁交换相互作用和外磁场的 Zeeman 能, 在一定的温度和磁场范围内便可以形成具有特定手性的磁斯格明子. 现阶段, 具有手性磁斯格明子的材料主要集中于 B20 结构材料体系中, 例如 MnSi ^[6-9], FeGe ^[10,11], Cu_2OSeO_3 ^[12-14]

等. 然而, DMI 与磁交换作用相比普遍较弱, 因此手性磁斯格明子的温度稳定性普遍较差(存在于低温或者稳定存在温区较窄), 极大地限制了其实际应用. 因此, 开发可以在室温宽温区稳定存在的磁性斯格明子是目前磁电子学领域的研究热点, 也是推进磁斯格明子实用化的关键.

最近, 一些课题组研究发现, 磁斯格明子同样可以在具有中心对称晶体结构的材料体系中稳定存在^[15-20]. 在这些材料中, 磁偶极相互作用、铁磁交换作用、轴各向异性以及外磁场的 Zeeman 能之间的相互作用, 同样可以起到稳定磁斯格明子的作用. 在中心对称材料体系中, 磁斯格明子与非中心对称材料中的磁斯格明子具有相同的拓扑结构, 因此它们可以具有一些共同的物理特性, 例如: 斯格明霍尔效应^[21]、拓扑霍尔效应^[20]、低的电流驱动密度^[17]等. 然而, 在中心对称材料中, 磁斯格明

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2017YFA0303202)、国家自然科学基金(批准号: 11604148)和中国科学院重点研究计划(批准号: KJZD-SW-M01)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenhong.wang@iphy.ac.cn

子没有固定的手性, 相比手性斯格明子增加了螺旋和涡旋两个自由度, 这一点与拓扑平庸的磁泡类似, 因此也有人称之为斯格明子磁泡^[18]. 对于斯格明子磁泡, 稳定其存在的几种交换作用一般远大于非中心对称材料中的DMI, 因此一般被认为其比手性斯格明子具有更高的稳定温度和更宽的稳定温区, 非常有希望解决磁斯格明子温度稳定性较差的问题. 近年来, 我们课题组为了解决磁斯格明子温度稳定性较差的问题, 做了一系列系统而深入的研究. 2016年, 我们基于化学键和磁性双调控的思想, 在中心对称六角 MnNiGa 合金中, 首次发现了宽温域跨室温(稳定温度 100—340 K)磁斯格明子(双涡旋结构), 这使得磁斯格明子的温度稳定性显著提高, 有望推进磁斯格明子基“赛道”存储器的应用^[20].

2015年, Leonov 和 Mostovoy^[22]通过计算模拟发现, 在具有轴各向异性的阻挫型磁体中也可以出现磁斯格明子. 更重要的是, Pereiro 等^[23]理论预测发现阻挫型磁体中的磁斯格明子具有更

好的温度稳定性, 极大地激发了人们研究基于阻挫型磁斯格明子“赛道”存储器的兴趣. 然而, 这些研究都集中于理论模拟方面. 本文介绍我们最近通过磁性、输运、洛伦兹电镜测量等实验手段, 首次在六角磁阻挫 Fe₃Sn₂ 单晶中发现宽温域跨室温磁斯格明子以及基于 Fe₃Sn₂ 单晶制备高温稳定性磁斯格明子基“赛道”存储器的相关工作. 在 Fe₃Sn₂ 中, 我们将此前在 MnNiGa 合金中发现的双涡旋磁斯格明子的居里温度从 340 K 提高到 630 K, 这也是迄今为止发现的具有最宽温区(120—630 K)和最高温度稳定存在的磁性斯格明子, 具有更加广泛的应用范围.

2 实验结果与讨论

2.1 阻挫型室温宽温域磁斯格明子材料的发现

Fe₃Sn₂ 合金是一种少有的同时具有较高居里温度(640 K)和阻挫型自旋结构的磁性材料^[24–27].

