

专题: 二维及拓扑自旋物理

# 基于外尔半金属 $WTe_2$ 的自旋-轨道矩 驱动磁矩翻转\*

魏陆军 李阳辉 普勇†

(南京邮电大学理学院, 江苏省新能源技术工程实验室, 南京 210023)

(2023年11月21日收到; 2024年1月3日收到修改稿)

外尔半金属  $WTe_2$  有强自旋轨道耦合且能产生新奇非常规面外极化的自旋流, 是近几年的新兴热点. 同时  $WTe_2$  还具有高的电荷-自旋转换效率, 能在无外磁场辅助的情况下实现垂直磁矩确定性的翻转, 这对于高密度集成低功耗磁随机存取存储器至关重要. 本文回顾了近几年  $WTe_2$  与铁磁层组成异质结构中自旋轨道矩研究的最新进展, 包括用不同方法制备的  $WTe_2$  (例如机械剥离和化学气相沉积) 与铁磁层 (例如 FeNi 和 CoFeB 等)、二维磁体 (例如  $Fe_3GeTe_2$  等) 组成异质结的自旋轨道矩探测和磁矩翻转的电调控研究进展. 最后, 对相关研究的发展提出展望.

**关键词:**  $WTe_2$ , 自旋轨道矩, 磁矩翻转的电调控**PACS:** 85.75.-d, 71.70.Ej, 77.80.Fm**DOI:** 10.7498/aps.73.20231836

## 1 引言

在过去三十年中, 巨磁电阻和隧穿磁电阻的发现已经显著提高了硬盘存储密度<sup>[1-3]</sup>. 随着自旋电子学的快速发展, 新型的自旋电子器件, 如赛道存储器和磁随机存取存储器 (magnetic random accessory memory, MRAM) 等, 在后摩尔时代展现出了巨大的潜力<sup>[4,5]</sup>. 这些自旋电子器件的功耗和存储速度取决于调控磁矩翻转的方法. 最传统的方法是利用外加电流产生磁场来调控磁矩翻转, 然而由于其功耗高、密度低且伴随有杂散场产生, 因此不利于高性能器件实际的应用. 为了解决这个难题, 在过去的二十多年里, 研究者们利用电流诱导的力矩来操控磁矩翻转<sup>[6-10]</sup>. 最初是利用自旋转移矩 (spin-transfer torque, STT) 效应, 即电子被一层铁磁层自旋极化, 自旋极化的电子影响另一铁磁

层的磁化翻转的现象<sup>[8,11]</sup>. 现在已被用于制造商用 STT-MRAMs. 尽管 STT 有很多优点, 然而, 过高的临界翻转电流密度会增加绝缘隧穿层击穿的风险, 从而对器件的稳定性产生负面影响<sup>[12,13]</sup>.

另一种方法是电流诱导的自旋轨道矩 (spin-orbit torque, SOT), 这最近已成为一种很有前途的高效操控磁化翻转的技术<sup>[9,10,14]</sup>. 最典型的 SOT 结构包括铁磁 (ferromagnetic, FM)/非磁金属 (normal metal, NM) 异质结. 当电流在 FM/NM 中流动时, 由于体或界面自旋轨道耦合作用, NM 中电流会转化为自旋流, 然后在 FM/NM 界面聚积, 并扩散到相邻的 FM 层, 使自旋流通过角动量传递对局部磁矩施加力矩. SOT 的根本起源在于 NM 层的强自旋轨道耦合 (spin-orbit coupling, SOC), 且广泛用于磁矩的电调控, 如快速磁化开关、高速磁畴壁运动和自旋波激发<sup>[9,10,14-18]</sup>. 与 STT 器件相比, 电流不需要经过隧道结层, 且自旋转换效率较

\* 国家自然科学基金 (批准号: 52001169, 61874060, U1932159, 61911530220) 和南京邮电大学引进人才科研启动基金 (批准号: NY219164, NY217118) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yongpu@njupt.edu.cn

高. 因此 SOT 器件具有稳定性更高、响应速度更快和能耗更低等优点. 为了更高效地产生自旋流和实现磁矩翻转的电调控, 必须增强 NM 层的 SOC 强度. 同时, 为了构建具有强 SOC 的 NM/FM 异质结, 过去人们探索了大量的 NM 材料. 在先前的研究中, Pt, W 和 Ta 等 5d 重金属因具有较强的 SOC 而被广泛用作自旋源材料<sup>[10,14,19]</sup>. 然而, 这些材料的自旋霍尔角 (spin Hall angle, SHA) 通常小于 1<sup>[20,21]</sup>. 对于 SOT 翻转垂直磁化而言, 这些材料通常需要打破对称性才能实现<sup>[22-28]</sup>. 然而, 克服这一限制通常采用复杂的制造工艺或额外的磁性层, 这会降低存储密度和器件的耐久性. 因此, 迫切需要寻找具有强 SOC 的新型材料来提高 SOT 效率, 同时能实现零磁场垂直磁化翻转.

