



基于二维材料的自旋-轨道矩研究进展

何聪丽 许洪军 汤建 王潇 魏晋武 申世鹏 陈庆强 邵启明 于国强 张广宇 王守国

Research progress of spin-orbit torques based on two-dimensional materials

He Cong-Li Xu Hong-Jun Tang Jian Wang Xiao Wei Jin-Wu Shen Shi-Peng Chen Qing-Qiang
Shao Qi-Ming Yu Guo-Qiang Zhang Guang-Yu Wang Shou-Guo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 127501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210004>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维材料热传导研究进展

Recent progresses of thermal conduction in two-dimensional materials

物理学报. 2020, 69(19): 196602 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200709>

二维材料/铁电异质结构的研究进展

Research progress and device applications of multifunctional materials based on two-dimensional film/ferroelectrics heterostructures

物理学报. 2020, 69(1): 017301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191486>

自旋轨道矩调控的垂直磁各向异性四态存储器结构

Demonstration of four-state memory structure with perpendicular magnetic anisotropy by spin-orbit torque

物理学报. 2018, 67(11): 117501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180216>

一维谐振子束缚的自旋轨道耦合玻色气体

One-dimensional spin-orbit coupling Bose gases with harmonic trapping

物理学报. 2019, 68(17): 173201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190143>

自旋轨道耦合量子气体中的一些新进展

Some recent progresses on the study of ultracold quantum gases with spin-orbit coupling

物理学报. 2020, 69(1): 016701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191241>

梯度磁场中自旋-轨道耦合旋转两分量玻色-爱因斯坦凝聚体的基态研究

Ground state of spin-orbit coupled rotating two-component Bose-Einstein condensate in gradient magnetic field

物理学报. 2018, 67(11): 110302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180539>

专题: 二维磁性材料

基于二维材料的自旋-轨道矩研究进展*

何聪丽¹⁾ 许洪军²⁾ 汤建²⁾ 王潇²⁾ 魏晋武²⁾ 申世鹏¹⁾
 陈庆强¹⁾ 邵启明³⁾ 于国强²⁾ 张广宇²⁾ 王守国^{1)†}

1) (北京师范大学新材料研究院, 北京 100875)

2) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

3) (香港科技大学电子与计算机工程系, 香港 999077)

(2021年1月2日收到; 2021年1月24日收到修改稿)

在具有自旋-轨道耦合效应的材料中, 电荷流能够诱导产生垂直于电流方向的纯自旋流, 当其注入近邻的磁性层时, 会对其磁矩产生自旋-轨道矩. 自旋-轨道矩能够快速、高效地翻转磁矩, 为开发高性能的自旋电子器件提供了一种极佳的磁矩操控方式. 二维材料由于具有很多的优点, 如种类丰富、具有多样化的晶体结构和对称性、能够克服晶格失配形成高质量的异质结、具有强自旋-轨道耦合、电导率可调等, 为研究自旋-轨道矩提供了独特的平台, 因此引起了人们的广泛关注. 本文涵盖了近年来与二维材料及其异质结构中自旋-轨道矩研究相关的最新进展, 主要包括了基于非磁性二维材料 (如 MoS_2 , WSe_2 , WS_2 , WTe_2 , TaTe_2 , MoTe_2 , NbSe_2 , PtTe_2 , TaS_2 等) 和磁性二维材料 (如 Fe_3GeTe_2 , $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 等) 的异质结中自旋-轨道矩的产生、表征和对磁矩的操控等. 最后指出了目前研究中尚未解决的问题与挑战.

关键词: 二维材料, 自旋-轨道耦合, 自旋-轨道矩, 电流驱动磁矩翻转

PACS: 75.47.-m, 85.75.-d, 71.70.Ej, 77.80.Fm

DOI: 10.7498/aps.70.20210004

1 引言

随着人工智能和物联网的高速发展, 信息量呈爆炸式增长, 大数据时代来临, 信息的存储技术面临着非常严峻的考验和挑战. 磁性随机存储器 (magnetic random access memory, MRAM) 由于具有高存储密度、高读写速度、超长耐久性及数据非易失性等优点, 被视为极具应用前景的新兴存储技术之一^[1]. 第一代 MRAM 是通过电流产生的奥斯特磁场驱动磁矩翻转进而实现数据写入, 这种方式在器件功耗和微型化方面存在很大的挑战. 为了克服上述问题, 第二代 MRAM 利用自旋转移矩 (spin-transfer torque, STT) 效应实现数据写入. 虽然该

方案提高了 MRAM 的性能, 但也引入了新的问题, 即较大密度的临界驱动电流容易将 MRAM 核心存储单元磁性隧道结的势垒层击穿, 进而减小存储器的使用寿命. 为了解决这一难题, 人们积极探索基于自旋-轨道矩 (spin-orbit torque, SOT) 的数据写入方式, 开发第三代 SOT-MRAM. SOT-MRAM 的数据写入是通过自旋-轨道耦合 (spin-orbit coupling, SOC) 诱导产生的 SOT 效应实现的^[2,3]. 在具有强 SOC 的非磁性材料中, 由于其体内自旋霍尔效应或非磁性薄膜/铁磁薄膜界面的 Rashba 效应等, 电荷流能够诱导产生垂直于电流方向的纯自旋流并作用于近邻的铁磁 (ferromagnetism, FM) 层, 进而产生 SOT, 并驱动磁矩翻转. 不同于第二代 STT-MRAM, SOT-MRAM 核心单元具有三端结

* 国家自然科学基金 (批准号: 51901025, 60573172, 51625101)、北京市自然科学基金重点项目 (批准号: Z190007, Z190009)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 310421101) 和香港研究资助局 (批准号: ECS26200520) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sgwang@bnu.edu.cn

构, 读写路径分开, 写入电流只需要经过磁性隧道结底部电极而不穿过超薄氧化物绝缘势垒层, 保护了势垒层不被击穿, 极大地延长了器件的寿命. 此外, 利用 SOT 操控磁矩可以实现比 STT 方案更快地写入速度及更低的功耗, 因此在低功耗、高速度非易失性存储和逻辑等领域具有广泛的应用前景.

近年来, 利用 SOT 驱动磁矩翻转的相关研究备受关注 [4–27], 并且研究内容不断扩展到很多研究方向, 包括磁畴壁运动、磁斯格明子运动、自旋逻辑器件、反铁磁磁矩操控、自旋神经形态器件及铁磁共振等 [28–47]. 目前, 相关研究中用于产生 SOT 的材料主要集中于重金属, 如 Pt, Ta, W 等. 通过开发新材料、发现新物理以提高 SOT 器件的各方面的性能是相关研究的重要目标. 受层状拓扑绝缘体 (如 Bi_2Se_3 等) 在 SOT 方面研究进展的影响, 基于二维材料的 SOT 器件研究逐渐引起了人们的关注 [48–52]. 新兴的二维晶体和拓扑材料由于具有众多的优点, 如种类丰富、具有多样化的晶体结构和对称性、能够克服晶格失配形成高质量的异质结、具有强自旋-轨道耦合、电导率可调等, 为自旋电子学研究提供了理想的物理研究平台 [52–57]. 例如, 二维过渡金属硫族化合物 (transition-metal dichalcogenides, TMDs) 材料 WTe_2 具有低对称性结构和强的 SOC, 除了能够产生传统的自旋取向沿面内的自旋流外, 还可以产生自旋取向沿面外的自旋流, 进而诱导产生非传统的 SOT, 理论上可以在无外磁场辅助的条件下直接翻转垂直磁矩 [58]. 因此, 探索二维材料异质结中的 SOT、电流驱动磁矩翻转及相关自旋电子器件有非常重要的意义.

本文首先总结了非磁性二维材料异质结中 SOT 效应研究的最新实验进展; 然后介绍了磁性二维材料异质结中 SOT 的表征和驱动磁矩翻转相关的工作; 最后, 简单地讨论一下未来将二维材料用于自旋电子器件所面临的问题和挑战, 并进行了总结和展望.

2 基于非磁性 TMD 材料的异质结中 SOT 及电流驱动磁矩翻转

有关二维材料 SOT 的研究最早是从非磁性 TMD 材料开始的. TMD 材料的化学式为 MX_2 , 其中 M 是过渡金属 (如 Mo, W, Ta, Pt, Nb 等), X 是硫族元素 (如 S, Se, Te 等). 这类材料家族包含