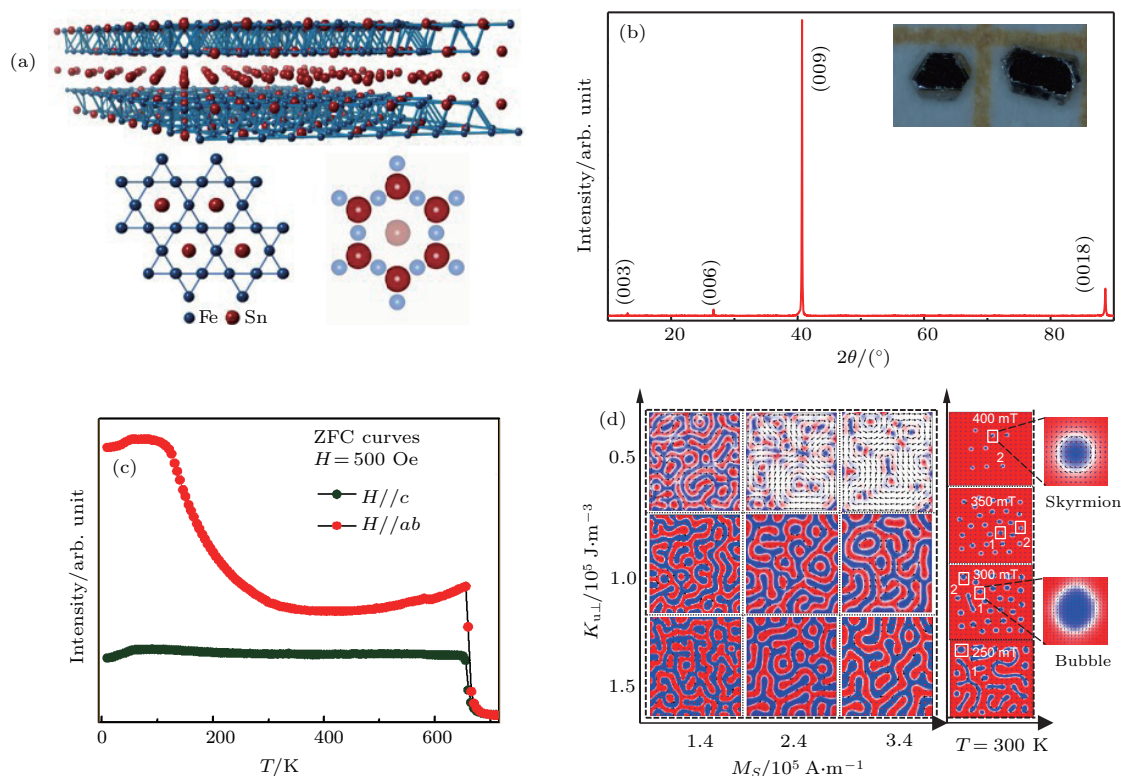


图 1 Fe₃Sn₂ 晶体结构、磁性能、磁畴模拟 (a) Fe₃Sn₂ 结构示意图; (b) Fe₃Sn₂ 单晶样品沿 c 轴的 X 光衍射图; (c) 在 500 Oe 外加磁场下, 沿单晶不同轴向测量得到的磁性随温度的变化曲线; (d) 利用 OOMMF 软件模拟得到的 200 nm 厚 Fe₃Sn₂ 单晶薄片磁畴随轴各向异性常数 $K_{u\perp}$ 、饱和磁化强度和外加磁场的变化

Fig. 1. Crystal structures, magnetic properties, and theoretical stimulations of the frustrated magnet Fe₃Sn₂: (a) The crystal structure of Fe₃Sn₂; (b) the X-ray diffraction pattern with the beam along the *c*-axis; (c) temperature dependence of magnetization with the field-cooling (FC) model in an external magnetic field of 500 Oe between 5 K and 700 K; (d) the magnetocrystalline magnitude $K_{u\perp}$, saturated magnetization M_s , and external magnetic field dependence of magnetic domains by theoretically stimulated.

从晶体结构来看, Sn 原子层和 Fe-Sn 双原子层沿 c 轴方向交替排列成六角晶格, 同时 Fe 原子和 Sn 原子在 ab 面上排列成 kagome 格子. 图 1 (a) 为 Fe_3Sn_2 的晶体结构图. 文献报道的粉末中子衍射 [25] 和本文的磁性测量结果表明 (见图 1 (b)), 接近居里温度时, Fe_3Sn_2 的易磁化轴沿 c 轴方向, 随着温度的降低, 其逐渐向 ab 平面内偏转. 当温度低于 100 K 时, 其自旋变为无序排列, 进入自旋玻璃态 [25–27].

上述结果表明, Fe_3Sn_2 可以在 100–640 K 的极宽温度范围内具有非共线磁结构, 这使其非常有希望在外加磁场下形成具有极高温稳定性磁斯格明子. 我们首先利用高温 Sn 助溶剂方法制备高质量的 Fe_3Sn_2 单晶. 图 1 (c) 是 Fe_3Sn_2 单晶体在光学显微镜下的照片, 可以发现晶体呈薄片状, 并具有光洁的六角面. 通过 X 光衍射, 可以确定六角晶面的法线沿 [001] 方向. 通过能谱分析, 可以确定晶体中 Fe 元素和 Sn 元素的原子比接近 3 : 2, 与理想原子比相符合 [28]. 我们测量了单晶样品电阻率随温度变化的曲线, 经计算得到其剩余电阻比 ($R_{300\text{ K}}/R_{2\text{ K}}$) 高达 70, 这表明 Fe_3Sn_2 晶体具有

非常高的质量. 通过测量在不同温度下沿 Fe_3Sn_2 晶体不同轴的 M - H 曲线, 可以得到与温度相对应的饱和磁化强度 M_s 和轴各向异性常数 K_u . 根据实验获得的参数, 首先利用 OOMMF 软件, 模拟出 Fe_3Sn_2 晶体中的磁畴随轴各向异性常数 K_u 、饱和磁化强度 M_s 以及外加磁场 H 的变化, 如图 1 (d) 所示. 由此发现, 其基态磁畴形态受 M_s 影响较小而与 K_u 大小紧密相关, 最重要的是在本材料中室温下一定磁场下有磁斯格明子出现, 见图 1 (d).

