

专题: 应用磁学

# Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结中拓扑界面耦合调控铁磁性研究\*

次文娟<sup>1)2)</sup># 刘天祺<sup>1)2)</sup># 宋燕丽<sup>1)2)</sup> 马珠<sup>1)2)</sup> 王颖<sup>1)2)</sup>  
申建雷<sup>1)2)</sup> 杨瑞龙<sup>1)2)</sup> 薛武红<sup>1)2)</sup>† 许小红<sup>1)2)</sup>‡

1) (山西师范大学材料科学与工程学院, 磁性分子与磁信息材料教育部重点实验室, 太原 030031)

2) (山西师范大学材料科学研究院, 先进磁性材料与器件山西省重点实验室, 太原 030031)

(2025 年 11 月 28 日收到; 2026 年 1 月 2 日收到修改稿)

拓扑异质结的界面相互作用能够通过界面电荷转移、拓扑表面态诱导等有效调节界面磁有序, 为实现高效、低功耗的磁序操纵提供可靠策略. 本文构筑了室温铁磁体 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 与拓扑绝缘体 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 的全范德瓦耳斯异质结, 探究了 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 界面相互作用对 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 磁性的影响规律. 通过不同温度下的微观磁畴演变, 表明拓扑界面能够有效稳定 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 的长程磁有序. 磁光测量进一步验证了异质结构中 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 居里温度提升了约 20 K, 并观测到异常的 MOKE 信号反号行为. 本研究揭示了拓扑界面效应在调控二维磁性中的重要作用, 为开发高性能自旋电子器件提供了实验基础.

**关键词:** 范德瓦耳斯异质结, 界面调控, 二维磁性

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251620

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251620

## 1 引言

自 2004 年石墨烯被成功制备以来, 二维范德瓦耳斯 (van der Waals, vdW) 材料因其原子级厚度、可调的电子结构以及独特的光、电、磁特性, 成为凝聚态物理与材料科学领域的重要研究体系<sup>[1-3]</sup>. 其中, 范德瓦耳斯磁性材料打破了传统二维体系中“Mermin-Wagner 定理”对长程磁有序的限制, 在原子级厚度仍可保持稳定磁序, 且具有高柔性、高灵敏性以及易集成等优势, 被视为构建新型自旋电子器件的理想平台<sup>[4-6]</sup>. 利用外场有效调控二维磁性的序参量是探索新物理现象及开发磁电子器件

多功能应用的基础<sup>[7]</sup>. 迄今, 研究者已发展了多种外场调控手段, 包括离子插层<sup>[8]</sup>、静电掺杂<sup>[9]</sup>、电流驱动<sup>[10]</sup>与应变工程<sup>[11]</sup>等, 实现了二维磁体的磁相变、磁阻态、居里温度等磁特性的有效调制. 然而, 这些调控方式在效率、能耗或器件兼容性等方面仍存在明显局限. 例如, 基于自旋-转移矩或自旋-轨道矩的电流调控常伴随焦耳热效应, 导致器件功耗较高; 离子插层与静电掺杂通常受样品载流子浓度或介电击穿阈值等问题的限制; 应变调控往往依赖复杂的机械支撑结构, 难以实现局域化、可扩展的器件集成. 基于此, 利用异质结界面效应对磁性进行调控, 为实现不依赖外场或大电流注入的高效、低功耗磁序操纵提供了可行策略<sup>[12-14]</sup>.

\* 国家自然科学基金联合基金 (批准号: U24A6002)、国家重点研发计划 (批准号: 2024YFA1410200)、国家自然科学基金 (批准号: 52501250, 52371245, 12174237, 12241403) 和山西省自然科学基金 (批准号: 202503021212211) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: xuewuhong@sxnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xuxh@sxnu.edu.cn

vdW 异质结具有原子级平整且无悬挂键的界面结构, 为研究界面调控磁序提供了理想载体. 特别是在二维磁性材料/拓扑绝缘体 (topological insulator, TI) 构筑的异质结中, 凭借 TI 的强自旋-轨道耦合及拓扑表面态等特性<sup>[15-18]</sup>, 为磁性调控带来了新的自由度. 基于拓扑异质结的“界面工程”策略, 不仅会在界面产生层间电荷转移, 也可能出现拓扑诱导的磁各向异性转变、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用增强等效应, 能够从能带结构层面直接重构磁相互作用<sup>[19-21]</sup>, 在开发非易失、低功耗、高集成度的自旋器件方面展现出巨大潜力. 基于此, 本工作利用室温铁磁材料  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  与拓扑绝缘体  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  构筑全范德瓦耳斯异质结, 通过界面耦合效应实现了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  磁性的宏观与微观调控. 通过变温磁畴结构表征, 在微观尺度上证实了拓扑异质结界面有效稳定了铁磁有序. 宏观磁光克尔效应测试进一步定量表明异质结界面将铁磁居里温度显著提高了约 20 K, 并伴随出现异常的 MOKE 信号反号现象. 本研究揭示了拓扑界面相互作用对铁磁有序的显著稳定作用, 为实现低功耗、高效率的磁性调控及开发易集成的自旋电子器件提供了实验基础.