作为一种替代方案, 二维范德瓦耳斯 (van der Waals, vdW) 层状材料最近被提出可以作为 SOT 器件的自旋源材料. 在各种 vdW 材料中, 过渡金属硫族化合物 (transition metal dichalcogenides, TMDs) 因其具有非平凡的能带结构、可调电导率和强 SOC 而成为有前途的候选材料<sup>[29-31]</sup>. TMDs 在 SOT 应用中表现出诸多优势, 如设计晶体对称和电场来调控 SOT 的强度、SOT 效率高于 NMs 及其可以扩展到原子层极限<sup>[32,33]</sup>. 最近的研究表明外尔半金属也具有非平凡能带结构<sup>[34,35]</sup>, 可引起明

显的 Edelstein 效应, 且其比拓扑绝缘体或 Rashba 体系的强一个数量级. 同时在外尔半金属中, 体态产生的强烈本征自旋霍尔效应也有助于自旋流的产生<sup>[36]</sup>. 与其他新型的二维自旋源材料 (如 MoS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub> 和 WS<sub>2</sub> 等) 相比, 二维外尔半金属材料具备更低的对称性, 以满足产生非传统 SOT 所需的对称性要求, 并且拥有更高的电导率, 从而可能降低磁矩翻转操作的功耗. 尤其 Td 相的 WTe<sub>2</sub> 具有很强的 SOC 和在表面态和体态中都具有受时间反演对称性保护的大自旋极化的非平凡能带结构<sup>[34,37]</sup>. 同时对于低对称性结构的 WTe<sub>2</sub> 具有更强的 SOC, 既可以产生常规的面内类阻尼矩 ( $\tau_S$ ), 也可以产生非常规的面外类阻尼矩 ( $\tau_B$ )<sup>[32,38]</sup>. 最近研究者利用 WTe<sub>2</sub> 已经实现了零磁场低温和室温下磁矩翻转的电调控<sup>[39-44]</sup>, 这为研究新型自旋电子器件提供了很有价值的参考. 表 1 汇总了已报道的实验研究工作中 WTe<sub>2</sub> 晶体的制备方法、铁磁层材料以及 WTe<sub>2</sub>/FM 异质结的 SOT 的表征方法、测试温度和自旋霍尔电导率<sup>[32,38-43,45-47]</sup>.

本综述首先总结了基于 WTe<sub>2</sub> 的异质结的自旋轨道矩的研究的最新实验进展, 然后介绍了 WTe<sub>2</sub>/FM 异质结的自旋轨道矩的探测和磁矩翻转的电调控相关工作, 最后提出 WTe<sub>2</sub> 实际应用要求, 并进行总结和展望.

表 1 实验研究工作中 WTe<sub>2</sub> 晶体的制备方法、铁磁层材料和 WTe<sub>2</sub>/FM 异质结的 SOT 的表征方法、测试温度和自旋霍尔电导率

Table 1. Preparation method of WTe<sub>2</sub> crystal, FM material, measurement method, experimental temperature and spin Hall conductivity for SOT in WTe<sub>2</sub>/FM heterostructures.

制备方法	铁磁层材料	表征方法	测试温度/K	自旋霍尔电导率/ $10^3 (h/2e)(\Omega \cdot m)^{-1}$	文献
Exfoliation	Py	ST-FMR	300	$\sigma_S = 8 \pm 2$ $\sigma_A = 9 \pm 3$ $\sigma_B = 3.6 \pm 0.8$	[38]
	Py	SHH/ST-FMR	300	$\sigma_S, \sigma_T, \sigma_A, \sigma_B$ observed	[32]
	Py	ST-FMR/SHH	300	$\sigma_S, \sigma_A, \sigma_B$ observed	[45]
	Fe <sub>2.78</sub> GeTe <sub>2</sub>	AHE loop shift	150—190	$\sigma_B$ observed	[39]
	Fe <sub>3</sub> GeTe <sub>2</sub>	Current-driven MS	110—135	$\sigma_B$ observed	[40]
	Fe <sub>3</sub> GeTe <sub>2</sub>	AHE loop shift	120	$\sigma_B$ observed	[41]
	SrRuO <sub>3</sub>	AHE loop shift	40	$\sigma_B$ observed	[43]
CVD	CoTb	SHH	300	$\sigma_S, \sigma_T$ observed	[46]
	FeNi	ST-FMR	300	$\sigma_{OP} = 1.76$ $\sigma_{IP} = 7.36$	[47]
	CoFeB	AHE loop shift/SHH	300	$\sigma_{OP} = 2.05 \pm 0.39$ $\sigma_{IP} = 3.58 \pm 0.12$	[42]

注:  $\sigma_S, \sigma_T, \sigma_B$  和  $\sigma_A$  分别表示面内类阻尼SOT、面内类场SOT、面外类阻尼SOT和面外类场SOT相关的自旋霍尔电导率;  $\sigma_{OP}$ 和 $\sigma_{IP}$ 分别表示面外和面内自旋霍尔电导率; ST-FMR, SHH, AHE loop shift和Current-driven MS分别表示自旋力矩-铁磁共振、二次谐波测量技术、反常霍尔效应回线偏移和电流驱动的磁化开关测试测试方法; CVD表示化学气相沉积.

## 2 WTe<sub>2</sub>/FM 异质结自旋轨道矩的研究

外尔半金属 WTe<sub>2</sub> 具有很强的 SOC<sup>[37,48,49]</sup> 和较高的电子迁移率<sup>[50]</sup>, 这使其成为一种极具潜力的自旋源材料. WTe<sub>2</sub> 和其他过渡金属二硫化物一样具有层状结构, 但由于其额外的结构畸变导致较低的晶体对称性, 即缺乏反演对称性, 其空间群为  $Pmn2_1$ <sup>[51]</sup>. 对于 WTe<sub>2</sub>/FM 异质结构中, 旋转轴和滑移面对称在界面处被打破, 因此它只有一种对称, 即相对于  $bc$  平面的镜像对称 (图 1). 在  $ac$  平面上没有镜像对称, 因此没有关于  $c$  轴的 180° 旋转对称 (垂直于  $ab$  平面).