为了进一步验证理论模拟结果, 我们利用聚焦离子束 (FIB) 从高质量的 Fe_3Sn_2 单晶块体中沿 (001) 方向提出长、宽、厚分别为 20 μm , 10 μm , 250 nm 的薄片, 并在室温下利用洛伦兹投射电子显微镜 (LTEM) 对其磁畴随外加磁场的变化进行了观测. 图 2 (a)–(d) 为 Fe_3Sn_2 单晶薄片磁畴随外加磁场变化的 LTEM 图, 其中磁场沿晶体 c 轴方向. 当外加磁场为零时, 样品中出现条状磁畴, 其周期约为 150 nm, 这与另一种中心对称磁体 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.175$) [29] 中条纹畴的周期

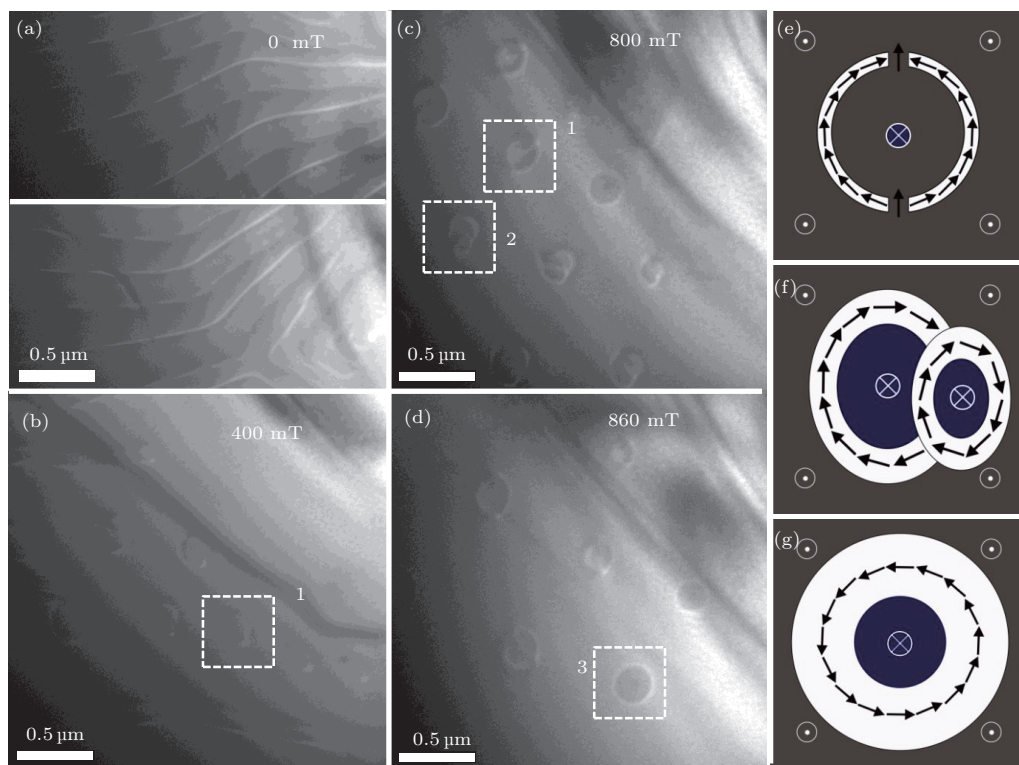


图 2 室温 Fe_3Sn_2 磁畴随磁场的变化 (a)–(d) 分别为在 0 mT, 400 mT, 800 mT, 860 mT 外加磁场下的 LTEM 图片, 白色方框内为具有不同自旋结构的磁泡; (e)–(g) “1”, “2”, “3” 类磁泡对应的自旋结构示意图

Fig. 2. The field dependence of magnetic domains at room temperature. (a)–(d) The LTEM photos under an external magnetic field of 0 mT, 400 mT, 800 mT, 860 mT, respectively. The white boxes represent three types of bubble domains. (e)–(g) The sketches for the spin textures of bubble domains.

相当, 但比 $(\text{Mn}_{1-x}\text{Ni}_x)_{65}\text{Ga}_{35}$ ($x = 0.5$) [19] 中的磁畴宽两倍, 如图 2(a) 所示. 随着外加磁场的增加, 条纹畴的宽度逐渐减小, 同时其末端逐渐收缩成哑铃状, 这些哑铃状的磁畴进一步收缩便可以生成平庸型磁泡. 图 2(b) 即为哑铃状磁畴与平庸型磁泡共存的状态. 随着外加磁场的进一步增加, 哑铃状的条纹畴逐渐消失, 而磁泡数量逐渐增多. 当外加磁场大于 800 mT 时, 条纹畴完全转化为磁泡, 如图 2(c) 和图 2(d) 所示. 通过对不同磁场下的磁泡衬度进行分析发现, 其自旋拓扑结构随磁场的变化而改变. 在图 2(b)—(d) 中, 我们用白色方框标识出了三种具有不同自旋结构的磁泡 (分别用数字“1”, “2”, “3”表示), 其自旋结构示意图分别对应图 2(e)—(g). “1”型磁泡是一种在具有单轴各向异性的铁磁性材料中常见的磁畴结构. 从图 2(e) 可知, 其由两个手性相反的布洛赫畴壁环绕组成, 由于自旋结构不闭合, 所以其拓扑数为 0. 随着外磁场的增加, “1”型平庸型磁泡中一条布洛赫畴壁逐渐收缩形成闭合的自旋结构, 这就是我们所谓的“2”

型非平庸型磁泡. Yu 等 [29] 最近在中心对称磁体 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.175$) 中观测到了同样结构的非平庸型磁泡. 通过对其自旋结构进行分析可以知道其与磁斯格明子具有相同的拓扑数 1. 当磁场增加到 860 mT 时, “2”型非平庸型磁泡中的布洛赫畴壁进一步收缩而形成了“3”型非平庸型磁泡. “3”型非平庸型磁泡具有与手性材料中斯格明子相同的自旋结构, 因此其拓扑数同样为 1. “2”型和“3”型非平庸型磁泡具有相同的拓扑数, 并且我们发现“2”型非平庸型磁泡可以随着外加磁场的增加通过畴壁移动连续变换成“3”型非平庸型磁泡, 因此二者是拓扑同胚的. 通过上述实验结果, 我们证明在中心对称的阻挫型磁体中同样可以产生磁斯格明子, 并可以在室温条件下稳定存在. 更有意思的是, 其并不像手性斯格明子具有单一的自旋结构, 本材料中的斯格明磁泡具有多种拓扑形态并可以随磁场连续发生变化. 我们的结果为深入探索磁斯格明子的形成和稳定机理提供了新的方向.