## 2 实验

### 2.1 样品制备

首先, 通过机械剥离法从  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  与  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  块材上获得高质量、表面洁净的薄层纳米片. 随后, 借助聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 支撑膜在 80 °C 下实现目标薄层的可控热释放与洁净转移. 然后利用高精度二维材料定向转移平台实现  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  与  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的精准定向堆叠, 构筑全范德瓦耳斯异质结. 为进一步优化界面接触、增强层间耦合并去除转移过程中可能引入的界面污染物 (如气泡、水分等), 将异质结样品在真空下进行低温退火处理, 为后续物性测量奠定基础. 为了保证异质结质量, 整个剥离与转移过程均在手套箱中进行, 并用 h-BN 对样品进行封装.

### 2.2 性能表征

实验中使用 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD, Rigaku Ultima IV), 配备能量色散 X 射线光谱仪 (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)

的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM, JEOL JSM-IT800), 拉曼光谱仪 (Raman spectroscopy, Raman, Horiba HR Evolution) 和原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM, Bruker Dimension Icon) 对  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  和  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  单晶、纳米薄片以及异质结的形貌、结构及成分进行表征. 使用综合物性测量系统 (physical properties measurement system, PPMS, Quantum Design DynaCool) 进行  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的磁输运及场冷-零场冷 (FC-ZFC) 曲线测试. 通过磁力显微镜 (magnetic force microscopy, MFM, Bruker Dimension Icon) 表征样品的磁畴信号. 使用氦循环低温磁光克尔成像系统 (magneto optical Kerr microscope, MOKE, Truth Instruments KMPL-Spin-X) 对  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  纳米片和  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结的磁光克尔信号进行表征.

## 3 结果与讨论

$\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  是一种典型的室温范德瓦耳斯铁磁体<sup>[22,23]</sup>, 其晶体结构属于六方晶系 (空间群  $P63/mmc$ ), 基本结构单元由两层 Te 原子夹持  $\text{Fe}_3\text{Ga}$  层所形成的三明治型层状单元组成, 相邻单元之间通过层间范德瓦耳斯作用力连接, 构成了典型的层堆垛结构 (图 1(a)), 层间弱范德瓦耳斯作用力使  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  可以通过机械剥离获得表面平整的薄层样品. XRD 结构分析显示  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶呈现 (00 $l$ ) 系列衍射峰 (图 1(b)), 表明样品具有沿 c 轴方向的择优取向, 并证实了其六方晶体结构与高的结晶质量. EDS 图谱表明  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  晶体仅由 Fe, Ga, Te 三种元素组成, 且各元素在样品区域内分布均匀, 未出现其他杂质元素或元素偏聚、相分离现象 (图 1(c)), 进一步证实了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶具有良好的化学均匀性和理想的晶体结构, 为其优异的铁磁性能提供了结构基础.

为了阐明  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的磁学特性, 利用 PPMS 对  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶进行了磁化强度-温度依赖性 ( $M-T$ ) 测试. 图 1(d) 展示了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶的零场冷却 (zero field cooling, ZFC) 和 0.1 T 场冷却 (field cooling, FC) 的  $M-T$  曲线, 结果表明  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  晶体表现出典型的铁磁特征, 并在 350 K 附近观察到明显的铁磁-顺磁转变, 证实了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的室温磁性. 通过绘制面外 FC 曲线的导数 (图 1(d) 插图),