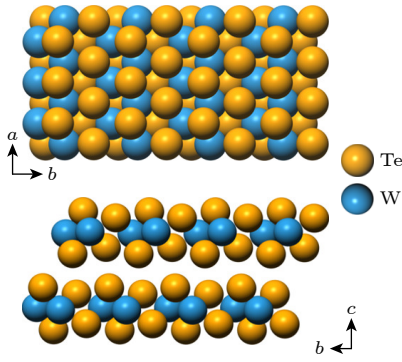


图 1 WTe<sub>2</sub> 晶体结构  
Fig. 1. Crystal structure of WTe<sub>2</sub>.

在 2016 年, MacNeill 等<sup>[38]</sup> 利用自旋力矩-铁磁共振 (spin-torque ferromagnetic resonance, ST-FMR) 技术首次在机械剥离的 WTe<sub>2</sub>/Py (Py = Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>) 异质结构中发现存在面外类阻尼矩 ( $\tau_B$ ). 他们在研究中发现, 当微波电流沿  $a$  轴 (低对称轴) 时, 公式  $V_A(\phi) = A \cos(\phi) \sin(2\phi) + B \sin(2\phi)$  能很好地拟合反对称电压信号  $V_A$  的角度依赖特性, 表明产生的面外 SOT 除了有传统的面外类场矩 ( $\tau_A$ ), 还有  $\tau_B$  的贡献. 然而, 当微波电流沿着  $b$  轴 (高对称轴) 时, 额外项 ( $B \sin(2\phi)$ ) 消失, 说明此时只存在传统的  $\tau_A$ . 当微波电流从  $a$  轴逐渐变到  $b$  轴时,  $\tau_B/\tau_A$  逐渐减小甚至为零, 这证明了观察到面外 SOT 与 WTe<sub>2</sub> 晶体中的对称性相关. 进一步研究发现,  $\tau_B/\tau_A$  和  $\tau_S/\tau_A$  ( $\tau_S$  表示面内类阻尼矩) 都与 WTe<sub>2</sub> 的厚度无关, 表明这 3 个力矩 ( $\tau_S$ ,  $\tau_A$  和  $\tau_B$ ) 的产生主要是 WTe<sub>2</sub>/Py 异质结的界面效应引起的. 此外, 当微波电流沿着低对称轴时, 他们还得到:

$$\sigma_S = (8 \pm 2) \times 10^3 (\hbar/2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1},$$

$$\sigma_A = (9 \pm 3) \times 10^3 (\hbar/2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1},$$

$$\sigma_B = (3.6 \pm 0.8) \times 10^3 (\hbar/2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}.$$

2017 年, MacNeill 等<sup>[32]</sup> 利用二次谐波霍尔 (second-harmonic Hall, SHH) 和 ST-FMR 技术也研究了 WTe<sub>2</sub>/Py 异质结中 SOT 与 WTe<sub>2</sub> 厚度的关系, 进一步证实了面外类阻尼矩的存在, 且其大小与 WTe<sub>2</sub> 厚度几乎没有关系 (图 2(a)), 即使是单层 WTe<sub>2</sub> 样品也能提供与更厚的样品相当的 SOT. 然而, 面外类场矩与 WTe<sub>2</sub> 厚度具有显著的关系, 主要起源于奥斯特场. 同时, 在具有单层台阶 WTe<sub>2</sub> 的样品中发现符号相反的面外类阻尼矩. 在 WTe<sub>2</sub>/Py 器件中, SHH 电压的角度依赖性表明单层和双层 WTe<sub>2</sub> 的样品的  $\tau_B$  符号相反 (图 2(b)), 这些发现与 WTe<sub>2</sub> 晶体的非对称性相一致.

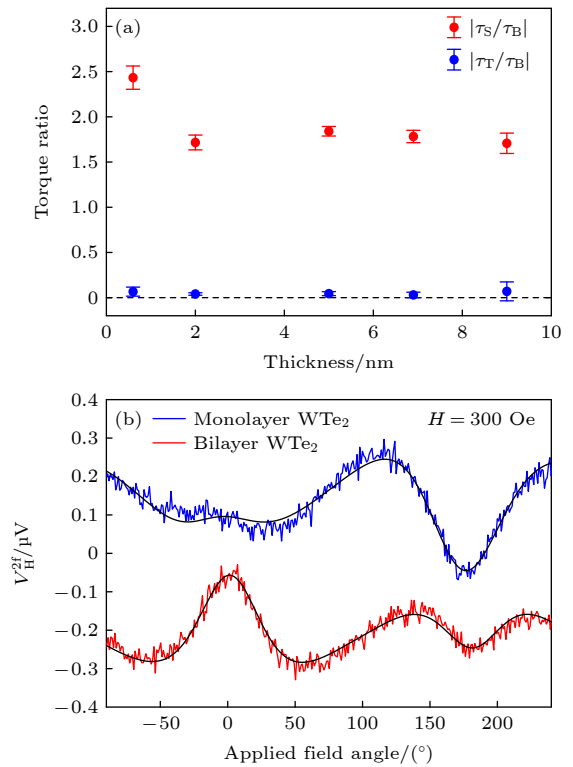


图 2 (a)  $\tau_S/\tau_B$  和  $\tau_T/\tau_B$  分别与 WTe<sub>2</sub> 厚度的关系; (b) 单层和双层的 WTe<sub>2</sub>/Py 器件的二次谐波霍尔电压与外加磁场角度关系,  $\tau_B$  的符号反转反映在发现峰值信号的不同角度上<sup>[32]</sup>

Fig. 2. (a) Ratios of the  $\tau_S/\tau_B$  and  $\tau_T/\tau_B$  as a function of WTe<sub>2</sub> thickness; (b) second-harmonic Hall data for a WTe<sub>2</sub>/Py device with a monolayer bilayer WTe<sub>2</sub>, as a function of the angle of the applied magnetic field. The sign reversal of  $\tau_B$  is reflected in the different angles at which the peak signals are found<sup>[32]</sup>.