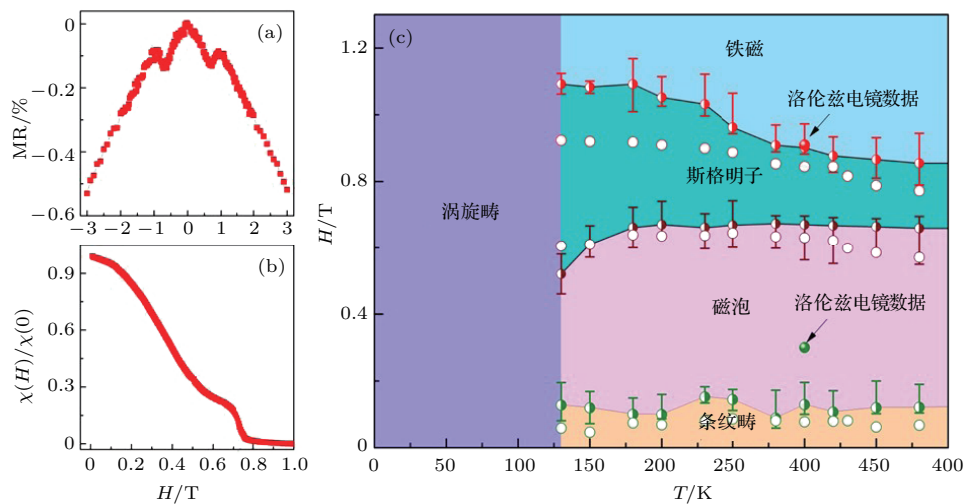


图 3 不同温度下 Fe_3Sn_2 磁畴随磁场变化的相图 (a), (b) 分别为磁电阻 MR 和归一化后的交流磁化率 $\chi(H)/\chi(0)$ 随外加磁场的变化; (c) 不同温度下 Fe_3Sn_2 磁畴随磁场变化的相图
 Fig. 3. (a), (b) The field-dependent magnetoresistance MR and normalized AC-susceptibility $\chi(H)/\chi(0)$ at room temperature, respectively; (c) the phase diagram in the magnetic field versus the temperature plane.

我们进一步通过输运和磁性测量研究了在块体 Fe_3Sn_2 单晶中斯格明子磁泡的形成和湮灭过程. 图 3(a) 和图 3(b) 分别为 Fe_3Sn_2 单晶室温磁电阻和交流磁化率随外加磁场的变化曲线, 其中外加磁场方向垂直于单晶的 ab 平面. 从图中可以看出, 这两条曲线在 200 mT 和 800 mT 附近出现了两个明显的变化峰, 这分别与我们用 LTEM 在 Fe_3Sn_2 单晶薄片观测到的条纹畴-平庸型磁泡转变以及平

庸型磁泡-斯格明子磁泡转变磁场相近, 因此我们认为这两个变化峰可以用来表示条纹畴、平庸型磁泡、斯格明子磁泡之间的相互转化临界点. 当外加磁场高于 900 mT 时, 磁电阻和交流磁化率曲线都趋近于饱和, 这说明 Fe_3Sn_2 中的斯格明子磁泡逐渐被磁化为普通铁磁畴. 进一步在 100—400 K 温度范围内测量了磁电阻和交流磁化率随磁场的变化曲线, 归纳了不同磁畴之间转化时的临界磁场,

并绘制出温度-磁场相图, 如图 3(c) 所示. 由图可知, Fe_3Sn_2 单晶中的磁斯格明子具有极高的温度稳定性, 其可以在 100—400 K 内稳定存在, 这为我们进一步制备具有高温稳定性的磁斯格明子基“赛道”存储器提供了材料基础.

2.2 高温稳定性磁斯格明子基赛道存储器件制备

上述结果表明, Fe_3Sn_2 中的磁斯格明子具有非常好的温度稳定性, 本小节我们将着重介绍利用 FIB 技术, 基于高质量的 Fe_3Sn_2 单晶, 制备具有高温稳定性磁斯格明子基“赛道”存储器件方

面的工作 [30]. 图 4(a)—(e) 是利用 FIB 制备“赛道”存储器的操作示意图, 具体操作步骤见示意图说明部分. 图 4(f) 是“赛道”宽度为 600 nm、厚度为 250 nm 的存储器件扫描电镜图.

为了清楚地看到其结构, 图 4(g) 给出了其在 STEM 模式下的透射电镜图. 由图可知样品有三层结构: 最内层是 600 nm 宽的 Fe_3Sn_2 单晶层, 通过电子衍射可以知道其法线沿 [001] 方向; Fe_3Sn_2 外面两层分别为 C 层和 Pt 层, 这两层不仅可以减少样品在洛伦兹模式下观测时边界处产生的菲涅耳条纹, 同时可以起到在减薄过程中保护 Fe_3Sn_2 层的作用.