了半导体材料 (2H-MoS_2 , 2H-WSe_2 , WS_2) 和 (半) 金属性材料 (WTe_2 , 1T-TaTe_2 , $1\text{T}'\text{-MoTe}_2$, NbSe_2 , PtTe_2 和 TaS_2 等) [59–69]. 早期关于非磁性 TMD 材料中 SOT 的研究集中于 TMD/FM 薄膜异质结的制备和 SOT 的表征, 其中的 TMD 材料主要选择了结构对称性相对较高的半导体材料, 如 MoS_2 , WSe_2 , WS_2 等. 少数原子层厚度的 TMD 材料通过机械剥离或化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD); 铁磁材料可以通过磁控溅射或电子束蒸发等方式获得. 器件中电流产生的 SOT 的分量与效率通常可以通过自旋转矩铁磁共振 (ST-FMR)、二次谐波霍尔等测量技术来表征. 随后, 人们很快将研究拓展到具有 (半) 金属特性的 TMD 材料, 例如 WTe_2 , TaTe_2 , MoTe_2 , WTe_2 , NbSe_2 , PtTe_2 等. 在研究这些材料的过程中, 人们首先意识到结构对称破缺对于 SOT 的重要性, 并发现了一种与对称破缺相关的平面外的新型类阻尼 SOT. 除了重要的物理发现外, 人们还利用 (半) 金属特性 TMD 材料中的强 SOC 和高导电性, 实现了电流高效驱动磁矩翻转. 此外, 人们也在开发大面积低维材料制备方法方面取得了重要的进展. 表 1 概述了目前已报道的非磁性 TMD 薄膜的晶体结构、制备方法、TMD/FM 异质结中 SOT 的表征方法以及实验得到的 TMD 材料的自旋霍尔电导. 其中 σ_S , σ_A 分别代表与面内类阻尼 SOT、类场 SOT 相关的自旋霍尔电导; σ_B , σ_T 分别代表与面外类阻尼 SOT、面外类场 SOT 相关的自旋霍尔电导. SHH 代表二次谐波霍尔测量方法, ST-FMR 代表自旋转矩铁磁共振测量方法. 与目前研究较多的传统重金属 SOT 材料相比 (其类阻尼 SOT 效率通常在 0.1–0.3 之间), 非磁性 TMD 材料不仅展示了较大的 SOT 效率, 还展现出了一些独特的优势, 如产生新型类阻尼 SOT、电场可调等特性, 有望为自旋电子器件引入许多特殊的性能. 下文将针对不同材料中 SOT 的研究展开具体的介绍.

2.1 二维半导体材料

2H-MoS_2 是一种二维半导体材料, 因具有宽能隙和高迁移率等特性而备受关注. 它具有六角晶格结构, 每个 Mo 原子与 6 个最近邻 S 原子结合, 属于 $P6/mmc$ 空间群. 单层 MoS_2 与 FM 层接触时, 由于界面对称性的破缺, 电流能够诱导产生类阻尼 SOT (τ_{DL}) 和类场 SOT (τ_{FL}) 两种效应. Zhang

表 1 已报道的实验研究工作中 TMD 材料的晶体结构、制备方法、TMD/FM 异质结中的 SOT 的表征方法以及自旋霍尔电导
Table 1. Crystal structure, preparation method, method for SOT measurement of the TMD/FM heterostructure, and spin Hall conductance of TMD materials in the previous studies.

TMD材料	空间群	制备方法	表征方法	自旋霍尔电导 / $[10^3(\hbar/2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}]$	文献
MoS ₂	<i>P6/mmc</i>	CVD	SHH	$\sigma_A = 2.9$	[60]
WSe ₂	<i>P6/mmc</i>	CVD	SHH	$\sigma_A = 5.5$	[60]
WS ₂	<i>P6/mmc</i>	CVD	SHH	σ_A, σ_S observed	[61]
WTe ₂	<i>Pmn2₁</i>	Exfoliation	ST-FMR/SHH	$\sigma_A = 9 \pm 3, \sigma_S = 8 \pm 2, \sigma_B = 3.6 \pm 0.8$	[58]
WTe ₂	<i>Pmn2₁</i>	Exfoliation	ST-FMR/SHH	$\sigma_A, \sigma_S, \sigma_B$ observed	[62]
TaTe ₂	<i>C2/m</i>	Exfoliation	ST-FMR/SHH	$\sigma_A, \sigma_S, \sigma_B$ observed	[64]
MoTe ₂	<i>P2₁/m</i>	Exfoliation	ST-FMR	$\sigma_S = 4.4\text{--}8.0, \sigma_B = 0.04\text{--}1.6, \sigma_T = 0.026\text{--}1.0$	[65]
NbSe ₂	<i>P6₃/mmc</i>	Exfoliation	ST-FMR	$\sigma_A = 0\text{--}40, \sigma_S = 0\text{--}13, \sigma_T = -2\text{--}3.5$	[66]
PtTe ₂	—	CVD	ST-FMR	$\sigma_S = 0.20\text{--}1.6 \times 10^2$	[68]
TaS ₂	—	Ion-beam sputtering	ST-FMR/SHH	$\sigma_S = 14.9 \times 10^2$	[69]

等 [59] 最早通过 ST-FMR 技术研究了 MoS₂/Ni₈₀Fe₂₀(Py) 异质结中的 SOT. 其中 MoS₂ 是通过 CVD 方法制备的单层三角形晶粒. 如图 1(a) 和图 1(b) 所示, 其对称峰值 (与类阻尼 SOT 相关) 约为反对称峰值 (与类场 SOT 相关) 的 4 倍, 表明类阻尼 SOT 可能比类场 SOT 大得多. 由于逆 Rashba-Edelstein 效应诱导的自旋泵浦可能也有很大的贡献, 该工作没有量化 SOT 的强度. Shao 等 [60] 进一步通过二次谐波霍尔方法定量研究了 MoS₂(WSe₂)/CoFeB 异质结中电流产生的 SOT. 其中, MoS₂ 是 CVD 方法生长的大面积单层薄膜. 如图 1(c) 所示. 测量得到的二次谐波霍尔电阻 $R_{2\omega}^{2\omega}(\varphi)$ 的典型方位角依赖性如图 1(d) 所示. 通过分析二次谐波霍尔电阻对方位角 (φ) 依赖性的不同, 可以分离得到类阻尼 SOT 和类场 SOT 的大小. 实验结果表明, MoS₂, WSe₂ 的类场 SOT 对应的自旋电导分别为 $2.9 \times 10^3 \hbar/(2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, $5.5 \times 10^3 \hbar/(2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$; 类阻尼 SOT 在实验测试误差范围内为零. Shao 等 [60] 认为, 实验到观察到的类场 SOT 主要归因于界面 Rashba-Edelstein 效应. 当前, 大多数的 SOT 器件采用外场辅助下类阻尼 SOT 驱动垂直磁矩翻转的操控机制, 因此获得大的类阻尼 SOT 是人们所期望的. 虽然上述工作表明 CVD 生长的单层 MoS₂ 和 WSe₂ 可能无法产生人们所需要的较大的类阻尼 SOT, 但较大的类场 SOT 的发现让人们看到了利用 TMD 材料产生 SOT 的信心, 因此激发了更多的科研人员开展 TMD 材料中 SOT 的相关研究.

Lv 等 [61] 采用 ST-FMR 技术研究了 1L-WS₂/Py(10 nm) 异质结构中的 SOT (图 1(e)). 样品中 WS₂ 和 Py 薄膜分别通过 CVD 方法和电子束蒸发

方法制备. 实验观察到了类阻尼 SOT 和类场 SOT, 其主要物理起源被归因于界面 Rashba-Edelstein 效应. 这个实验再次证明了利用单层 TMD 材料能够产生 SOT. 更重要的是, Lv 等 [61] 还证明栅压可以调控 TMD 材料所产生的 SOT (图 1(f)). 当施加栅压从 -60 V 到 60 V, τ_{FL}/τ_{DL} 从 0.05 增大到 0.22. 他们认为, 栅压可调的特性可能源于载流子密度的改变导致的 WS₂/Py 界面电流的变化. 对于二维材料来说, 特别是对于具有半导体特性的单层二维材料, 栅压调控属性将是它较传统金属材料的一个重要优势, 有望在电场辅助存储和逻辑器件应用中发挥作用.

2.2 二维 (半) 金属材料

除了半导体 TMD 材料之外, (半) 金属 TMD 材料也被广泛地研究. 研究这类材料的主要驱动力在于它们具有高导电性、强自旋-轨道耦合、低结构对称性等. 人们最早研究的 (半) 金属 TMD 材料是 WTe₂, 属于 *Pmn2₁* 空间群. 同 MoS₂ 相比, 它具有更低的对称性, 满足产生非传统 SOT 的对称性要求. MacNeill 等 [58] 首次利用 ST-FMR 技术研究了 WTe₂/Py 异质结构中的 SOT, 如图 2(a) 所示. 除了传统的类场 SOT 和类阻尼 SOT, 实验还观察到了非传统的面外 SOT (图 2(b)), 其对应的自旋霍尔电导为 $(3.6 \pm 0.8) \times 10^3 \hbar/(2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, 且大小随着施加电流和 WTe₂ 晶体 *a* 轴的角度增大而减小. 当施加电流和 *a* 轴垂直, 即沿 *b* 轴时, 非传统 SOT 消失, 这表明了非传统 SOT 与晶体的对称性有关. 尽管早期的研究中显示 SOT 对厚度的依赖关系很小, 随着更深入的研究及更宽的厚

度范围的研究, 传统和非传统 SOT 都表现出了厚度的依赖性, 说明其微观起源除了界面效应还有体效应的贡献 [62,67]. Shi 等 [62] 在 WTe_2/Py 异质结构中实现了非常有效的电流驱动平面内磁矩翻转

(图 2(c)), 翻转电流密度约为 2.96×10^5 A/cm². 更有趣的是, 在该体系中, 还观察到了 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用, 为进一步研究手性磁结构提供了材料基础.