2019年, Shi等<sup>[45]</sup>也利用ST-FMR技术测量了机械剥离的WTe<sub>2</sub>/Py异质结的SOT,发现当*b*轴通电流时SOT明显依赖于厚度变化,且SOT的效率随着厚度的增大而增大.他们还通过ST-FMR和电流诱导的磁化开关方法分别测量不同厚度的WTe<sub>2</sub>器件中的有效自旋霍尔角,结果都表现出类饱和的体效应特性,这表明SOT的起源是体效应,也就是自旋霍尔效应.由于机械剥离的WTe<sub>2</sub>仅为微米尺寸,不利于器件实际的应用.于是在2021年,Shi等<sup>[47]</sup>采用CVD方法生长了厘米尺寸的Td相的WTe<sub>2</sub>薄膜,并利用ST-FMR研究了5 nm厚的WTe<sub>2</sub>与FeNi组成异质结的自旋轨道矩,得到面内和面外的自旋霍尔电导率分别为 $7.36 \times 10^3 (\hbar/2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ,  $1.76 \times 10^3 (\hbar/2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ,这与机械剥离WTe<sub>2</sub>得到的结果相吻合.与此同时,还有很多研究者努力用磁控溅射的方法生长WTe<sub>2</sub>,但只能制备到WTe<sub>x</sub>非晶体,仅观察到有常规的面内类阻尼矩,而没有面外类阻尼矩<sup>[52-54]</sup>.

### 3 WTe<sub>2</sub>/FM 异质结磁矩翻转的电调控

#### 3.1 WTe<sub>2</sub>和普通铁磁异质结

2019年, Shi等<sup>[45]</sup>首次报道了在机械剥离的WTe<sub>2</sub>/Py异质结中室温下电流驱动面内的磁化翻转的现象,并通过磁光克尔显微镜对WTe<sub>2</sub>(80 nm)/Py(6 nm)器件的电流驱动的面内磁畴翻转进行表征,测得临界翻转电流密度为 $2.96 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ .这一数值比拓扑绝缘体/铁磁金属(Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/Py)( $\sim 6 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ )<sup>[55]</sup>和Pt(6 nm)/Py(6 nm)( $\sim 2.80 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ )异质结的临界翻转电流密度小.由于WTe<sub>2</sub>的电阻率( $\sim 580 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ )低于Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>拓扑绝缘体的(8层样品的电阻率约为 $2600 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ),因此在WTe<sub>2</sub>/Py异质结中电流驱动磁化翻转的功耗比Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/Py异质结的小19倍,也比Pt(6 nm)/Py(6 nm)的小350倍.此外,他们还观察到WTe<sub>2</sub>/Py中的手性磁畴壁倾斜,这归因于界面诱导Dzyaloshinskii-Moriya相互作用.之后,他们又利用CVD生长了WTe<sub>2</sub>,并与NiFe组成异质结<sup>[47]</sup>,测得临界翻转电流密度为 $2.53 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ ,这与机械剥离的WTe<sub>2</sub>的结果基本一致.

2021年, Xie等<sup>[43]</sup>构建了氧化物SrRuO<sub>3</sub>和机械剥离WTe<sub>2</sub>的异质结,在40 K下实现了电流诱导垂直磁化的确定性翻转,这归因于范德瓦耳斯

材料WTe<sub>2</sub>产生的面外自旋极化.他们通过反常霍尔效应回线偏移(AHE loop shift)方法进一步证实了面外自旋极化的存在.同年, Zhao等<sup>[56]</sup>也报道了在室温下WTe<sub>2</sub>可以通过电流诱导产生自旋极化及在石墨烯通道中的实现高效自旋注入和检测.实验结果表明, WTe<sub>2</sub>中存在一种非常规的电荷-自旋转换现象,这与传统的自旋霍尔效应和Rashba-Edelstein效应相反.这种现象主要是由于系统晶体的对称性所限制而产生的.由于WTe<sub>2</sub>晶体对称性的降低以及具有大的自旋贝里曲率(spin Berry curvature)和新费米态的自旋结构自旋轨道相互作用,使得它可以产生较大的自旋极化.这些发现为利用外尔半金属材料作为全范德瓦耳斯自旋电子电路中的非磁性自旋源以及低功耗和高性能非易失性自旋电子技术提供了机会.

近期, Wang等<sup>[42]</sup>利用CVD技术生长了晶圆级、高质量的少层WTe<sub>2</sub>,之后在其表面利用磁控溅射沉积了垂直磁化的多层膜Ti(1.5 nm)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub>(1.2 nm)/MgO(2 nm)/Ta(3 nm).他们观测到了室温下无外场辅助的电流驱动的磁化翻转现象(图3(a)).通过SHH结合AHE loop shift的方法,他们测量了该样品面内和面外的自旋霍尔电导率分别为 $(3.58 \pm 0.12) \times 10^3 (\hbar/2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 和 $(2.05 \pm 0.39) \times 10^3 (\hbar/2e) (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ,并估算出其面内和面外的电荷-自旋转换效率分别为 $0.36 \pm 0.01$ 和 $0.02 \pm 0.004$ .他们指出自旋极化的面外和面内分量比约为5%,足以实现无外场辅助的确定性磁化翻转.该样品的临界翻转电流密度为 $3.25 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ,比控制样品W/Ti/CoFeB/MgO( $13.69 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ )更低.这些实验结果为WTe<sub>2</sub>作为自旋源材料在磁矩翻转的电调控技术中的应用提供了有益的实验支持,并对其进一步的研究具有重要的参考价值.