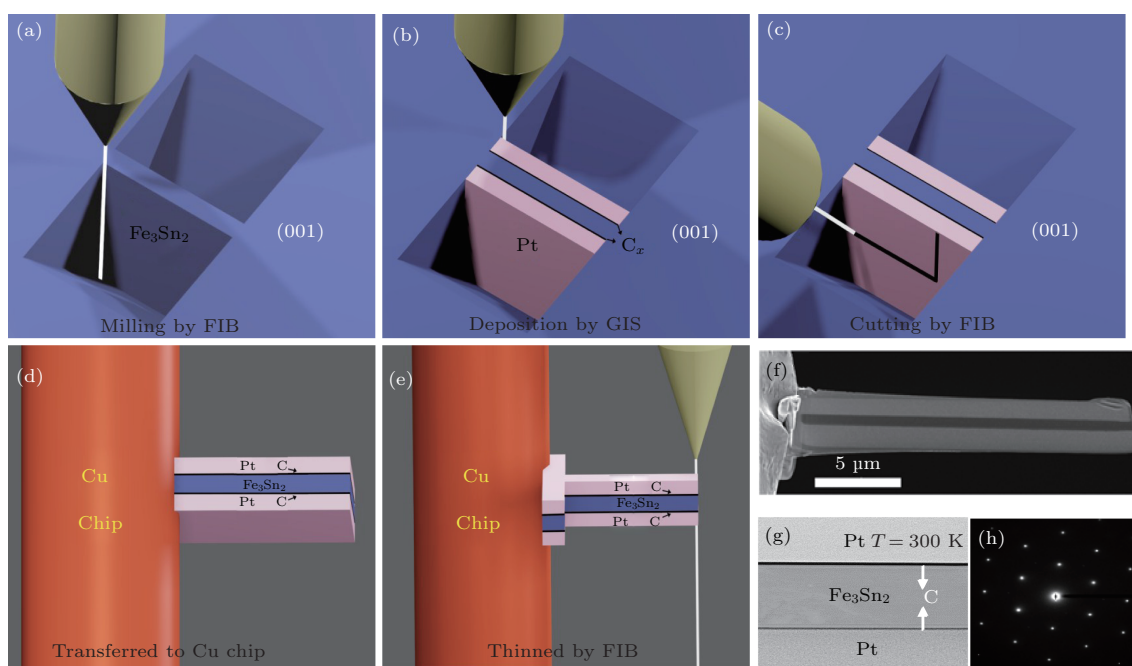


图 4 基于高质量 Fe_3Sn_2 单晶制备“赛道”存储器件 (a)—(e) 利用 FIB 制备“赛道”存储器件流程图; (f) 600 nm 宽、250 nm 厚“赛道”样品的扫描电镜图; (g) “赛道”样品在 STEM 模式下的透射电镜图; (h) “赛道”样品的电子衍射图
 Fig. 4. The fabricating of race-track memory device based on high-quality Fe_3Sn_2 single crystal: (a)–(e) The processes for fabricating the race-track memory device; (f)–(h) the corresponding SEM, STEM, SEAD photos of the nanostructure with width of 600 nm and thickness of 250 nm.

接下来, 我们利用洛伦兹电镜研究了在室温下 600 nm 宽的“赛道”样品, 磁畴随外加磁场的变化, 其变化过程如图 5(a)—(e) 所示. 当加外磁场为零时, 样品中一系列条纹畴沿着“赛道”的长轴方向整齐排列, 其周期为 180 nm, 略大于上面提到的无几何受限样品中条纹畴的周期 150 nm.

随着外加磁场的增大, 条纹畴首先逐渐收缩变窄, 然后在“赛道”的边界处环绕成一个类似于“半斯格明子”的磁畴结构. 当磁场增加至 130 mT

以上时, 这些“半斯格明子”便逐渐从边界处分离出来, 进而收缩成一个完整的斯格明子磁泡. 由于边界自旋与磁斯格明子之间存在排斥力, 磁斯格明子最终会稳定在“赛道”的中间位置并沿其长轴方向呈整齐的单链排列. 进一步通过 OOMMF 软件理论模拟出 600 nm 宽“赛道”样品中磁畴随磁场的变化行为, 如图 5(g)—(j) 所示, 与上面的实验结果完全符合, 这进一步证明了我们实验结果的合理性.