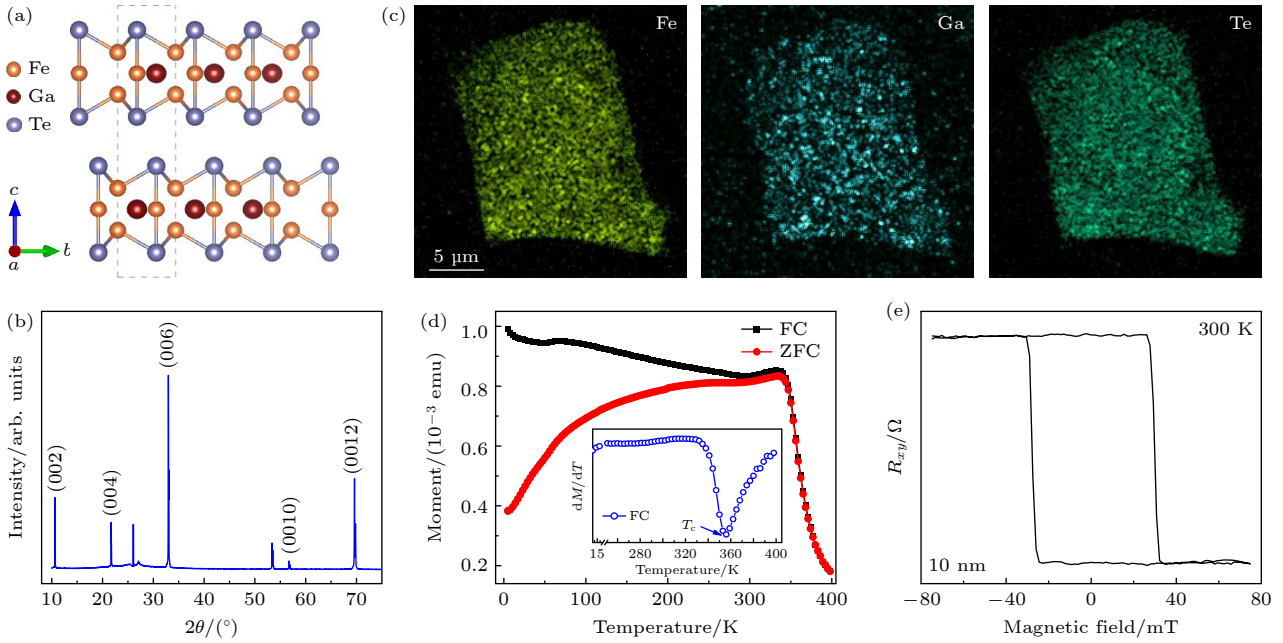


图 1  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的晶体结构与磁性表征 (a)  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  晶体结构示意图; (b)  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶的 XRD 衍射图; (c)  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  晶体中元素分布图; (d)  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶的场冷 (FC)-零场冷 (ZFC) 曲线, 其中场冷曲线的外加磁场为 0.1 T, 插图为 FC 曲线的导数; (e) 10 nm  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  纳米片在室温下的反常霍尔电阻-磁场 ( $R_{xy} - H$ ) 曲线

Fig. 1. Structural and magnetic characterization of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ : (a) Schematic of the crystal structure of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ ; (b) XRD diffraction pattern of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  single crystal; (c) elemental distribution mapping of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ ; (d) FC-ZFC curves of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  single crystal (FC curve with magnetic field of 0.1 T), where the inset shows the derivative of the out-of-plane FC curve; (e)  $R_{xy} - H$  curve of 10 nm  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  nanosheets at room temperature.

确认  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  块体居里温度 ( $T_c$ ) 约为 356 K. 对  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶进行机械解离获得薄层纳米片 ( $\sim 10$  nm) 并制备霍尔器件, 在室温下进行反常霍尔电阻测试. 曲线呈现明显的矩形磁滞现象 (图 1(e)), 进一步验证了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  具有室温铁磁性, 并表现出显著的垂直磁各向异性.

$\text{Bi}_2\text{Te}_3$  作为典型的拓扑绝缘体 [20], 其晶体结构为层状六方结构 (空间群  $R\bar{3}m$ ), 由 Te-Bi-Te-Bi-Te 五重层通过范德瓦耳斯力堆叠而成. 将  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  与  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  材料复合构筑异质结, 层状材料表面无悬挂键的特性使其可以按需任意堆垛, 实现原子级平整的范德瓦耳斯异质结界面, 有效降低界面晶格失配与耦合损耗. 图 2(a) 展示了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结的结构示意图, 薄层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  被置于  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  之上, 以便进行后续磁性表征. 图 2(b) 显示了异质结区的 EDS 元素映射谱图, 其中 Fe, Ga, Bi, Te 各元素分布均匀, 在界面处未观察到明显的元素互扩散现象, 表明成功构建了高质量异质结. 随后, 通过 AFM 对异质结表面形貌进行分析, 如图 2(c) 所示, 异质结边缘清晰且重叠区域表面洁净平整, 厚度均匀, 未出现明显的

皱褶或气泡, 表明  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  与  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  范德瓦耳斯异质结具有良好的界面质量. 接着对  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  以及  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结的拉曼光谱进行表征 (图 2(d)). 在  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  中, 位于  $125.3\text{ cm}^{-1}$  和  $141.7\text{ cm}^{-1}$  附近出现两个特征峰, 分别归因于  $E_{2g}$  和  $A_{1g}^1$  拉曼振动模 [22,24]. 在  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  中, 在  $61.2$ ,  $101.1$  和  $133.2\text{ cm}^{-1}$  附近的特征峰分别对应  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的  $A_{1g}^1$ ,  $E_g^2$  和  $A_{1g}^2$  振动模式 [25-27]. 异质结区域清晰呈现了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  和  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的所有特征峰, 未观察到额外峰值, 进一步验证了异质结界面质量优异, 未引入晶格畸变或界面缺陷.