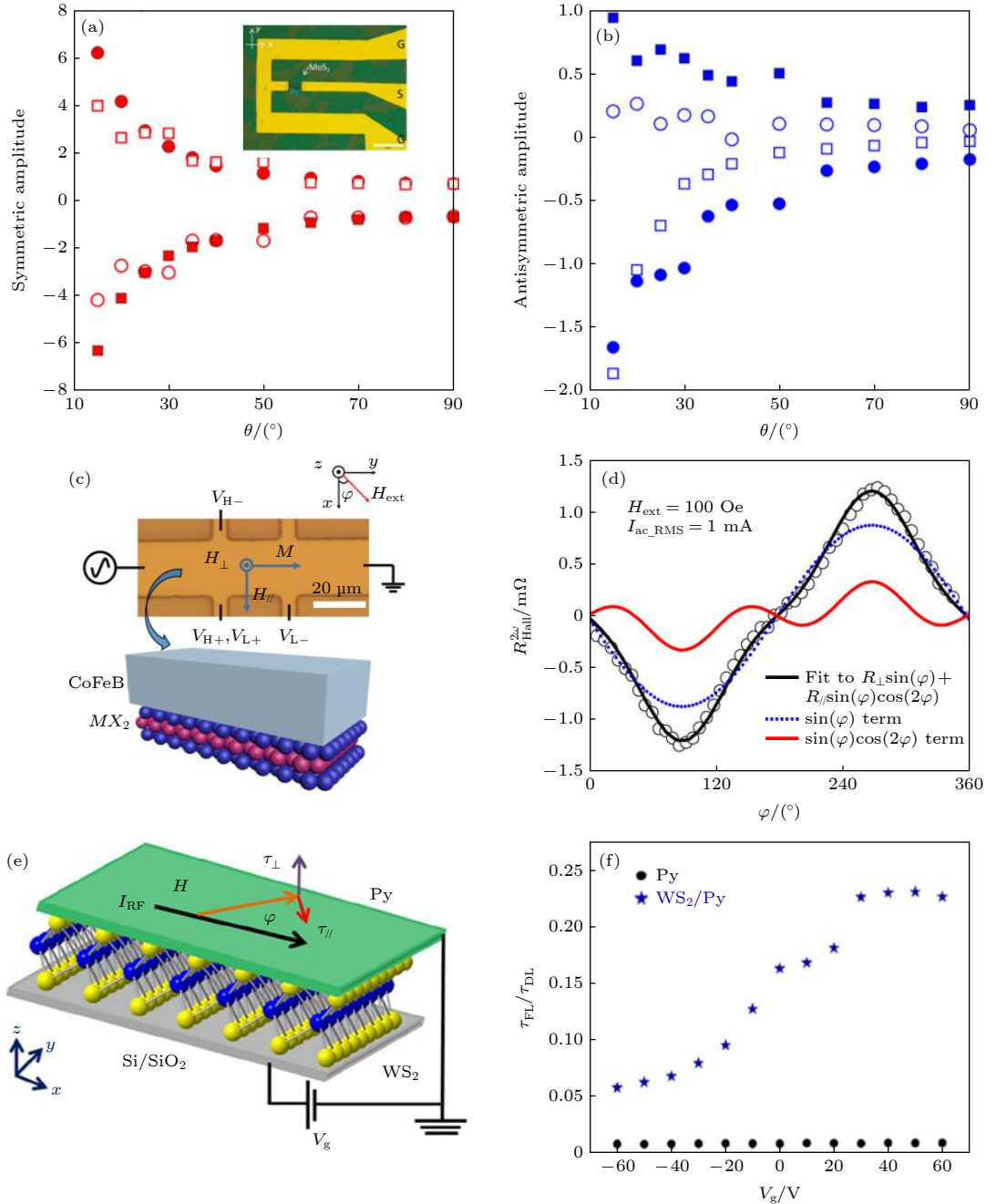


图 1 MoS_2/Py 异质结中 ST-FMR 信号的对称 (a) 和反对称 (b) 振幅随外加磁场与平面夹角 θ 的依赖关系 (插图为基于 MoS_2/Py 异质结的 ST-FMR 器件光学显微镜图) [59]; (c) $MX_2/CoFeB$ 异质结的 SOT 测量装置示意图; (d) 二次谐波方法测得二阶霍尔电阻与 φ 的函数关系, 外加磁场为 100 Oe ($1 \text{ Oe} = 10^3/(4\pi) \text{ A/m}$) [60]; (e) WS_2/Py 双层器件几何结构示意图, 其中 V_g 通过 SiO_2 介质层施加; (f) V_g 对 Py 和 WS_2/Py 双层的转矩比 τ_{FL}/τ_{DL} 调控特性 [61]

Fig. 1. Out-of-plane (OOP) angular (the applied field is described by the polar angle) dependence of symmetric (a) and antisymmetric (b) components of the ST-FMR signal based on MoS_2/Py heterostructure (the inset is photo image of ST-FMR device) [59]; (c) measurement setup of SOT measurements for the $MX_2/CoFeB$ bilayer; (d) second-harmonic Hall resistance as a function of φ with an external magnetic field 100 Oe applied [60]; (e) schematic of the WS_2/Py bilayer device geometry, where V_g was applied through the SiO_2 dielectric layer; (f) torque ratio τ_{FL}/τ_{DL} dependence of V_g for Py and WS_2/Py bilayer [61].

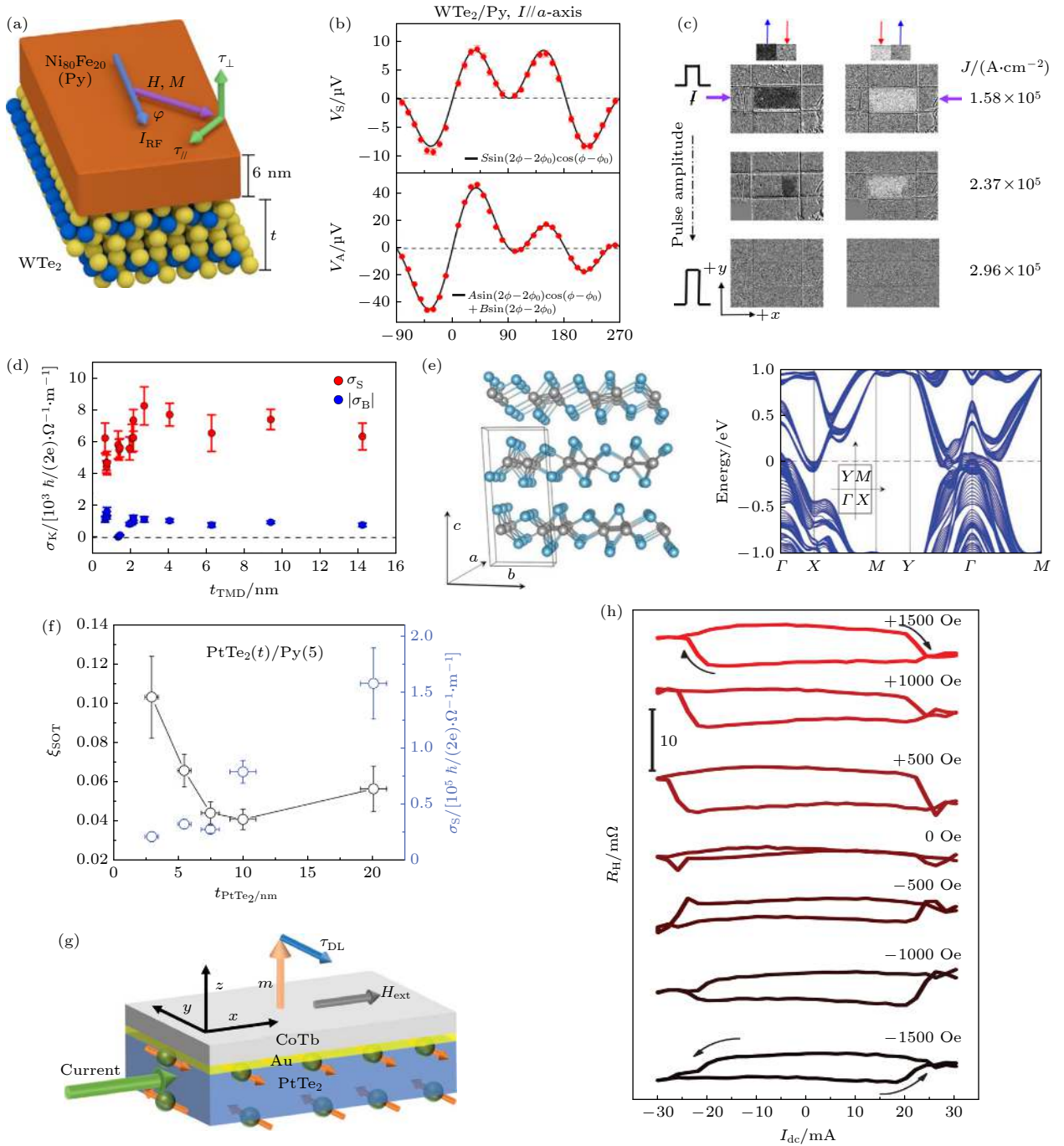


图 2 (a) WTe₂/Py 异质结样品几何结构示意图; (b) WTe₂/Py 器件的对称和反对称 ST-FMR 信号与面内磁场角度的依赖关系, 其中电流平行于 a 轴^[58]; (c) 由 MOKE 图像捕捉到的电流驱动磁矩翻转过程^[62]; (d) 自旋电导率随 MoTe₂ 厚度的变化关系^[65]; (e) MoTe₂ 单斜 1T' 相的晶体结构和 20 层 MoTe₂ 薄膜的能带结构^[70]; (f) PtTe₂/Py 器件 ST-FMR 测量 SOT 效率 ξ_{SOT} 和自旋霍尔电导率 σ_s 的厚度依赖性; (g) PtTe₂/Au/CoTb 结构和 PtTe₂ 中电流产生的 SOT 的示意图; (h) 在不同的面内磁场下, PtTe₂ 中电流产生的 SOT 驱动具有垂直磁各向异性的 CoTb 层磁矩翻转^[68]