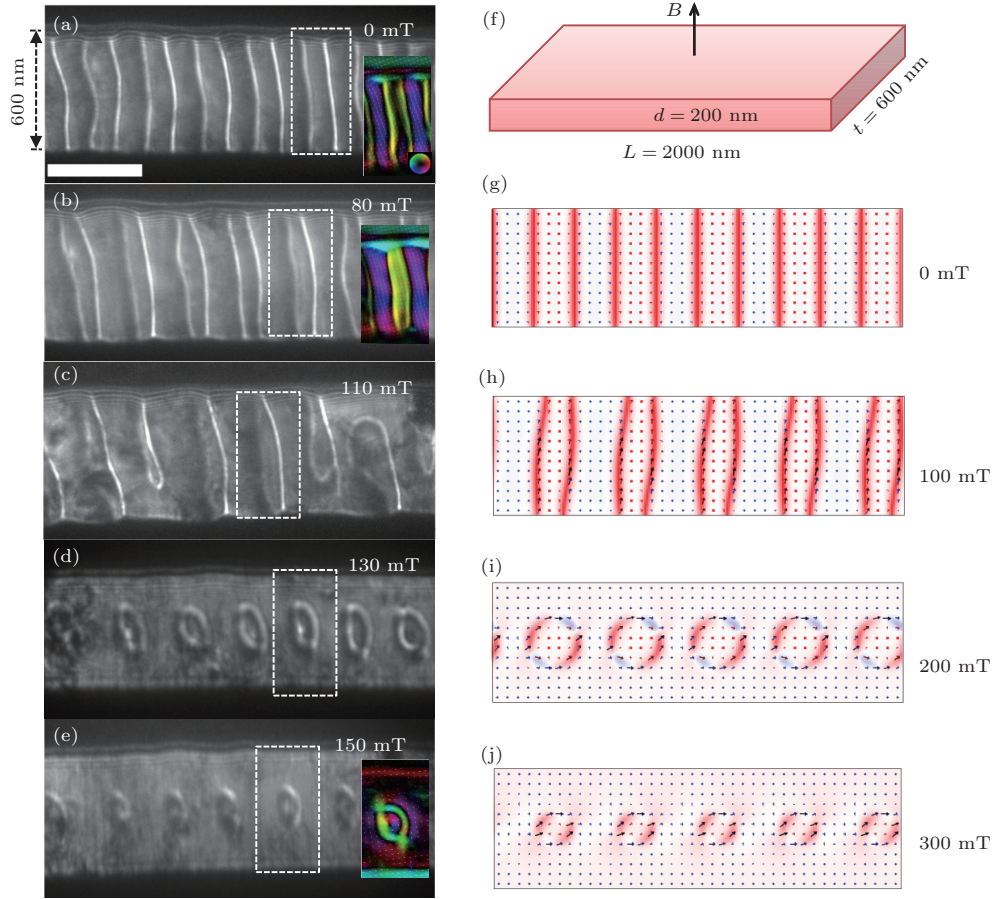


图5 600 nm宽“赛道”样品中磁畴随外加磁场的变化及微磁学模拟 (a)–(e) 600 nm宽赛道样品中磁畴随外加磁场的变化; (f) 微磁学模拟所建立的模型; (g)–(j) 利用微磁学模拟的600 nm宽“赛道”样品中磁畴随外加磁场的变化
 Fig. 5. (a)–(e) The field dependence of magnetic domains at room temperature; (f) the model used for OOMMF stimulation; (g)–(j) simulation of the evolution of the skyrmion bubbles under different magnetic fields.

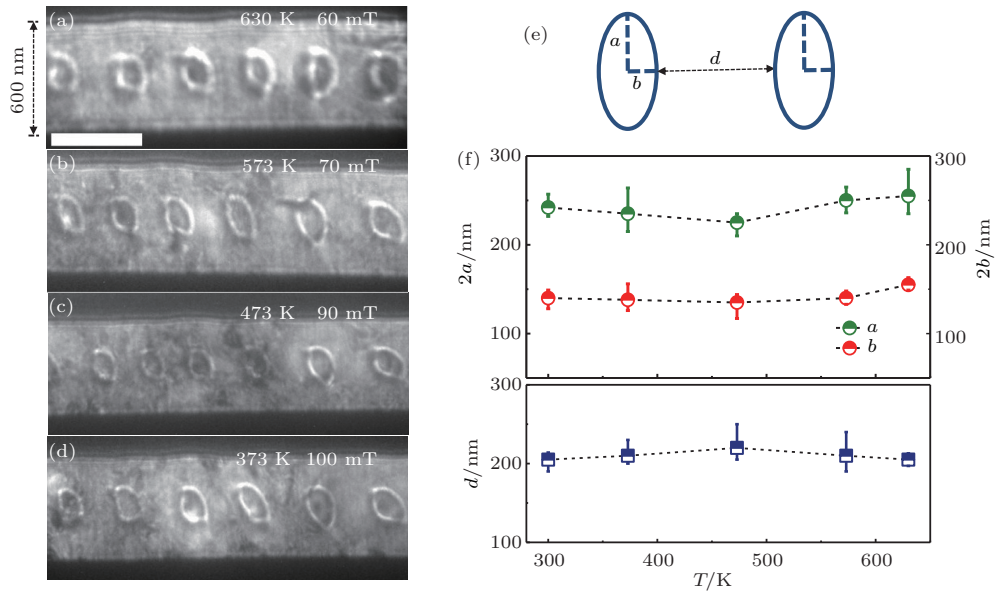


图6 600 nm宽“赛道”样品中斯格明子的温度稳定性研究 (a)–(d) 600 nm宽赛道样品中斯格明子单链随温度的变化; (e) 假设斯格明子为椭圆形的示意图; (f) 斯格明子长轴、短轴以及相邻两个斯格明子之间距离随温度的变化
 Fig. 6. (a)–(d) Temperature dependence of the single chain of skyrmion bubbles under their corresponding critical magnetic fields; (e) the proposed shape of a skyrmion bubble; (f) the temperature dependence of the major semi-axis a , minor semi-axis b , and average distance d between two neighboring skyrmion bubbles.