众所周知,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  存在由强自旋-轨道耦合导致的能带反转, 会诱导具有自旋-动量锁定和时间反演对称性的非平凡拓扑保护表面态 [28-30], 如图 2(e) 所示. 基于此, 在  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结中,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  拓扑表面态能够通过邻近效应有效稳定相邻  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  磁性层的界面磁有序, 同时金属性铁磁体与拓扑绝缘体在界面处会发生能带杂化与电荷再分布, 进一步通过调制费米能级位置优化交换相互作用强度, 促进界面处垂直铁磁序的稳定性 [13,19,21]. 通过对比  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  与  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结

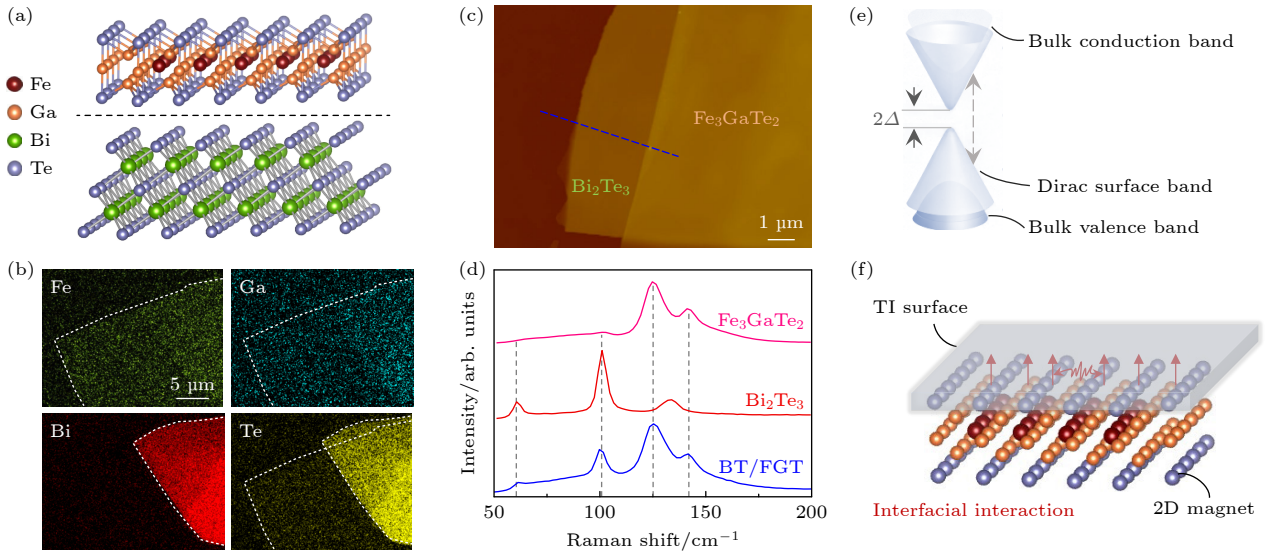


图 2 (a) Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结的结构示意图与光学图像; (b) Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结中各元素的 EDS 映射图; (c) Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结的 AFM 形貌图; (d) Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 及其异质结的 Raman 光谱图; (e) 拓扑绝缘体 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 的能带结构示意图; (f) 拓扑绝缘体与范德瓦耳斯磁体通过界面耦合增强二维磁性示意图

Fig. 2. (a) Schematic and optical images of the Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> heterojunction; (b) the EDS mapping of each element of Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> heterostructure; (c) AFM topography of the heterojunction; (d) Raman spectra of Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, and heterojunction; (e) schematic of the band structure of the topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>; (f) enhancing 2D magnetism via interface coupling between topological insulator and van der Waals magnet.

的表面电势 (见补充材料图 S1 ([online](#))), 结果显示异质结中的 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 相比单一 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 电势发生显著变化, 证实了 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结中存在界面电荷转移行为. 图 2(f) 展示了范德瓦耳斯 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 中通过界面相互作用调控铁磁性的示意图.