Fig. 2. (a) Schematic of the bilayer WTe₂/Py sample geometry; (b) symmetric and antisymmetric ST-FMR resonance components for a WTe₂ (5.5 nm)/Py (6 nm) device as a function of in-plane magnetic-field angle, with current applied parallel to the a -axis^[58]; (c) switching process captured by MOKE images^[62]; (d) spin conductivities as a function of the thickness of MoTe₂, where σ_S stands for the conventional damping-like torque, σ_B stands for the out-of-plane damping-like torque, and σ_T stands for the out-of-plane field-like torque^[65]; (e) crystal structure of the monoclinic 1T' phase of MoTe₂ and band structure of a MoTe₂ slab with 20 monolayers^[70]; (f) thickness dependence of ξ_{SOT} and spin Hall conductivity σ_s of PtTe₂/Py measured by ST-FMR; (g) schematic layout for PtTe₂/Au/CoTb stack and the SOT generated by the majority of current flowing in PtTe₂; (h) current-induced switching of the CoTb layer by SOT from PtTe₂ under different in-plane field^[68].

因为低对称性是允许产生非传统面外 SOT 的前提条件, 后续一些实验重点针对具有低对称性的 TMD 材料展开. MoTe_2 属于 $P2_1/m$ 空间群, 满足产生面外 τ_{DL} 的对称性要求. Stiehl 等^[65] 采用 ST-FMR 技术研究了 β 相 MoTe_2/Py 体系中的 SOT, 传统的和非传统的 SOT 同时被观察到. 实验发现, 除了原因尚不清楚的 2 层 MoTe_2 外, 面内和面外 SOT 对应的自旋电导都没有明显的厚度依赖性 (图 2(d)), 揭示了 MoTe_2/Py 体系中 SOT 的界面起源. Liang 等^[70] 同样研究了 $1\text{T}'\text{-MoTe}_2/\text{Py}$ 异质结中的 SOT, 但并未发现面外 SOT, 暗示了面外 SOT 起源的复杂性. 该实验重点集中于室温零磁场下的电流驱动磁矩翻转, 翻转电流比传统重金属材料 (例如 Pt) 要小一个数量级. 实验还研究了该体系中的 SOT 效率. 对于其研究的最薄厚度为 66.1 nm 的 MoTe_2 器件, 其 SOT 效率 (ξ_{SOT}) 约为 0.35, 比 Ta (~ 0.15), Pt (~ 0.06) 都要大很多. 翻转电流随 MoTe_2 厚度的增大而增大, SOT 效率呈现了随着 MoTe_2 厚度增大而降低. 能带结构计算结果 (图 2(e)) 表明, 除了考虑体自旋霍尔效应外, 还需要考虑界面 Rashba-Edlstein 的贡献. 此外, 他们还设计了哑铃形的异质结磁性器件, 翻转电流进一步降低了 60% 之多. 这些发现展示了 MoTe_2 等半金属二维材料在低功耗自旋电子器件领域的应用前景.

上面两个关于 MoTe_2 的实验对比说明了非传统面外 SOT 的起因可能是比较复杂的, 这个结论进一步被 TaTe_2 和 NbSe_2 的实验研究所印证^[64]. TaTe_2 属于 C_2/m 空间群, 同样满足非传统 SOT 对称性的要求. 但 Stiehl 等^[65] 在 TaTe_2/Py 异质结构中并未发现面外 SOT, 只观察到了具有 Dresselhaus 对称性的 SOT. 该 SOT 起源于 TaTe_2 中各向异性的电导率导致的面内横向电流分量产生的奥斯特场. 在 WTe_2/Py 双层膜中也有类似的影响. 除了常规奥斯特转矩和 Dresselhaus 型转矩外, 并未观察到非传统的 SOT, 这可能是由于 TaTe_2 中 SOC 较弱. 同时 Stiehl 等^[65] 也论证了低对称性晶体中面内的各向异性电导率对体系中 SOT 的重要影响. Guimaraes 等^[66] 采用 ST-FMR 研究了 NbSe_2/Py 双层膜中电流诱导的 SOT. NbSe_2 具有属于 $P6_3/mmc$ 空间群的六边形结构, 与 MoS_2 类似, 其对称性是禁止产生非传统 SOT 的. 然而, 除了预期的 SOT 分量外, 他们依然观察到了非传统的

SOT. Guimaraes 等^[66] 将产生的非传统 SOT 归因于器件加工过程中引起的应变效应, 这种应变效应破坏了旋转对称性, 允许产生非传统 SOT. 该结果表明除了晶格结构对称性之外, 与界面质量、局部原子点群对称性相关的其他微观因素也可能对诱导产生非传统 SOT 起到重要作用.

上面提到的实验主要集中于探索非传统面外 SOT、开发具有大自旋霍尔角且高导电性的 TMD 材料. 这些研究主要基于机械剥离的实验方案, 该方法制备样品的产率较低. 如何制备具有大自旋霍尔角且高导电性的大面积 TMD 材料, 也是将 TMD 材料用于器件的关键. 最近, Xu 等^[68] 成功制备了大面积、高质量、厚度可控的 PtTe_2 薄膜并且首次研究了这种第二类狄拉克半金属的 SOT 效应. 该 PtTe_2 薄膜在室温下具有高导电性 (约为 10^6 S/m). 因为 PtTe_2 在大气环境中相对稳定, 均匀、平整、大面积的 PtTe_2 薄膜可转移到磁控溅射设备中制备自旋电子器件. 通过对 PtTe_2/Py 异质结进行系统性的 ST-FMR 测量发现 PtTe_2 薄膜具有较大的类阻尼 SOT: 忽略界面自旋的损失, 5 nm 厚的 PtTe_2 的自旋霍尔角在 0.09—0.15 范围, 是对照实验中 4 nm 厚 Pt 的 1.5—2 倍. 从 PtTe_2 中 SOT 效率随厚度非单调变化的实验结果 (图 2(f)) 可以推测 PtTe_2 产生的 SOT 具有块体态与表面态两个不同的来源. 由于 PtTe_2 的高导电性以及较大的自旋霍尔角, 可实现非常高的自旋霍尔电导率, 达 $(0.2\text{--}1.6) \times 10^5 \hbar/(2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, 能与典型的拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 相比拟. 进一步的垂直磁矩翻转实验也证实了 PtTe_2 具有比 Pt 更高的电荷-自旋转换效率 (图 2(g) 和图 2(h)). 该研究表明 PtTe_2 以及狄拉克半金属有望应用于低功耗 SOT 器件及其他自旋电子学器件中, 同时该工作也揭示了大规模制备 PtTe_2 类似的二维拓扑材料的可能性.

除了上述方法外, Husain 等^[69] 采用离子束溅射的方法制备了大面积单层 TaS_2 材料, 并采用 ST-FMR 和二次谐波霍尔测量手段, 研究了 TaS_2/Py 异质结构中的 SOT. 在这种异质结构中, 观察到了相当大的类场 SOT 和类阻尼 SOT. 其中, 自旋霍尔角为 0.25 ± 0.03 , 自旋霍尔电导率 $14.9 \times 10^5 \hbar/(2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, 是目前报道的 TMD 材料中的最大值. 研究发现, 大的类阻尼 SOT 来源于 TaS_2/Py 异质结构的界面特性, 该发现得到了密度泛函理论计算结果的支持. 界面自旋-轨道-耦合与

晶体对称性之间的相互作用会产生大的类阻尼 SOT. 该工作为设计下一代基于 TMD 材料的低功耗量子存储器件提供了有效的思路.

3 基于磁性二维材料异质结构中的 SOT 及电流驱动磁矩翻转

非磁性二维材料由于可以产生 SOT, 能够用于代替 SOT 器件中的重金属材料. 另一方面, 最新发现磁性二维材料 (如 CrI_3 , $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ (CGT), Fe_3GeTe_2 (FGT) 等 [71–76]) 同样可以应用于自旋电子器件中. 磁性二维材料具有许多独特而优异的性能. 例如, 磁性二维材料优良的栅极可调性为探索磁电耦合现象和应用提供了条件 [73,77]. 层状反铁磁二维材料如 CrI_3 显示出高达 19000% 的隧穿磁电阻 [78], 展现了磁性二维材料的巨大优势. 利用二维铁磁金属 FGT 还可以构建无间隔层的自旋阀及全二维垂直自旋阀 [79,80], 揭示了利用二维磁性同质或

者异质结实现多态非易失磁存储和逻辑的可能性. 此外, 二维铁磁材料中发现的磁斯格明子 [81–87], 也展现了其用于高密度赛道存储器件的可能性. 从上述相关工作能够看出, 范德瓦耳斯 (van der Waals, vdW) 异质结构在开发新型自旋电子器件方面的潜在机会, 磁性二维 vdW 材料为新型自旋电子器件的开发提供了一个平台, 对于开发新型自旋电子器件具有重要的研究价值.