利用FIB微纳加工技术设计出人工几何边界受限,制备出了基于 Fe_3Sn_2 单晶并具有磁斯格明子单链排列的“赛道”存储器件.我们进一步利用洛伦兹电镜的双倾高温杆(Model 652, Gatan Inc.),对其温度稳定性进行了一系列的研究.图6(a)—(d)展示了600 nm宽样品中磁斯格明子单链在其临界场(条纹畴恰好完全转变为斯格明子时的磁场)下随温度变化的洛伦兹电镜图片.从图中可以看到,一方面随着温度的上升其临界磁场显著降低,另一方面,磁斯格明子非常稳定,甚至当温度高达630 K时(居里温度640 K),其依然能够稳定存在.这也是迄今为止报道的具有最高稳定温度的磁性斯格明子[10,19,31,32].

为了能够更加定量地研究磁斯格明子的温度稳定性,我们将单个磁斯格明子的形状假设为椭圆形,并分别用 a 和 b 来表示椭圆的长半轴和短半轴,用 d 来表示单链中相邻两个磁斯格明子之间的距离,如图6(e)所示.图6(f)为参数 a , b , d 的大小随温度的变化.从图中可得出其数值随温度的升高基本保持不变,这进一步说明了基于 Fe_3Sn_2 单晶的斯格明子基“赛道”存储器具有极高的温度稳定性.

3 结 论

磁性斯格明子是一种拓扑保护的涡旋磁畴结构.由于它的拓扑保护性、低驱动电流密度以及磁场、温度和电场等多物理作用调控的特性,被认为是未来高密度、高速度、低能耗存储器件的信息载体.本文报道了阻挫型磁体 Fe_3Sn_2 单晶中室温宽温域磁斯格明子的发现以及“赛道”存储器件的系统研究工作. Fe_3Sn_2 合金是一种少有的同时具有较高居里温度(640 K)和阻挫型自旋结构的磁性材料.我们通过理论模拟、磁输运测量、洛伦兹电镜观测相结合,证明了磁斯格明子可以在室温下 Fe_3Sn_2 单晶中稳定存在,并具有多种拓扑结构.进一步通过微纳加工的手段,基于 Fe_3Sn_2 单晶,制备出了具有单链排列的斯格明子赛道存储器件.对其温度稳定性研究发现,这种磁斯格明子单链可以在630 K的高温下保持极高的温度稳定性,将此前发现的双涡旋磁性斯格明子 MnNiGa 的居里温度从340 K提高到630 K,是迄今为止发现的最宽温区(120—630 K)和最高温度稳定存在的磁性斯格明子材料,具有更加广泛的应用范围.

参考文献

- [1] Skyrme T H R 1962 *Nucl. Phys.* **31** 556
- [2] Yamada K, Kasai S, Nakatani Y, Kobayashi K, Kohno H, Thiaville A, Ono T 2007 *Nat. Mater.* **6** 269
- [3] Hertel R, Schneider C M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 177202
- [4] Fert A, Cros V, Sampaio J 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 152
- [5] Nagaosa N, Tokura Y 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 899
- [6] Mühlbauer S, Binz B, Jonietz F, Pfleiderer C, Rosch A, Neubauer A, Georgii R, Boni P 2009 *Science* **323** 915
- [7] Neubauer A, Pfleiderer C, Binz B, Rosch A, Ritz R, Niklowitz P G, Boni P 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 186602
- [8] Pappas C, Lelivre-Berna E, Falus P, Bentley P M, Moskvina E, Grigoriev S, Fouquet P, Farago B 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 197202
- [9] Tonomura A, Yu X Z, Yanagisawa K, Matsuda T, Onose Y, Kanazawa N, Park H S, Tokura Y 2012 *Nano Lett.* **12** 1673
- [10] Yu X Z, Kanazawa N, Onose Y, Kimoto K, Zhang W Z, Ishiwata S, Matsui Y, Tokura Y 2011 *Nat. Mater.* **10** 106
- [11] Wilhelm H, Baenitz M, Schmidt M, Rößler U K, Leonov A A, Bogdanov A N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 127203
- [12] Seki S, Yu X Z, Ishiwata S, Tokura Y 2012 *Science* **336** 198
- [13] Adams T, Chacon A, Wagner M, Bauer A, Brandl G, Pedersen B, Berger H, Lemmens P, Pfleiderer C 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 237204
- [14] Seki S, Ishiwata S, Tokura Y 2012 *Phys. Rev. B* **86** 060403
- [15] Lin Y S, Grundy J, Giess E A 1973 *Appl. Phys. Lett.* **23** 485
- [16] Yu X Z, Mostovoy M, Tokunaga Y, Zhang W Z, Kimoto K, Matsui Y, Kaneko Y, Nagaosa N, Tokura Y 2012 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **109** 8856
- [17] Yu X Z, Tokunaga Y, Kaneko Y, Zhang W Z, Kimoto K, Matsui Y, Taguchi Y, Tokura Y 2014 *Nat. Commun.* **5** 3198
- [18] Yu X Z, Tokunaga Y, Taguchi Y, Tokura Y 2017 *Adv. Mater.* **29** 1603958
- [19] Wang W H, Zhang Y, Xu G, Peng L, Ding B, Wang Y, Hou Z, Zhang X, Li X, Liu E, Wang S, Cai J, Wang F, Li J, Hu F, Wu G, Shen B, Zhang X 2016 *Adv. Mater.* **28** 6887
- [20] Phatak C, Heinonen O, Graef M D, Long A P 2016 *Nano Lett.* **16** 4141
- [21] Jiang W J, Zhao X C, Yu G Q, Zhang W, Wang X, Jungfleisch M B, Pearson J E, Cheng X M, Heinonen O, Wang K L, Zhou Y, Hoffmann A, te Velthuis S G E 2017 *Nat. Phys.* **13** 162
- [22] Leonov A O, Mostovoy M 2015 *Nat. Commun.* **6** 8275
- [23] Pereira M, Yudin D, Chico H, Etz C, Eriksson O, Bergman A 2014 *Nat. Commun.* **5** 4815
- [24] Caër G L, Malaman B, Roques B J 1978 *Physica F* **8** 323
- [25] Fenner L A, Dee A A, Wills A S 2009 *J. Phys.: Condens. Matter* **21** 452202