为了探究拓扑绝缘体 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 界面对 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 磁性的调控规律, 将厚度均匀的 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 纳米片部分覆盖在 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 纳米片表面, 并以薄层氮化硼封装样品, 随后通过变温 MFM 在不同温度下对 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结的微观磁畴进行系统表征 (磁力探针抬起高度约为 100 nm). 图 3 展示了 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 纳米片及 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结在升温过程中的磁畴演化行为, 其中 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 与 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 厚度分别约为 22.5 nm 与 66 nm (见补充材料图 S2(a) ([online](#))). 室温下, 单一 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 纳米片及其拓扑异质结均展现出清晰的迷宫畴结构; 随着温度逐渐升高, 单独 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 区域的磁畴发生紊乱、信号强度减弱, 而异质结区域的磁畴结构保持相对完整, 且磁畴信号强度明显. 当温度升至 40 °C 以上, Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 区域磁畴显著退化, 部分畴结构消失; 继续升温至 45 °C 时, Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 区域内磁畴结构完全湮灭, 而异质结区域仍可观测到较为完

整的磁畴图案. 这些结果表明, Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结通过界面耦合作用有效增强了相邻铁磁层 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 在热扰动下的磁序稳定性及磁畴保持能力. 为了排除局域磁畴差异, 沿异质结边界进行更大范围 (20 μm) 的磁畴扫描. 如补充材料图 S3 ([online](#)) 所示, 在整个异质结中均定性观察到相同趋势, 进一步证实了实验结果的可靠性.

为了进一步验证 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (~67.1 nm) 对 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> (~26.5 nm) 磁性能的影响, 首先对单独 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 薄片在不同温度下的 MOKE 信号进行表征. 图 4(a) 所示为 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 在 300—343 K 温度范围内施加面外磁场时的温度依赖性 Kerr 曲线. 在室温下, Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 呈现典型的方形磁滞回线, 表明其具有强铁磁有序结构和强垂直磁各向异性 (PMA); 随着温度升高, 矫顽场逐渐减小, 到 343 K 时磁滞回线基本消失, 表明 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 纳米片由铁磁态 (FM) 向顺磁态 (PM) 转变,  $T_c$  约为 343 K. 为了评估 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 的本征磁性, 对单独 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 纳米片的磁信号进行 MOKE 表征, 结果表明 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 不显示磁性 (图 4(b)). 接着对 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 异质结 (厚度分布图见补充材料图 S2(b) ([online](#))) 磁信号的温度依赖性进行表征. 如图 4(c) 所示, 350 K 以下的方形磁滞回线表明异质结构的 PMA 特性和高温铁磁序. 随着

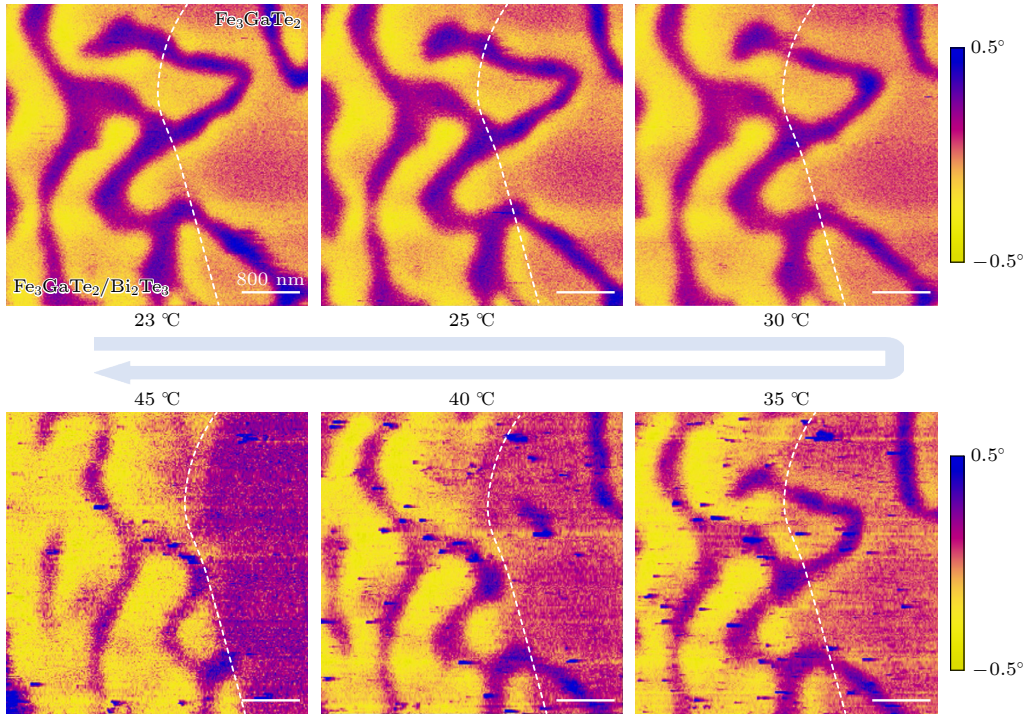


图 3  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  纳米片与  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结在不同温度下的磁畴变化规律

Fig. 3. Magnetic domain evolution of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  and  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  under varying temperatures.