将 vdW 材料用于构建自旋电子器件关键的挑战在于如何有效地操控其磁矩, 实现从一种状态到另一种状态的转换. 国内外两个研究团队几乎同时报道了 FGT/Pt 异质结中的高效 SOT 及电流驱动翻转方面的重要进展 (图 3(a)–(c)) [88,89]. 当电流在重金属 Pt 中流动时, 会产生自旋电流并注入磁性 FGT 中, 利用该自旋流可以有效地操控单层磁体 FGT 的磁矩方向. 图 3(b) 展示了 FGT 在面内磁场分别为 $H_x = 50$ 和 -50 mT 的辅助下, 温度为 100 K 时的电流驱动磁化翻转. FGT 的磁化通

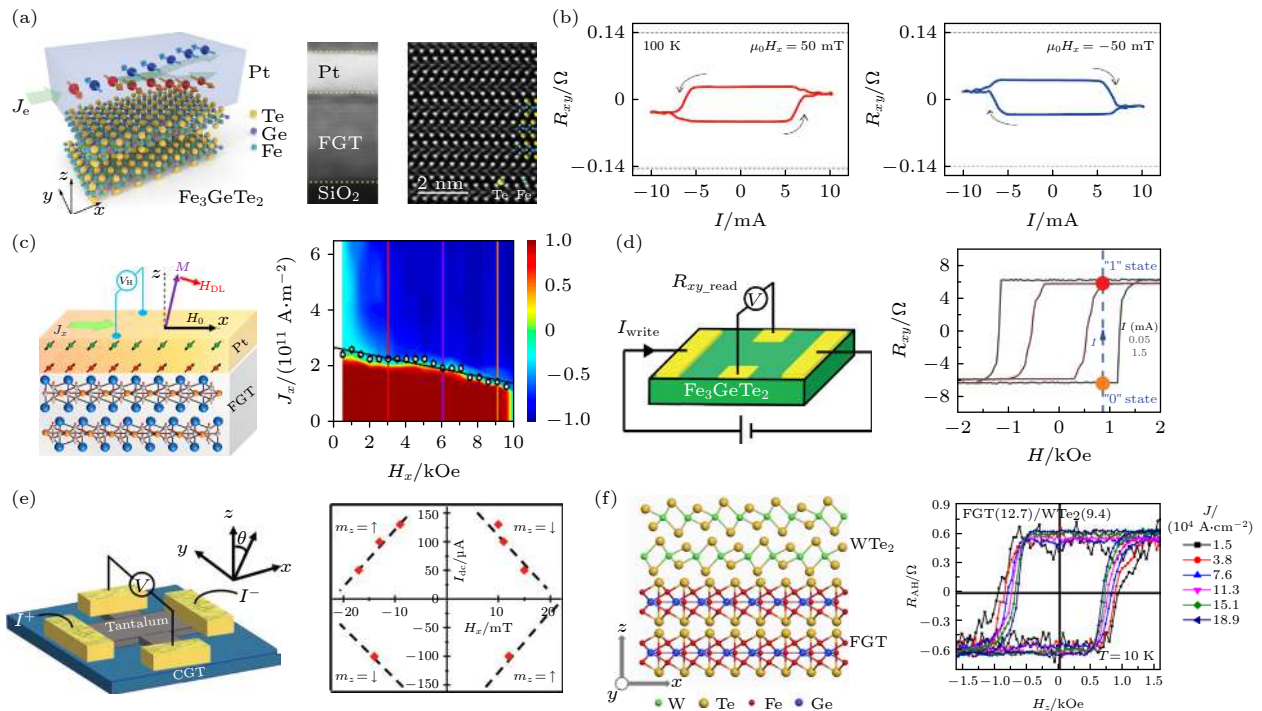


图 3 FGT/Pt 双层器件的示意图 (a) 和 SOT 驱动的垂直磁矩翻转 (b) [88]; (c) SOT 驱动 FGT 磁矩翻转有效翻转电流随施加面内磁场的变化 [89]; (d) 基于 FGT 的磁存储器件原理图及电流诱导的矫顽场大幅度降低, 从而降低写入电流密度 [90]; (e) 基于 CGT/Ta 异质结 Hall 器件的原理图和 4 K 温度下施加流过 Ta 的电流 I_{dc} 和平面内磁场 H_x 组合时的磁矩 m_z 相图 [91]; (f) FGT/WTe₂ 双层结构的原子示意图和不同电流密度下 FGT/WTe₂ 霍尔条在 10 K 垂直磁场下的反常霍尔电阻 [92]

Fig. 3. Schematic view (a) and SOT-driven perpendicular magnetization switching (b) in the FGT/Pt bilayer device [88]; (c) current-induced magnetization switching of FGT and effective switching current as a function of applied in-plane magnetic field [89]; (d) schematic of FGT-based magnetic memory device and the current-induced substantial reduction of the coercive field and then reduction of the write current [90]; (e) schematic of a fabricated Hall bar device from a CGT/Ta heterostructure and phase diagram of m_z for applied combinations of I_{dc} and H_x at 4 K [91]; (f) atomic schematic view of FGT/WTe₂ bilayer structure and anomalous Hall resistance of the FGT/WTe₂ Hall bar under a perpendicular magnetic field at 10 K with various current densities [93].

过电流扫描从一种状态切换到另一种状态. 正(负)面内磁场的翻转极性为逆时针(顺时针), 表明 Pt 的自旋霍尔角为正, 与之前报道的研究工作一致. 值得注意的是, SOT 操控所实现的两个电阻状态并不是完全饱和的(饱和态由图 3(b)中虚线表示), 该现象被归因于电流导致的热效应. 研究人员还利用谐波测量进一步定量表征了 SOT 有效磁场, 并以此为依据估算了少层 FGT 的饱和磁化强度的上限, 该值比块体材料的饱和磁化强度小一个量级. 除 Pt 诱导产生 SOT 外, 最近的研究表明电流在每一个单层的 FGT 中也会产生局域 SOT^[90], 并能够对 FGT 的矫顽场产生有效的调制(图 3(d)). 同时利用重金属中产生的 SOT 和 FGT 中的局域 SOT, 将有利于进一步降低翻转 FGT 磁矩的电流密度. 上述有关电流操控 FGT 磁矩所取得的进展进一步推动探索更多 vdW 磁性材料在自旋电子学器件中的应用.

近期, Ostwal 等^[91]和 Gupta 等^[92]分别进行了通过 SOT 对 vdW 铁磁体 CGT 中磁矩调控的研究. Ostwal 等^[91]在 CGT/Ta 异质结构中(图 3(e)), 施加平面内磁场和流过 Ta (一种表现出巨大自旋霍尔效应的重金属)的电流组合, 在面内磁场为 20 mT 时, 用低至 5×10^5 A/cm² 的电荷电流密度实现了 CGT 的磁矩翻转. 该电流密度比翻转非层状金属铁磁体 CoFeB 等所需的电流密度低两个数量级. 这些结果显示了二维磁性材料未来应用于自旋电子器件的巨大潜力.

到目前为止, 大多数的主要集中于范德瓦耳斯材料与传统的金属材料构成的异质结中的 SOT 研究. 未来, 探索利用全二维材料 SOT 器件将成为一个重要的研究方向. Shao 等^[93]已经进行了初步的尝试, 研究了 FGT/WTe₂ 双层 vdW 异质结构中的反常霍尔效应(图 3(f)). 在这种器件中, 电流可以有效地调节 FGT 薄片的矫顽力, 主要归因于 FGT/WTe₂ 双层界面热导较低而产生焦耳热效应. 虽然该实验没有实现 SOT 驱动磁矩的翻转, 但阐明了选择热性能好的二维材料来提高界面热导是非常重要的, 为进一步实现具有性能优良的全二维自旋电子器件提供了思路.

4 结论与展望

本文综述了基于二维材料的 SOT 领域的最新研究进展, 重点介绍了基于 TMD/FM 异质结构

中 SOT 的研究现状、基于磁性二维材料异质结构中的 SOT 及电流驱动磁矩翻转的研究进展. TMD 材料中 SOT 研究的广泛关注很大程度上得益于传统 SOT 材料的快速发展和器件应用的良好研究环境. 但与传统金属材料中的 SOT 研究相比, 有关二维 vdW 材料及其异质结的 SOT 的研究刚刚兴起, 还主要处于材料探索和基础物理研究阶段. 虽然研究还处于初期阶段, 但已经发现了很多新奇的物理现象, 如产生新型面外类阻尼 SOT、电场可调等特性, 展现了良好的发展态势, 进一步的材料、物理和器件应用研究也呈现出不断扩大和深入的趋势. 基于当前的研究成果来看, 二维 vdWs 材料的器件应用进程依然存在着几个方面的挑战:

1) 二维材料中非传统 SOT 的微观物理机制仍不清楚. 目前实验所观测到的非传统 SOT 不能用我们所熟悉的自旋霍尔效应或界面 Rashba-Edelstein 效应解释, 背后的物理机制仍有待探究. 进一步从理论上阐明非传统 SOT 的产生机制将有助于找到提高其强度的方法, 促进非传统 SOT 在操控垂直磁矩方面的应用. 值得指出的是, 利用二维材料谷霍尔效应^[94-96]也有可能产生垂直极化的自旋流, 有望用于产生垂直 SOT^[97].