#### 3.2 WTe<sub>2</sub>/二维铁磁异质结

2022年, Kao等<sup>[39]</sup>利用机械剥离制备了全vdW WTe<sub>2</sub>/Fe<sub>2.78</sub>GeTe<sub>2</sub>异质结,并在温度为100—200 K之间实现了零磁场下电流驱动的垂直磁化确定性的翻转.由于二维Fe<sub>2.78</sub>GeTe<sub>2</sub>的居里温度( $T_C < 230 \text{ K}$ )远低于室温,因此只能在低温下研究电流驱动的磁化翻转行为.他们通过测试AHE loop shift证明了当电流应用于WTe<sub>2</sub>的*a*轴时存在非零面外类阻尼矩,且AHE loop shift是突然变化的,而不是一个线性的偏移,这表明系统中不存

在明显的面外类场矩. 在 170 K 时器件的临界翻转电流密度约为  $6.5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>.

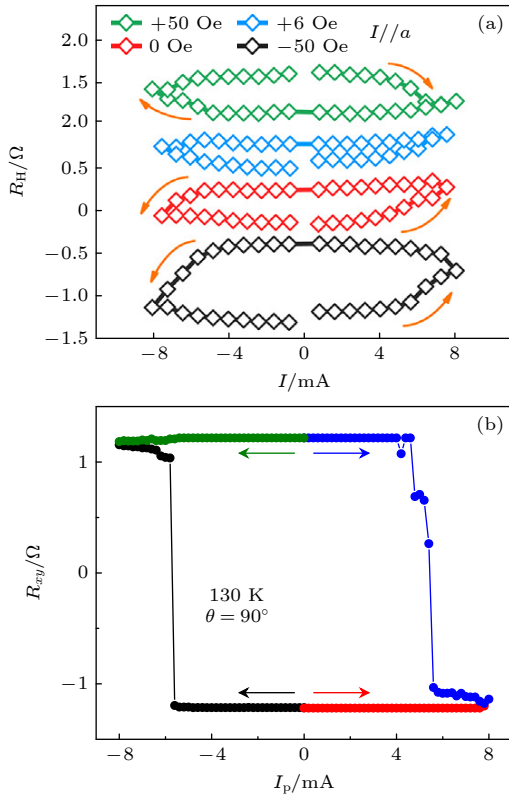


图 3 (a) 电流沿 WTe<sub>2</sub> *a* 轴诱导磁化翻转特性<sup>[42]</sup>; (b) 在 WTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 异质结中 SOT 诱导的无场磁化翻转<sup>[40]</sup>  
 Fig. 3. (a) The current-induced magnetization switching behavior along the *a* axis of WTe<sub>2</sub><sup>[42]</sup>; (b) SOT-induced field-free switching in WTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> bilayers<sup>[40]</sup>.

同年, Ye 等<sup>[40]</sup> 提出并实现了轨道转移矩 (orbit-transfer torque, OTT), 即利用轨道磁矩对磁化强度施加力矩, 从而提出了一种无外加磁场的电流驱动垂直磁化翻转的新策略. 由于在 WTe<sub>2</sub> 中存在非零贝里曲率偶极子 (Berry curvature dipole), 施加电流可以产生轨道磁矩的垂直极化, 并且通过改变电流极性可以改变极化方向. 在此原理的指导下, 他们构建了 WTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 异质结构, 实现了 OTT 驱动零场下的电流诱导磁化翻转 (图 3(b)). 在温度为 120 K 时, 对于不同厚度的 WTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 样品, 临界翻转电流密度约为  $6.5 \times 10^6$ — $8.6 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>. 此外, Wang 等<sup>[41]</sup> 也在二维 WTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 异质结中利用非常规的电荷-自旋转换实现垂直磁化零磁场的确定性翻转, 并提出了一种以前未实现的对称写入和读出机制. 这种机制可以在基于垂直各向异性自旋轨道量子材料 WTe<sub>2</sub> 和 Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 的体系中实现, 并且可以实现功能完整

的逻辑内存操作集和更复杂的非易失性半加法器逻辑功能. 同时, Shin 等<sup>[57]</sup> 也利用 WTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 全范德瓦耳斯异质结中观测到了电流诱导的磁化翻转特性, 估算出 WTe<sub>2</sub> 的 SOT 效率为 4.6. 值得一提的是, 在 150 K 时获得的临界翻转电流密度为  $3.90 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>, 比传统重金属/铁磁体薄膜的小一个数量级. 这些研究成果为基于自旋电子学的新型器件的设计和制备提供了有益的参考, 并为未来的研究提供了新的思路和方向.

## 4 结论和展望

本文综述了基于二维外尔半金属 WTe<sub>2</sub> 的自旋轨道矩的最新研究进展, 介绍了 WTe<sub>2</sub> 与普通铁磁及二维铁磁组成异质结的研究现状和自旋轨道矩诱导磁矩翻转的研究进展. 外尔半金属 WTe<sub>2</sub> 作为一种能产生非常规面外 SOT 的新型量子材料, 将会构建很多新的自旋电子器件. 对于其应用还存在以下几个方面的挑战.

1) 面外类阻尼 SOT 产生的机制不够清楚. 利用自旋霍尔效应和 Rashba-Edelstein 效应很难解释 WTe<sub>2</sub> 产生非常规的面外极化的自旋流, 需要进一步的实验结合理论来阐明本质机制.