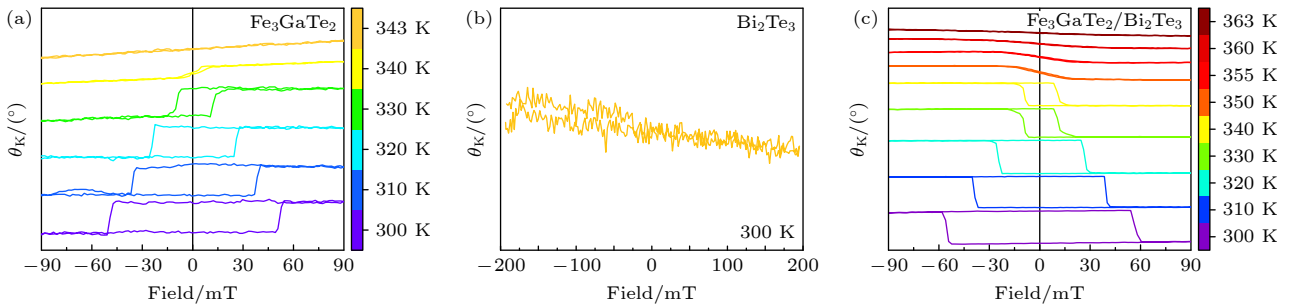


图 4  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  与  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结在不同温度下的 MOKE 信号变化规律 (a) 单独  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  在不同温度下的 MOKE 曲线, 居里温度约为 343 K; (b) 单独  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  在室温下的 MOKE 曲线; (c)  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结中温度依赖的 MOKE 信号演变, 居里温度约为 363 K

Fig. 4. Temperature-dependent MOKE signal variations of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  and  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ : (a) MOKE signal of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  at different temperature, showing a Curie temperature of approximately 343 K; (b) MOKE curve of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  at room temperature; (c) temperature-dependent MOKE evolution in the  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  heterostructure, with a Curie temperature of approximately 363 K.

温度继续升高, 磁滞回线可维持至 363 K 左右, 表明  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结构的居里温度显著高于单一  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  纳米片. 与之相比, 具有强 SOC 效应的  $\text{PtTe}_2$  对  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  磁性调控不明显 (见补充材料图 S4 (online)), 表明拓扑表面态在磁性调控中占主导地位. 此外, 在异质结构中, MOKE 信号表现出不同于单一  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的反号行为, 可能是由于拓扑界面处的电荷转移和轨道杂化改变了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  界面处的电子结构, 从而诱导出新的电

子态或能带结构改变, 导致异质结的磁光响应符号发生反转.

## 4 结 论

本文利用拓扑绝缘体  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  与  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  复合构筑了范德瓦耳斯异质结, 通过  $M-T$ , AHE, Raman 等一系列表征结果证实了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的室温铁磁性以及  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  良好的异质界面质量. 微观磁畴的温度依赖性显示异质结在

$\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  居里温度附近仍显示明显磁畴信号, 表明  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的拓扑表面态有效稳定了相邻磁层的界面磁有序. 不同温度下的磁光克尔测量结果证实了异质结通过界面相互作用将铁磁层居里温度提高了约 20 K, 并伴随出现 MOKE 信号反号的现象. 本实验揭示了  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  拓扑界面可有效增强磁有序, 并适用于本征磁序已相当稳定的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  体系, 为构筑非易失、低功耗、高集成度的自旋电子器件提供了材料平台与实验基础.