2) 磁性二维材料的居里温度需要进一步提高. 虽然磁性二维材料在一些方面展现出了优势, 但目前大多数磁性二维材料的居里温度都在室温以下, 极大地限制了其在自旋电子器件中的应用. 如何进一步提高居里温度是磁性二维材料相关的物理研究的重要方向, 也是其是否能够用于自旋电子器件的关键. 目前, 一些研究已经报道了相关的技术方案, 能够将已有的磁性二维材料的居里温度提高, 如利用离子液体进行电场调控^[73]、利用微结构制备方式^[98]、界面反铁磁诱导^[99]、Ga 离子注入^[100]等方式. 此外, 不断探索更多的磁性低维材料也是寻求实现高居里温度的关键^[101-103].

3) 晶圆级二维材料的制备. 虽然通过机械剥离制备的二维材料具有很高晶体质量, 但由于样品尺寸小, 无法实现大规模生产制备. 生长二维晶体材料的常用方法: 分子束外延、化学气相沉积、金属有机化学气相沉积和磁控溅射. 在晶圆尺度上确保二维材料的单晶度和均匀性是至关重要的. 最近的一些研究进展为解决这个问题提供了一些思路. 例如, Zhang 课题组^[104-106]一直致力于采用 CVD 方法实现 TMD 二维材料的高质量晶圆级生长;

Xu 等^[68] 通过 CVD 两步法成功制备了大面积、高质量、厚度可控的 PtTe₂ 薄膜; Liu 等^[107] 和 Wang 等^[108] 则利用分子束外延实现晶圆级二维 FGT 材料的制备. Zheng 等^[109] 和 Guo 等^[110] 证实了可采用磁控溅射方法制备大面积的超薄拓扑绝缘体材料. 这些工作为获得尺寸可控、规模化、均匀的可集成二维材料的制备提供了重要的思路.

4) 与现有半导体技术的集成. SOT 器件能大规模应用, 需要使用后端工艺与现有的标准 CMOS 技术集成. 在该工艺中, 二维材料需要集成在非晶或多晶衬底(如氧化硅)上. 即使有缓冲层, 高质量二维材料直接生长在非晶或多晶衬底上目前仍是一个很大的挑战. 可以采取转移大规模的二维材料到非晶或多晶衬底上, 而转移加工过程中如何保证二维材料的高质量及稳定性也是目前需要解决的重要课题. 高质量界面有利于自旋传输, 对于获得大的 SOT 至关重要, 因此实现高质量干净界面也是目前这一领域亟待解决的技术加工问题.

解决上述几方面的挑战是未来二维材料在自旋电子器件中应用的关键, 有可能成为未来几年自旋电子学领域重点关注的方向, 需要物理、材料、半导体领域科学工作者的共同努力和不断探索. 除此之外, 基于二维材料的其他自旋相关效应, 如磁电阻效应、自旋注入、自旋泵浦、反铁磁翻转、自旋振荡、磁畴壁和斯格明子电流操控、自旋热电效应等, 均有待进一步地深入研究探索, 也有望推动发现新的物理现象, 催生新的研究方向.

参考文献

- [1] Kent A D, Worledge D C 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 187
- [2] Miron I M, Garello K, Gaudin G, Zermatten P J, Costache M V, Auffret S, Bandiera S, Rodmacq B, Schulh A, Gambardella P 2011 *Nature* **476** 189
- [3] Liu L Q, Pai C F, Li Y, Tseng H W, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Science* **336** 555
- [4] Qiu X P, Shi Z, Fan W J, Zhou S M, Yang H 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705699
- [5] Manchon A, Zelezny J, Miron I M, Jungwirth T, Sinova J, Thiaville A, Garello K, Gambardella P 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91**
- [6] Li Y, Edmonds K W, Liu X, Zheng H, Wang K 2019 *Advanced Quantum Technologies* **2** 1800052
- [7] Song C, Zhang R, Liao L, Zhou Y, Zhou X, Chen R, You Y, Chen X, Pan F 2020 *Prog. Mater. Sci.* DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100761
- [8] Liu L Q, Pai C F, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 186602
- [9] Pai C F, Liu L Q, Li Y, Tseng H W, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 122404
- [10] Yu G Q, Upadhyaya P, Wong K L, Jiang W J, Alzate J G, Tang J S, Amiri P K, Wang K L 2014 *Phys. Rev. B* **89** 104421
- [11] Yu G Q, Upadhyaya P, Fan Y B, Alzate J G, Jiang W J, Wong K L, Takei S, Bender S A, Chang L T, Jiang Y, Lang M R, Tang J S, Wang Y, Tserkovnyak Y, Amiri P K, Wang K L 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 548
- [12] You L, Lee O, Bhowmik D, Labanowski D, Hong J, Bokor J, Salahuddin S 2015 *P. Natl. Acad. Sci. USA* **112** 10310
- [13] Qiu X P, Narayanapillai K, Wu Y, Deorani P, Yang D H, Noh W S, Park J H, Lee K J, Lee H W, Yang H 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 333
- [14] Lau Y C, Betto D, Rode K, Coey J M D, Stamenov P 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 758
- [15] Zhang W F, Han W, Jiang X, Yang S H, Parkin S S P 2015 *Nat. Phys.* **11** 496
- [16] Cai K M, Yang M Y, Ju H L, Wang S M, Ji Y, Li B H, Edmonds K W, Sheng Y, Zhang B, Zhang N, Liu S, Zheng H Z, Wang K Y 2017 *Nat. Mater.* **16** 712
- [17] Wang M X, Cai W L, Zhu D Q, Wang Z H, Kan J, Zhao Z Y, Cao K H, Wang Z L, Zhang Y G, Zhang T R, Park C, Wang J P, Fert A, Zhao W S 2018 *Nat. Electron.* **1** 582
- [18] Cao Y, Sheng Y, Edmonds K W, Ji Y, Zheng H Z, Wang K Y 2020 *Adv. Mater.* **32** 1907929
- [19] An H Y, Ohno T, Kanno Y, Kageyama Y, Monnai Y, Maki H, Shi J, Ando K 2018 *Sci. Adv.* **4** eaar2250
- [20] Kong W J, Wan C H, Wang X, Tao B S, Huang L, Fang C, Guo C Y, Guang Y, Irfan M, Han X F 2019 *Nat. Commun.* **10** 233
- [21] Mellnik A R, Lee J S, Richardella A, Grab J L, Mintun P J, Fischer M H, Vaezi A, Manchon A, Kim E A, Samarth N, Ralph D C 2014 *Nature* **511** 449
- [22] Fan Y B, Upadhyaya P, Kou X F, Lang M R, Takei S, Wang Z X, Tang J S, He L, Chang L T, Montazeri M, Yu G Q, Jiang W J, Nie T X, Schwartz R N, Tserkovnyak Y, Wang K L 2014 *Nat. Mater.* **13** 699
- [23] Han J, Richardella A, Siddiqui S A, Finley J, Samarth N, Liu L 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 077702
- [24] Wu H, Xu Y, Deng P, Pan Q J, Razavi S A, Wong K, Huang L, Dai B Q, Shao Q M, Yu G Q, Han X F, Rojas-Sanchez J C, Mangin S, Wang K L 2019 *Adv. Mater.* **31** 1901681
- [25] Wang Y, Zhu D P, Yang Y M, Lee K, Mishra R, Go G, Oh S H, Kim D H, Cai K M, Liu E L, Pollard S D, Shi S Y, Lee J, Teo K L, Wu Y H, Lee K J, Yang H 2019 *Science* **366** 1125
- [26] Sheng Y, Zhang N, Wang K Y, Ma X Q 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 117501 (in Chinese) [盛宇, 张楠, 王开友, 马星桥 2018 物理学报 **67** 117501]
- [27] Feng X Y, Zhang H W, Zhang Y, Zhong R, Lu B W, Cao J W, Fan X L 2019 *Chin. Phys. B* **28** 107105
- [28] Emori S, Bauer U, Ahn S M, Martinez E, Beach G S D 2013 *Nat. Mater.* **12** 611
- [29] Ryu K S, Thomas L, Yang S H, Parkin S 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 527
- [30] Fukami S, Zhang C L, DuttaGupta S, Kurenkov A, Ohno H 2016 *Nat. Mater.* **15** 535
- [31] Jiang W J, Upadhyaya P, Zhang W, Yu G Q, Jungfleisch M B, Fradin F Y, Pearson J E, Tserkovnyak Y, Wang K L, Heinonen O, te Velthuis S G E, Hoffmann A 2015 *Science* **349** 283
- [32] Yu G, Upadhyaya P, Li X, Li W, Kim S K, Fan Y, Wong K