2) 室温全二维异质结的磁矩翻转的电调控. 器件室温工作可以拓宽实际应用的价值. 这需要新发现的或寻找新的室温二维磁性材料, 如 Fe<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub><sup>[58-60]</sup>, CrTe<sub>2</sub><sup>[61]</sup> 和 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub><sup>[62,63]</sup> 等. 同时还要求制备出室温高质量原子层级别异质结的磁矩翻转的电调控器件, 这更有利于提高下一代高性能自旋电子器件的集成密度.

3) 大面积生长高质量的 WTe<sub>2</sub> 晶体及室温二维铁磁体. 在 SOT 器件中, 二维材料通常采用机械剥离的方法制备, 难以与现代半导体技术相结合. 虽然用 CVD 方法能长出厘米尺寸的 WTe<sub>2</sub>, 还需要进一步优化实验条件生长均匀、原子层、高质量和晶圆尺寸的二维 WTe<sub>2</sub> 晶体. 此外, Liu 等<sup>[64]</sup> 利用分子束外延获得晶圆级二维 Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 晶体, 这为大面积和均匀可控层数生长二维材料的制备提供重要的参考.

4) 兼容问题. 二维材料必须转移到硅基上, 与其他薄膜形成高质量的异质结组装. 另外与传统的隧道结或者全二维隧道结组装也是当前面临的一大挑战.

基于二维外尔半金属  $\text{WTe}_2$  的 SOT 器件在基础研究和技术应用方面吸引了越来越多研究者的关注,并在 SOT 效率和磁矩的电调控等方面取得了一些进展.最近,研究者发现另外一种新的外尔半金属材料  $\text{TaIrTe}_4$ , 它的电阻率比  $\text{WTe}_2$  低,能够产生面外的类阻尼矩,且自旋霍尔电导率高于  $\text{WTe}_2$ .此外,它还实现了室温下零磁场高效的磁化翻转的电调控<sup>[65,66]</sup>.这些发现将促进外尔半金属材料在下一代高性能自旋电子器件的发展,我们期望基于外尔半金属的 SOT 器件未来能够得到广泛应用.