## 参考文献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [2] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A, Castro Neto A H 2016 *Science* **353** aac9439
- [3] Piatti E, Arbab A, Galanti F, Carey T, Anzi L, Spurling D, Roy A, Zhussupbekova A, Patel K A, Kim J M, Daghero D, Sordan R, Nicolosi V, Gonnelli R S, Torrisi F 2021 *Nat. Electron.* **4** 893
- [4] Gong C, Li L, Li Z L, Ji H W, Stern A, Xia Y, Cao T, Bao W, Wang C Z, Wang Y, Qiu Z Q, Cava R J, Louie S G, Xia J, Zhang X 2017 *Nature* **546** 265
- [5] Fei Z Y, Huang B, Malinowski P, Wang W B, Song T C, Sanchez J, Yao W, Xiao D, Zhu X Y, May A F, Wu W D, Cobden D H, Chu J H, Xu X D 2018 *Nat. Mater.* **17** 778
- [6] Gibertini M, Koperski M, Morpurgo A F, Novoselov K S 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 408
- [7] Mei L, Yang R J 2024 *Nat. Rev. Chem.* **8** 798
- [8] Wang Z X, Zheng H F, Chen A, Ma L, Hong S J, Rodriguez E E, Woehl T J, Shi S F, Parker T, Ren S Q 2024 *ACS Nano* **18** 23058
- [9] Jiang S W, Li L Z, Wang Z F, Mak K F, Shan J 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 549
- [10] Yang C D, Huang Y L, Pei K, Long X M, Yang L T, Luo Y M, Lai Y X, Zhang J C, Cao G X, Che R C 2024 *Adv. Mater.* **36** 2311831
- [11] Cenker J, Sivakumar S, Xie K, Miller A, Thijssen P, Liu Z, Dismukes A, Fonseca J, Anderson E, Zhu X, Roy X, Xiao D, Chu J H, Cao T, Xu X 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 256
- [12] Guo Y M, Li J X, Zhan X P, Wang C W, Li M, Zhang B, Wang Z R, Liu Y Y, Yang K N, Wang H, Li W Y, Gu P F, Luo Z P, Liu Y J, Liu P T, Chen B, Watanabe K, Taniguchi T, Chen X Q, Qin C B, Chen J Z, Sun D M, Zhang J, Wang R S, Liu J P, Ye Y, Li X Y, Hou Y L, Zhou W, Wang H W, Han Z 2024 *Nature* **630** 346
- [13] Zhang G J, Wu H, Yang L, Chen Z, Jin W, Xiao B C, Zhang W F, Song C S, Chang H X 2024 *J. Am. Chem. Soc.* **146** 34070
- [14] Hellman F, Hoffmann A, Tserkovnyak Y, et al. 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 025006
- [15] Zhang H J, Liu C X, Qi X L, Dai X, Fang Z, Zhang S C 2009 *Nat. Phys.* **5** 438
- [16] Wang Y, Ma X M, Hao Z Y, Cai Y Q, Rong H T, Zhang F Y, Chen W Z, Zhang C C, Lin J H, Zhao Y, Liu C, Liu Q H, Chen C Y 2024 *Natl. Sci. Rev.* **11** nwad066
- [17] Lu H R, Long R, Fang W H 2023 *J. Am. Chem. Soc.* **145** 25887
- [18] Qi W Y, Fei F C, Zhang Z X, Chen B Y, Xie H K, Wei B Y, Zhang S, Song F Q 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 023101
- [19] 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
- [20] Wang H Y, Wu H, Zhang J, Liu Y J, Chen D D, Pandey C, Yin J L, Wei D H, Lei N, Shi S Y, Lu H C, Li P, Fert A, Wang K L, Nie T X, Zhao W S 2023 *Nat. Commun.* **14** 5173
- [21] Ou Y B, Mirzhalilov M, Nemes N M, Martinez J L, Rocci M, Duong A, Akey A, Foucher A C, Ge W B, Suri D, Wang Y P, Ambaye H, Keum J, Randeria M, Trivedi N, Burch K S, Bell D C, Ross F M, Wu W D, Heiman D, Lauter V, Moodera J S, Chi H 2025 *Rep. Prog. Phys.* **88** 060501
- [22] Zhang G, Guo F, Wu H, Wen X, Yang L, Jin W, Zhang W, Chang H 2022 *Nat. Commun.* **13** 5067
- [23] Ruiz A M, Esteras D L, López-Alcalá D, Baldoví J J 2024 *Nano Lett.* **24** 7886
- [24] Zhang J L, Wang Z, Li Z Y, Li T, Liu S, Zhang J Y, Zhang R J, Jin Q Y, Shi Z, Liu Y W, Sheng Z G, Zhang Z Z 2024 *Nano Lett.* **24** 12204
- [25] Liang X K, Chen F H, Yang L, Yang T T, Xiao P Y, Liu Y X, Wang Z W, Xiao W D 2025 *J. Phys.: Condens. Matter* **37** 155001
- [26] Zhang Y Z, Wang D B, He W, Zhao C C, Ling D D, Geng Q D, Chen L, Wu W, Fang X, Liu G, Zhao L C, Jiang D W, Wang J Z 2025 *Adv. Funct. Mater.* e23704 DOI: 10.1002/adfm.202523704
- [27] Zhang X C, Liu X C, Zhang C Y, Peng S L, Zhou H X, He L, Gou J, Wang X R, Wang J 2022 *ACS Nano* **16** 4851
- [28] Fan Y B, Wang K L 2016 *SPIN* **6** 1640001
- [29] Zheng H, Li Y Y, Jia J F 2019 *Advanced Topological Insulators* (John Wiley & Sons, Ltd) pp71–107
- [30] Vivek, Mittal M K 2024 *Int. J. Sci. Res. Eng. Trends* **10** 414