- L, Tserkovnyak Y, Amiri P K, Wang K L 2016 *Nano Lett.* **16** 1981
- [33] Jiang W, Zhang X, Yu G, Zhang W, Wang X, Benjamin Jungfleisch M, Pearson John E, Cheng X, Heinonen O, Wang K L, Zhou Y, Hoffmann A, te Velthuis Suzanne G E 2016 *Nat. Phys.* **13** 162
- [34] Yu G Q, Upadhyaya P, Shao Q M, Wu H, Yin G, Li X, He C L, Jiang W J, Han X F, Amiri P K, Wang K L 2017 *Nano Lett.* **17** 261
- [35] Yu G Q, Jenkins A, Ma X, Razavi S A, He C L, Yin G, Shao Q M, He Q L, Wu H, Li W J, Jiang W J, Han X F, Li X Q, Jayich A C B, Amiri P K, Wang K L 2018 *Nano Lett.* **18** 980
- [36] Bhowmik D, You L, Salahuddin S 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 59
- [37] Wan C H, Zhang X, Yuan Z H, Fang C, Kong W J, Zhang Q T, Wu H, Khan U, Han X F 2017 *Adv. Electron. Mater.* **3** 1600282
- [38] Wang X, Wan C H, Kong W J, Zhang X, Xing Y W, Fang C, Tao B S, Yang W L, Huang L, Wu H, Irfan M, Han X F 2018 *Adv. Mater.* **30** 1801318
- [39] Zhang S, Luo S J, Xu N, Zou Q M, Song M, Yun J J, Luo Q, Guo Z, Li R F, Tian W C, Li X, Zhou H G, Chen H M, Zhang Y, Yang X F, Jiang W J, Shen K, Hong J M, Yuan Z, Xi L, Xia K, Salahuddin S, Dieny B, You L 2019 *Adv. Electron. Mater.* **5** 1800782
- [40] Wadley P, Howells B, Zelezny J, Andrews C, Hills V, Campion R P, Novak V, Olejnik K, Maccherozzi F, Dhesi S S, Martin S Y, Wagner T, Wunderlich J, Freimuth F, Mokrousov Y, Kunes J, Chauhan J S, Grzybowski M J, Rushforth A W, Edmonds K W, Gallagher B L, Jungwirth T 2016 *Science* **351** 587
- [41] Chen X Z, Zarzuela R, Zhang J, Song C, Zhou X F, Shi G Y, Li F, Zhou H A, Jiang W J, Pan F, Tserkovnyak Y 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 207204
- [42] Peng S Z, Zhu D Q, Li W X, Wu H, Grutter A J, Gilbert D A, Lu J Q, Xiong D R, Cai W L, Shafer P, Wang K L, Zhao W S 2020 *Nat. Electron.* **3** 757
- [43] Liu L Q, Moriyama T, Ralph D C, Buhrman R A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 036601
- [44] He C L, Navabi A, Shao Q M, Yu G Q, Di Wu D, Zhu W H, Zheng C, Li X, He Q L, Razavi S A, Wong K L, Zhang Z Z, Amiri P K, Wang K L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 202404
- [45] He C L, Razavi A, Wei J W, Xu H J, Yu G Q, Wong K L, Wu H, Shen S P, Chen Q Q, Zeng Z M, Wang S G, Wang K L 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 172406
- [46] He C L, Razavi S A, Yu G Q, Ma X, Wu H, Shao Q M, Wong K L, Shen S P, Zhao Y C, Pei Y S, Chen Q Q, Li X Q, Wang S G, Wang K L 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 242407
- [47] Wei J W, He C L, Wang X, Xu H J, Liu Y Z, Guang Y, Wan C H, Feng J F, Yu G Q, Han X F 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 034041
- [48] Han W 2016 *Appl. Mater.* **4** 032401
- [49] Lin X Y, Yang W, Wang K L, Zhao W S 2019 *Nat. Electron.* **2** 274
- [50] Li X, Dong B, Sun X, Wang H, Yang T, Yu G, Vitto Han Z 2019 *J. Semicond.* **40** 081508
- [51] Yang S X, Zhang T L, Jiang C B 2020 *Adv. Sci.* 2002488
- [52] Liu Y T, Shao A M 2020 *ACS Nano* **14** 9389
- [53] Han W, Otani Y, Maekawa S 2018 *Npj Quant. Mater.* **3** 27
- [54] Yan B H, Felser C 2017 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **8** 337
- [55] Song P, Hsu C H, Vignale G, Zhao M, Liu J W, Deng Y J, Fu W, Liu Y P, Zhang Y B, Lin H, Pereira V M, Loh K P 2020 *Nat. Mater.* **19** 292
- [56] Safeer C K, Ontoso N, Ingla-Aynes J, Herling F, Pham V T, Kurzman A, Ensslin K, Chuvilin A, Robredo I, Vergniory M G, de Juan F, Hueso L E, Calvo M R, Casanova F 2019 *Nano Lett.* **19** 8758
- [57] Qian X F, Liu J W, Fu L, Li J 2014 *Science* **346** 1344
- [58] MacNeill D, Stiehl G M, Guimaraes M H D, Buhrman R A, Park J, Ralph D C 2017 *Nat. Phys.* **13** 300
- [59] Zhang W, Sklenar J, Hsu B, Jiang W J, Jungfleisch M B, Xiao J, Fradin F Y, Liu Y H, Pearson J E, Ketterson J B, Yang Z, Hoffmann A 2016 *Appl. Mater.* **4** 032302
- [60] Shao Q M, Yu G Q, Lan Y W, Shi Y M, Li M Y, Zheng C, Zhu X D, Li L J, Amiri P K, Wang K L 2016 *Nano Lett.* **16** 7514
- [61] Lv W M, Jia Z Y, Wang B C, Lu Y, Luo X, Zhang B S, Zeng Z M, Liu Z Y 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 2843
- [62] Shi S Y, Liang S H, Zhu Z F, Cai K M, Pollard S D, Wang Y, Wang J Y, Wang Q S, He P, Yu J W, Eda G, Liang G C, Yang H 2019 *Nat. Nanotech.* **14** 945
- [63] Li P, Wu W K, Wen Y, Zhang C H, Zhang J W, Zhang S F, Yu Z M, Yang S Y A, Manchon A, Zhang X X 2018 *Nat. Commun.* **9** 3990
- [64] Stiehl G M, MacNeill D, Sivasdas N, El Baggari I, Guimaraes M H D, Reynolds N D, Kourkoutis L F, Fennie C J, Buhrman R A, Ralph D C 2019 *ACS Nano* **13** 2599
- [65] Stiehl G M, Li R F, Gupta V, El Baggari I, Jiang S W, Xie H C, Kourkoutis L F, Mak K F, Shan J, Buhrman R A, Ralph D C 2019 *Phys. Rev. B* **100** 184402
- [66] Guimaraes M H D, Stiehl G M, MacNeill D, Reynolds N D, Ralph D C 2018 *Nano Lett.* **18** 1311
- [67] MacNeill D, Stiehl G M, Guimaraes M H D, Reynolds N D, Buhrman R A, Ralph D C 2017 *Phys. Rev. B* **96** 054450
- [68] Xu H J, Wei J W, Zhou H G, Feng J F, Xu T, Du H F, He C L, Huang Y, Zhang J W, Liu Y Z, Wu H C, Guo C Y, Wang X, Guang Y, Wei H X, Peng Y, Jiang W J, Yu G Q, Han X F 2020 *Adv. Mater.* **32** 2000513
- [69] Husain S, Chen X, Gupta R, Behera N, Kumar P, Edvinsson T, Garcia-Sanchez F, Brucas R, Chaudhary S, Sanyal B, Svedlindh P, Kumar A 2020 *Nano Lett.* **20** 6372
- [70] Liang S H, Shi S Y, Hsu C H, Cai K M, Wang Y, He P, Wu Y, Pereira V M, Yang H 2020 *Adv. Mater.* **32** 2002799
- [71] Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E, Klein D R, Cheng R, Seyler K L, Zhong D, Schmidgall E, McGuire M A, Cobden D H, Yao W, Xiao D, Jarillo-Herrero P, Xu X D 2017 *Nature* **546** 270
- [72] Gong C, Li L, Li Z L, Ji H W, Stern A, Xia Y, Cao T, Bao W, Wang C Z, Wang Y A, Qiu Z Q, Cava R J, Louie S G, Xia J, Zhang X 2017 *Nature* **546** 265
- [73] Deng Y J, Yu Y J, Song Y C, Zhang J Z, Wang N Z, Sun Z Y, Yi Y F, Wu Y Z, Wu S W, Zhu J Y, Wang J, Chen X H, Zhang Y B 2018 *Nature* **563** 94
- [74] Gong C, Zhang X 2019 *Science* **363** 706
- [75] Zhang W, Wong P K J, Zhu R, Wee A T S 2019 *Info.Mat.* **1** 479
- [76] Gibertini M, Koperski M, Morpurgo A F, Novoselov K S 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 408
- [77] Wang Z, Zhang T Y, Ding M, Dong B J, Li Y X, Chen M L, Li X X, Huang J Q, Wang H W, Zhao X T, Li Y, Li D, Jia C K, Sun L D, Guo H H, Ye Y, Sun D M, Chen Y S, Yang T, Zhang J, Ono S P, Han Z, Zhang Z D 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 554