## 参考文献

- [1] Baibich M N, Broto J M, Fert A, Nguyen V D F, Petroff F, Etienne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472
- [2] Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, Zinn W 1989 *Phys. Rev. B* **39** 4828
- [3] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M, Meservey R 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [4] Parkin S S, Hayashi M, Thomas L 2008 *Science* **320** 190
- [5] Claude C, Albert F, Frédéric N V D 2007 *Nature* **6** 813
- [6] Albert F J, Katine J A, Buhrman R A, Ralph D C 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3809
- [7] Katine J A, Albert F J A, Buhrman R A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 3149
- [8] Brataas A, Kent A D, Ohno H 2012 *Nat. Mater.* **11** 372
- [9] Liu L, Lee O J, Gudmundsen T J, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 096602
- [10] Liu L, Pai C F, Li Y, Tseng H W, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Science* **336** 555
- [11] Slonczewski J C 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **159** L1
- [12] He C L, Xu H J, Tang J, Wang X, Wei J W, Shen S P, Chen Q Q, Shao Q M, Yu G Q, Zhang G Y, Wang S G 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 127501 (in Chinese) [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 2021 物理学报 **70** 127501]
- [13] Tang W, Liu H L, Li Z, Pan A L, Zeng Y J 2021 *Adv. Sci.* **8** 2100847
- [14] Miron I M, Garello K, Gaudin G, Zermatten P J, Costache M V, Auffret S, Bandiera S, Rodmacq B, Schuhl A, Gambardella P 2011 *Nature* **476** 189
- [15] Miron I M, Moore T, Szabolcs H, Buda-Prejbeanu L D, Auffret S, Rodmacq B, Pizzini S, Vogel J, Bonfim M, Schuhl A, Gaudin G 2011 *Nat. Mater.* **10** 419
- [16] Demidov V E, Urazhdin S, Ulrichs H, Tiberkevich V, Slavin A, Baither D, Schmitz G, Demokritov S O 2012 *Nat. Mater.* **11** 1028
- [17] Yang S H, Ryu K S, Parkin S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 221
- [18] Tang W, Zhou Z W, Nie Y Z, Xia Q L, Zeng Z M, Guo G H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 172402
- [19] Avci C O, Quindeau A, Pai C F, Mann M, Caretta L, Tang A S, Onbasli M C, Ross C A, Beach G S D 2016 *Nat. Mater.* **16** 309
- [20] Ryu J, Lee S, Lee K J, Park B G 2020 *Adv. Mater.* **32** 1907148
- [21] Liu L, Moriyama T, Ralph D C, Buhrman R A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 036601
- [22] Fukami S, Zhang C, DuttaGupta S, Kurenkov A, Ohno H 2016 *Nat. Mater.* **15** 535
- [23] 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
- [24] Baek S C, Amin V P, Oh Y W, Go G, Lee S J, Lee G H, Kim K J, Stiles M D, Park B G, Lee K J 2018 *Nat. Mater.* **17** 509
- [25] Ma Q, Li Y, Gopman D B, Kabanov Y P, Shull R D, Chien C L 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 117703
- [26] Sheng Y, Edmonds K W, Ma X, Zheng H, Wang K Y 2018 *Adv. Electron. Mater.* **4** 1800224
- [27] Bekele Z A, Liu X H, Cao Y, Wang K Y 2020 *Adv. Electron. Mater.* **7** 2000793
- [28] Cao Y, Sheng Y, Edmonds K W, Ji Y, Zheng H, Wang K Y 2020 *Adv. Mater.* **32** e1907929
- [29] Yuan H, Bahramy M S, Morimoto K, Wu S, Nomura K, Yang B J, Shimotani H, Suzuki R, Toh M, Kloc C, Xu X, Arita R, Nagaosa N, Iwasa Y 2013 *Nat. Phys.* **9** 563
- [30] Jungfleisch M B, Zhang W, Sklenar J, Ding J, Jiang W, Chang H, Fradin F Y, Pearson J E, Ketterson J B, Novosad V, Wu M, Hoffmann A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 057601
- [31] Deng K, Wan G L, Deng P, Zhang K N, Ding S J, Wang E Y, Yan M Z, Huang H Q, Zhang H Y, Xu Z L, Denlinger J, Fedorov A, Yang H T, Duan W H, Yao H, Wu Y, Fan S S, Zhang H J, Chen X, Zhou S Y 2016 *Nat. Phys.* **12** 1105
- [32] MacNeill D, Stiehl G M, Guimarães M H D, Reynolds N D, Buhrman R A, Ralph D C 2017 *Phys. Rev. B* **96** 054450
- [33] Lü 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
- [34] Li Q, Yan J Q, Yang B, Zang Y Y, Zhang J J, He K, Wu M H, Zhao Y F, Mandrus D, Wang J, Xue Q K, Chi L F, Singh D J, Pan M 2016 *Phys. Rev. B* **94** 115419
- [35] Johansson A, Henk J, Mertig I 2018 *Phys. Rev. B* **97** 085417
- [36] Sun Y, Zhang Y, Felser C, Yan B H 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 146403
- [37] Jiang J, Tang F, Pan X C, Liu H M, Niu X H, Wang Y X, Xu D F, Yang H F, Xie B P, Song F Q, Dudin P, Kim T K, Hoesch M, Das P K, Vobornik I, Wan X G, Feng D L 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 166601
- [38] MacNeill D, Stiehl G M S, Guimarães M H D, Buhrman R A, Park J, Ralph D C 2016 *Nat. Phys.* **13** 300
- [39] Kao I H, Muzzio R, Zhang H, Zhu M, Gobbo J, Yuan S, Weber D, Rao R, Li J, Edgar J H, Goldberger J E, Yan J, Mandrus D G, Hwang J, Cheng R, Katoch J, Singh S 2022 *Nat. Mater.* **21** 1029
- [40] Ye X G, Zhu P F, Xu W Z, Shang N Z, Liu K H, Liao Z M 2022 *Chin. Phys. Lett.* **39** 037303
- [41] Wang L Z, Xiong J L, Cheng B, Dai Y D, Wang F Y, Pan C, Cao T J, Liu X W, Wang P F, Chen M Y, Yan S N, Liu Z L, Xiao J J, Xu X H, Wang Z L, Shi Y G, Cheong S W, Zhang H J, Liang S J, Miao F 2022 *Sci. Adv.* **8** 6833
- [42] Wang X R, Wu H, Qiu R Z, Huang X H, Zhang J R, Long J W, Yao Y X, Zhao Y R, Zhu Z F, Wang J Y, Shi S Y, Chang H X, Zhao W S 2023 *Cell Rep. Phys. Sci.* **4** 101468
- [43] Xie Q, Lin W, Sarkar S, Shu X, Chen S, Liu L, Zhao T, Zhou C, Wang H, Zhou J, Gradečak S, Chen J 2021 *APL Mater.* **9** 051114
- [44] Wei L J, Yin X M, Liu P, Zhang P C, Niu W, Liu P, Yang J J, Peng J C, Huang F, Liu R B, Chen J R, Chen L, Zhou S, Li F, Niu X H, Du J, Pu Y 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 252404
- [45] 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. Nanotechnol.* **14** 945
- [46] Lü W X, Xue H W, Cai J L, Chen Q, Zhang B S, Zhang Z Z, Zeng Z M 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 052406
- [47] Shi S Y, Li J, Hsu C H, Lee K, Wang Y, Yang L, Wang J Y, Wang Q S, Wu H, Zhang W, Eda G, Liang G C, Chang H, Yang H 2021 *Adv. Quantum Technol.* **4** 2100038
- [48] Rhodes D, Das S, Zhang Q R, Zeng B, Pradhan N R, Kikugawa N, Manousakis E, Balicas L 2015 *Phys. Rev. B* **92** 125152
- [49] Zhao B, Khokhriakov D, Zhang Y, Fu H, Karpiak B, Hoque A M, Xu X, Jiang Y, Yan B, Dash S P 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 013286
- [50] Ali M N, Xiong J, Flynn S, Tao J, Gibson Q D, Schoop L M, Liang T, Haldolaarachchige N, Hirschberger M, Ong N P, Cava R J 2014 *Nature* **514** 205
- [51] Brown B E 1966 *Acta Cryst.* **20** 264
- [52] Hang X, Talapatra A, Chen X, Luo Z Y, Wu Y H 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 042401
- [53] Peng C W, Liao W B, Chen T Y, Pai C F 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 15950
- [54] Li X, Li P, Hou V D H, De M, Nien C H, Xue F, Yi D, Bi C, Lee C M, Lin S J, Tsai W, Suzuki Y, Wang S X 2021 *Matter* **4** 1639
- [55] Wang Y, Zhu D, Wu Y, Yang Y, Yu J, Ramaswamy R, Mishra R, Shi S, Elyasi M, Teo K L, Wu Y, Yang H 2017 *Nat. Commun.* **8** 1364
- [56] Zhao B, Karpiak B, Khokhriakov D, Johansson A, Hoque A M, Xu X, Jiang Y, Mertig I, Dash S P 2020 *Adv. Mater.* **32** 2000818
- [57] Shin I, Cho W J, An E S, Park S, Jeong H, Jang S, Baek W J, Park S Y, Yang D, Seo J H, Kim G, Ali M N, Choi S, Lee H, Kim J S, Kim S D, Lee G H 2022 *Adv. Mater.* **34** 2101730
- [58] Tian C K, Pan F H, Xu S, Ai K, Xia T L, Cheng P 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 202402
- [59] Alahmed L, Nepal B, Macy J, Zheng W, Casas B, Sapkota A, Jones N, Mazza A R, Brahlek M, Jin W, Mahjouri-Samani M, Zhang S S L, Mewes C, Balicas L, Mewes T, Li P 2021 *2D Mater.* **8** 045030
- [60] Zhao B, Ngaloy R, Ghosh S, Ershadrad S, Gupta R, Ali K, Hoque A M, Karpiak B, Khokhriakov D, Polley C, Thiagarajan B, Kalaboukhov A, Svedlindh P, Sanyal B, Dash S P 2023 *Adv. Mater.* **35** 2209113
- [61] Zhang X Q, Lu Q S, Liu W Q, Niu W, Sun J B, Cook J, Vaninger M, Miceli P F, Singh D J, Lian S W, Chang T R, He X Q, Du J, He L, Zhang R, Bian G, Xu Y B 2021 *Nat. Commun.* **12** 2492
- [62] Zhang G J, Guo F, Wu H, Wen X K, Yang L, Jin W, Zhang W F, Chang H X 2022 *Nat. Commun.* **13** 5067
- [63] Pan H Y, Zhang C S, Shi J Y, Hu X Q, Wang N Z, An L H, Duan R H, Deb P, Liu Z, Gao W B 2023 *ACS Mater. Lett.* **5** 2226
- [64] 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** 30
- [65] Liu Y K, Shi G Y, Kumar D, Kim T, Shi S Y, Yang D S, Zhang J T, Zhang C H, Wang F, Yang S H, Pu Y C, Yu P, Cai K M, Yang H 2023 *Nat. Electron.* **6** 732
- [66] Zhang Y, Xu H J, Jia K, Lan G B, Huang Z H, He B, He C L, Shao Q M, Wang Y Z, Zhao M K, Ma T Y, Dong J, Guo C Y, Cheng C, Feng J F, Wan C H, Wei H X, Shi Y G, Zhang G Y, Han X F, Yu G Q 2023 *Sci. Adv.* **9** eadg9819