SPECIAL TOPIC — Applied magnetism

# Modulation of ferromagnetism via topological interface coupling in $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ heterojunction\*

CI Wenjuan<sup>1)2)#</sup> LIU Tianqi<sup>1)2)#</sup> SONG Yanli<sup>1)2)</sup> MA Zhu<sup>1)2)</sup>  
WANG Ying<sup>1)2)</sup> SHEN Jianlei<sup>1)2)</sup> YANG Ruilong<sup>1)2)</sup>  
XUE Wuhong<sup>1)2)†</sup> XU Xiaohong<sup>1)2)‡</sup>

1) (*Key Laboratory of Magnetic Molecules and Magnetic Information Materials of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China*)

2) (*Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnetic Materials and Devices, Research Institute of Materials Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China*)

( Received 28 November 2025; revised manuscript received 2 January 2026 )

## Abstract

The effective manipulation of two-dimensional (2D) magnetic order is crucial for both exploring novel physical phenomena and developing multifunctional magnetic electronic devices. Intrinsic interfacial coupling in van der Waals heterostructures provides a promising pathway for efficient, low-power magnetic manipulation without relying on external fields or charge currents. The strong spin-orbit coupling and topologically protected surface states of topological insulators make the heterostructures based on topological insulators ideal for modulating interface magnetism through mechanisms such as charge transfer or the proximity effect, establishing them as a premier platform for interfacial magnetic control. In this work, a van der Waals heterojunction composed of the ferromagnet  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  and the topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  is constructed via mechanical exfoliation and deterministic transfer techniques, and the effect of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  interface interactions on the  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  magnetism is explored. A comparison of microscopic magnetic domain evolution between pristine  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  and  $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  heterojunction at different temperatures shows a significant enhancement of the magnetic ordering in  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  by the topological interface. Magneto-optical Kerr effect (MOKE) measurements further confirm that the Curie temperature of the heterojunction increases by approximately 20 K and the Kerr signal exhibits an anomalous sign reversal. These results reveal the significant role of topological interface effects in modulating 2D magnetism, thereby laying experimental foundation for developing high-performance spintronic devices.

**Keywords:** van der Waals heterojunction, interface regulation, two-dimensional magnetism

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251620](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251620)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251620](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251620)

\* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U24A6002), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2024YFA1410200), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52501250, 52371245, 12174237, 12241403), and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 202503021212211).

# These authors contributed equally.

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

‡ Corresponding author. E-mail: [xuxh@sxnu.edu.cn](mailto:xuxh@sxnu.edu.cn)

## Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>异质结中拓扑界面耦合调控铁磁性研究

次文娟 刘天祺 宋燕丽 马珠 王颖 申建雷 杨瑞龙 薛武红 许小红

## Modulation of ferromagnetism via topological interface coupling in Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> heterojunction

CI Wenjuan LIU Tianqi SONG Yanli MA Zhu WANG Ying SHEN Jianlei YANG Ruilong XUE Wuhong XU Xiaohong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060711 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251620

CSTR: 32037.14.aps.75.20251620

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251620>

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

石墨烯/C<sub>3</sub>N范德瓦耳斯异质结的可调电子特性和界面接触

Tunable electronic structures and interface contact in graphene/C<sub>3</sub>N van der Waals heterostructures

物理学报. 2023, 72(14): 147302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230318>

利用范德瓦耳斯工程定制具有全新发光各向异性的二维异质结

Customizing two-dimensional heterojunction with novel luminescent anisotropy using van der Waals engineering

物理学报. 2025, 74(24): <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251120>

GaN/VSe<sub>2</sub>范德瓦耳斯异质结电接触特性及调控效应

Electrical contact characteristics and regulatory effects of GaN/VSe<sub>2</sub> van der Waals heterojunction

物理学报. 2023, 72(16): 167101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230191>

氧氯化铋/铯铅氯范德瓦耳斯异质结环境稳定性与光电性质的第一性原理研究

A first-principles study on environmental stability and optoelectronic properties of bismuth oxychloride/ cesium lead chloride van der Waals heterojunctions

物理学报. 2022, 71(19): 197901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220544>

Sb/SnC范德瓦耳斯异质结光电性质的层间转角依赖性及其应用

Interlayer angle dependence of photoelectric properties of Sb/SnC van der Waals heterojunction and its application

物理学报. 2024, 73(22): 227101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241138>

二维MoS<sub>2</sub>压痕过程异质界面范德瓦耳斯力引起的撕裂行为

Tearing behavior induced by van der Waals force at heterogeneous interface during two-dimensional MoS<sub>2</sub> nanoindentation

物理学报. 2022, 71(19): 194601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220875>