- [26] Wang Q, Sun S S, Zhang X, Pang F, Lei H C 2016 *Phys. Rev. B* **94** 075135
- [27] Kida T, Fenner L A, Dee A A, Terasaki I, Hagiwara M, Wills A S 2011 *J. Phys.: Condens. Matter* **23** 112205
- [28] Hou Z, Ren W, Ding B, Xu G, Wang Y, Yang B, Zhang Y, Liu E, Xu F, Wang W, Wu G, Zhang X, Shen B, Zhang Z 2017 *Adv. Mater.* **29** 1701144
- [29] Yu X Z, Tokunaga Y, Taguchi Y, Tokura Y 2017 *Adv. Mater.* **29** 1603958
- [30] Hou Z P, Zhang Q, Xu G Z, Gong C, Ding B, Wang Y, Li H, Liu E K, Xu F, Zhang H W, Wu G H, Zhang X X, Wang W H 2018 *Nano Lett.* **18** 1274
- [31] Phatak C, Heinonen O, Graef M D, Long A P 2016 *Nano Lett.* **16** 4141
- [32] Nayak A K, Kumar V, Ma T P, Werner P, Pippel E, Shao R, Damay F, Rößler U K, Felser C, Parkin S S P 2017 *Nature* **548** 566

SPECIAL TOPIC — Magnetic skyrmions

Observation of new-type magnetic skyrmions with extremely high temperature stability and fabrication of skyrmion-based race-track memory device*

Hou Zhi-Peng¹⁾ Ding Bei¹⁾²⁾ Li Hang¹⁾²⁾ Xu Gui-Zhou³⁾
Wang Wen-Hong^{1)†} Wu Guang-Heng¹⁾

1) (State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Received 10 March 2018; revised manuscript received 7 May 2018)

Abstract

Nanoscale magnetic skyrmions are topologically protected vortex-like spin textures that have been regarded as a promising candidate for the transport of information in further spintronic applications based on the racetrack memory concept due to their nanoscale dimension, stable particle-like feature, and an ultralow threshold for current-driven motion. Recently, most of the skyrmions are observed in chiral magnetic materials, such as MnSi, FeGe, Co-Mn-Zn, where the Dzyaloshinskii-Moriya interaction is active. However, their overall low thermal stability is one of the major factors hindering the practical applications. In this paper, we report the observation of a new-type magnetic skyrmion with extremely high temperature stability in the centrosymmetric frustrated magnet Fe₃Sn₂, and the fabrication of skyrmion-based race-track memory device based on Fe₃Sn₂ by using focused ion beam. This compound is a rare example of ferromagnetic frustrated magnet that exhibits a high Curie temperature T_c up to 640 K. As the temperature decreases from 640 K to 100 K, it undergoes a spin reorientation during which the easy axis rotates gradually from the c -axis to the ab -plane. The Fe₃Sn₂ has a layered rhombohedral structure with the alternate stacking of the Sn layer and the Fe-Sn bilayer along the c -axis. By a high-temperature flux method, we grow high-quality Fe₃Sn₂ single crystal. The *in-situ* Lorentz transmission electron microscopy (LTEM) observations demonstrate that this compound can host skyrmions at room temperature (RT). In contrast to the skyrmions of the chiral magnets, they possess various spin textures and are transformed from topologically trivial bubbles under a high external magnetic field of 800 mT. By

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0303202), National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11604148), and the Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJZD-SW-M01).

† Corresponding author. E-mail: wenhong.wang@iphy.ac.cn

using the FIB technique, we fabricate a geometrically confined nanostripe with a width of 600 nm and thickness of 250 nm. The in-situ LTEM observations demonstrate that a single chain of skyrmions with uniform spin textures can be created at RT. The investigations on the temperature stability of the single skyrmion chain reveal that it shows an extremely high temperature stability that the size of and the distance between the skyrmions in the chain can keep unchanged at temperatures varying from RT up to a record-high temperature of 630 K. The observation of a highly stable single skyrmion chain in the geometrically confined Fe₃Sn₂ nanostripe can be attributed to (1) the weak temperature-dependent magnetic anisotropy K_u of the Fe₃Sn₂ crystal, and (2) the formation of edge states at the boundaries of the nanostripes. The observation of new-type magnetic skyrmion with extremely high temperature stability and the fabrication of skyrmion-based race-track memory devices are very important steps towards the applications in skyrmion-based spintronic devices.

Keywords: magnetic skyrmions, frustrate magnet, room temperature and wide temperature window, race-track memory device

PACS: 75.75.-c, 75.75.Fk, 75.47.Np

DOI: [10.7498/aps.67.20180419](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180419)