- [78] Song T C, Cai X H, Tu M W Y, Zhang X O, Huang B V, Wilson N P, Seyler K L, Zhu L, Taniguchi T, Watanabe K, McGuire M A, Cobden D H, Xiao D, Yao W, Xu X D 2018 *Science* **360** 1214
- [79] Hu C, Zhang D, Yan F G, Li Y C, Lv Q S, Zhu W K, Wei Z M, Chang K, Wang K Y 2020 *Sci. Bull.* **65** 1072
- [80] Lin H L, Yan F G, Hu C, Lv Q S, Zhu W K, Wang Z A, Wei Z M, Chang K, Wang K Y 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 43921
- [81] Han M-G, Garlow J A, Liu Y, Zhang H, Li J, DiMarzio D, Knight M W, Petrovic C, Jariwala D, Zhu Y 2019 *Nano Lett.* **19** 7859
- [82] Ding B, Li Z, Xu G, Li H, Hou Z, Liu E, Xi X, Xu F, Yao Y, Wang W 2020 *Nano Lett.* **20** 868
- [83] Wu Y, Zhang S, Zhang J, Wang W, Zhu Y L, Hu J, Yin G, Wong K, Fang C, Wan C, Han X, Shao Q, Taniguchi T, Watanabe K, Zang J, Mao Z, Zhang X, Wang K L 2020 *Nat. Commun.* **11** 3860
- [84] Park T E, Peng L C, Liang J H, Hallal A, Yasin F S, Zhang X C, Kim S J, Song K M, Kim K, Weigand M, Schuetz G, Finizio S, Raabe J, Woo S 2019 [arXiv: 1907.01425v4](https://arxiv.org/abs/1907.01425v4)
- [85] Yang M, Li Q, Chopdekar R V, Dhall R, Turner J, Carlstrom J D, Ophus C, Klewe C, Shafer P, N'Diaye A T, Choi J W, Chen G, Wu Y Z, Hwang C, Wang F, Qiu Z Q 2020 *Sci. Adv.* **6** eabb5157
- [86] Gao Y, Yin Q W, Wang Q, Li Z L, Cai J W, Zhao T Y, Lei H C, Wang S G, Zhang Y, Shen B G 2020 *Adv. Mater.* **32** 2005228
- [87] Wang H, Wang C, Li Z A, Tian H, Shi Y, Yang H, Li J 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 192403
- [88] Wang X, Tang J, Xia X X, He C L, Zhang J W, Liu Y Z, Wan C H, Fang C, Guo C Y, Yang W L, Guang Y, Zhang X M, Xu H J, Wei J W, Liao M Z, Lu X B, Feng J F, Li X X, Peng Y, Wei H X, Yang R, Shi D X, Zhang X, Han Z, Zhang Z D, Zhang G Y, Yu G, Han X F 2019 *Sci. Adv.* **5** eaaw8904
- [89] Alghamdi M, Lohmann M, Li J X, Jothi P R, Shao Q M, Aldosary M, Su T, Fokwa B P T, Shi J 2019 *Nano Lett.* **19** 4400
- [90] Zhang K, Han S, Lee Y, Coak M J, Kim J, Hwang I, Son S, Shin J, Lim M, Jo D, Kim K, Kim D, Lee H W, Park J G 2020 *Adv. Mater.* **33** 2004110
- [91] Ostwal V, Shen T, Appenzeller J 2020 *Adv. Mater.* **32** 1906021
- [92] Gupta V, Cham T M, Stiehl G M, Bose A, Mittelstaedt J A, Kang K, Jiang S, Mak K F, Shan J, Buhrman R A, Ralph D C 2020 *Nano Lett.* **20** 7482
- [93] Shao Y, Lv W X, Guo J J, Qi B T, Lv W M, Li S K, Guo G H, Zeng Z M 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116**
- [94] Lee J, Mak K F, Shan J 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 421
- [95] Barre E, Incorvia J A C, Kim S H, McClellan C J, Pop E, Wong H S P, Heinz T F 2019 *Nano Lett.* **19** 770
- [96] Lee J, Wang Z F, Xie H C, Mak K F, Shan J 2017 *Nat. Mater.* **16** 887
- [97] Hung T Y T, Rustagi A, Zhang S J, Upadhyaya P, Chen Z H 2020 *InfoMat* **2** 968
- [98] Li Q, Yang M M, Gong C, Chopdekar R V, N'Diaye A T, Turner J, Chen G, Schol A, Shafer P, Arenholz E, Schmid A K, Wang S, Liu K, Gao N, Admasu A S, Cheong S W, Hwang C Y, Li J, Wang F, Zhang X, Qiu Z Q 2018 *Nano Lett.* **18** 5974
- [99] Idzuchi H, Alleca A E L, Pan X C, Tanigaki K, Chen Y P 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 232403
- [100] Yang M, Li Q, Chopdekar R V, Stan C, Cabrini S, Choi J W, Wang S, Wang T, Gao N, Scholl A, Tamura N, Hwang C, Wang F, Qiu Z 2020 *Adv. Quant. Technol.* **3** 2000017
- [101] Bonilla M, Kolekar S, Ma Y J, Diaz H C, Kalappattil V, Das R, Eggers T, Gutierrez H R, Phan M H, Batzill M 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 289
- [102] Sun X D, Li W Y, Wang X, Sui Q, Zhang T Y, Wang Z, Liu L, Li D, Feng S, Zhong S Y, Wang H W, Bouchiat V, Regueiro M N, Rougemaille N, Coraux J, Purbawati A, Hadj-Azzem A, Wang Z H, Dong B J, Wu X, Yang T, Yu G Q, Wang B W, Han Z, Han X F, Zhang Z D 2020 *Nano Res.* **13** 3358
- [103] Wen Y, Liu Z H, Zhang Y, Xia C X, Zhai B X, Zhang X H, Zhai G H, Shen C, He P, Cheng R Q, Yin L, Yao Y Y, Sendeku M G, Wang Z X, Ye X B, Liu C S, Jiang C, Shan C X, Long Y W, He J 2020 *Nano Lett.* **20** 3130
- [104] Yu H, Liao M Z, Zhao W J, Liu G D, Zhou X J, Wei Z, Xu X Z, Liu K H, Hu Z H, Deng K, Zhou S Y, Shi J A, Gu L, Shen C, Zhang T T, Du L J, Xie L, Zhu J Q, Chen W, Yang R, Shi D X, Zhang G Y 2017 *ACS Nano* **11** 12001
- [105] Wang Q, Li N, Tang J, Zhu J, Zhang Q, Jia Q, Lu Y, Wei Z, Yu H, Zhao Y, Guo Y, Gu L, Sun G, Yang W, Yang R, Shi D, Zhang G 2020 *Nano Lett.* **20** 7193
- [106] Li N, Wang Q Q, Shen C, Wei Z, Yu H, Zhao J, Lu X B, Wang G L, He C L, Xie L, Zhu J Q, Du L J, Yang R, Shi D X, Zhang G Y 2020 *Nat. Electron.* **3** 711
- [107] Liu S S, Yuan X, Zou Y C, Sheng Y, Huang C, Zhang E Z, Ling J W, Liu Y W, Wang W Y, Zhang C, Zou J, Wang K Y, Xiu F X 2017 *Npj 2D Mater. Appl.* **1** 37
- [108] Wang H Y, Liu Y J, Wu P C, Hou W J, Jiang Y H, Li X H, Pandey C, Chen D D, Yang Q, Wang H T, Wei D H, Lei N, Kang W, Wen L G, Nie T X, Zhao W S, Wang K L 2020 *ACS Nano* **14** 10045
- [109] Zheng Z Y, Zhang Y, Zhu D Q, Zhang K, Feng X Q, He Y, Chen L, Zhang Z Z, Liu D J, Zhang Y G, Amiri P K A, Zhao W S 2020 *Chin. Phys. B* **29** 078505
- [110] Guo Q X, Wu Y, Xu L X, Gong Y, Ou Y B, Liu Y, Li L L, Yan Y, Han G, Wang D W, Wang L H, Long S B, Zhang B W, Cao X, Yang S W, Wang X M, Huang Y Z, Liu T, Yu G H, He K, Teng J 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 057301

SPECIAL TOPIC—Two-dimensional magnetic materials

Research progress of spin-orbit torques based on two-dimensional materials*

He Cong-Li¹⁾ Xu Hong-Jun²⁾ Tang Jian²⁾ Wang Xiao²⁾ Wei Jin-Wu²⁾
 Shen Shi-Peng¹⁾ Chen Qing-Qiang¹⁾ Shao Qi-Ming³⁾ Yu Guo-Qiang²⁾
 Zhang Guang-Yu²⁾ Wang Shou-Guo^{1)†}

1) (*Institute of Advanced Materials, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

2) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*Department of Electronic and Computer Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China*)

(Received 2 January 2021; revised manuscript received 24 January 2021)

Abstract

The spin-orbit torque generated by charge current in a strong spin-orbit coupling material provides a fast and efficient way to manipulate the magnetic moment in adjacent magnetic layers, which is expected to be used for developing low-power, high-performance spintronic devices. Two-dimensional materials have attracted great attention, for example, they have abundant species, a variety of crystal structures and symmetries, good adjustability of spin-orbit coupling strength and conductivity, and good ability to overcome the lattice mismatch to form high-quality heterojunctions, thereby providing a unique platform for studying the spin-orbit torques. This paper covers the latest research progress of spin-orbital torques in two-dimensional materials and their heterostructures, including their generations, characteristics, and magnetization manipulations in the heterostructures based on non-magnetic two-dimensional materials (such as MoS₂, WSe₂, WS₂, WTe₂, TaTe₂, MoTe₂, NbSe₂, PtTe₂, TaS₂, etc.) and magnetic two-dimensional materials (such as Fe₃GeTe₂, Cr₂Ge₂Te₆, etc.). Finally, some problems remaining to be solved and challenges are pointed out, and the possible research directions and potential applications of two-dimensional material spin-orbit torque are also proposed.

Keywords: two-dimensional materials, spin-orbit coupling, spin-orbit torque, current-driven magnetization switching

PACS: 75.47.-m, 85.75.-d, 71.70.Ej, 77.80.Fm

DOI: 10.7498/aps.70.20210004

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51901025, 60573172, 51625101), the Key Program of the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant Nos. Z190007, Z190009), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 310421101), and the Hong Kong Research Grants Council, China (Grant No. ECS26200520).

† Corresponding author. E-mail: sgwang@bnu.edu.cn