SPECIAL TOPIC—Two-dimensional magnetism and topological spin physics

# Magnetization switching driven by spin-orbit torque of Weyl semimetal $\text{WTe}_2$ \*

Wei Lu-Jun    Li Yang-Hui    Pu Yong†

(*School of Science & New Energy Technology Engineering Laboratory of Jiangsu Province,  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

( Received 21 November 2023; revised manuscript received 3 January 2024 )

## Abstract

The Weyl semimetal  $\text{WTe}_2$  exhibits significant spin-orbit coupling characteristics and can generate unconventional spin current with out-of-plane polarization, which has become a hotspot in recent years. Meanwhile,  $\text{WTe}_2$  also has high charge-spin conversion efficiency, allowing perpendicular magnetization to be switched deterministically without the assistance of an external magnetic field, which is critical for the high-density integration of low-power magnetic random-access memories. The purpose of this paper is to review the recent advances in the research on spin orbit torque in heterostructures composed of  $\text{WTe}_2$  and ferromagnetic layers, focusing on progress of research on the detection and magnetization switching in the spin orbit torque of heterojunctions composed of  $\text{WTe}_2$  prepared by different methods (e.g. mechanical exfoliation and chemical vapor deposition) and ferromagnetic layers such as conventional magnets (e.g. FeNi and CoFeB, etc.) and two-dimensional magnets (e.g.  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ , etc.). Finally, the prospect of related research is discussed.

**Keywords:**  $\text{WTe}_2$ , spin-orbit torque, current-driven magnetization switching

**PACS:** 85.75.-d, 71.70.Ej, 77.80.Fm

**DOI:** [10.7498/aps.73.20231836](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231836)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52001169, 61874060, U1932159, 61911530220) and the Introduction Talent Research Launch Fund of Nanjing University of Posts and Telecommunications, China (Grant Nos. NY219164, NY217118).

† Corresponding author. E-mail: [yongpu@njupt.edu.cn](mailto:yongpu@njupt.edu.cn)





## 基于外尔半金属 $WTe_2$ 的自旋-轨道矩驱动磁矩翻转

魏陆军 李阳辉 普勇

### Magnetization switching driven by spin-orbit torque of Weyl semimetal $WTe_2$

Wei Lu-Jun Li Yang-Hui Pu Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 018501 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231836

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231836>

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

#### 基于二维材料的自旋-轨道矩研究进展

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

物理学报. 2021, 70(12): 127501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210004>

#### 外尔半金属 $WTe_2$ /Ti异质结的热稳定性拉曼散射研究

Thermal stability study of Weyl semimetal  $WTe_2$ /Ti heterostructures by Raman scattering

物理学报. 2022, 71(19): 197501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220712>

#### 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>

#### 三端磁隧道结的稳定性分析

Stability analysis in three-terminal magnetic tunnel junction

物理学报. 2019, 68(20): 207201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190927>

#### 单层二维量子自旋霍尔绝缘体 $1T'-WTe_2$ 研究进展

Research progress of two-dimensional quantum spin Hall insulator in monolayer  $1T'-WTe_2$

物理学报. 2022, 71(12): 127308 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220100>

#### 二维 $WTe_2$ 晶格对称性的光学研究

Optical study on crystal symmetry of two-dimensional  $WTe_2$

物理学报. 2022, 71(17): 176301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220804>