

# 基于 $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ 范德华异质结构的自旋阀效应研究

姬生祥<sup>1</sup>, 贾志研<sup>1\*</sup>, 郭雪琪<sup>2\*</sup>

1. 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津; 2. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津

**摘要** | 自旋阀作为自旋电子学的核心部件, 广泛应用于磁存储与磁传感等现代信息技术领域。为推动二维自旋电子器件向着小型化与低功耗方向发展, 本文系统研究了基于二维铁磁材料  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  和半导体  $\text{WSe}_2$  的全二维范德华自旋阀异质结构及其磁输运特性。实验中采用高温自熔剂法制备了高质量的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶, 并通过拉曼光谱、X 射线衍射、X 射线光电子能谱和能量色散 X 射线谱对其晶格特征与元素分布进行了确证。在此基础上, 利用机械剥离与干法转移技术构筑了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  垂直范德华异质结构, 并在低温物性测量系统中开展了电磁输运测试。结果表明, 该异质结器件在 250 K 下表现出线性的 I-V 响应, 形成了优异的欧姆接触。在面外磁场作用下, 器件在 250 K 下展现出边界清晰的台阶状磁电阻曲线, 明确证实了自旋阀效应的产生。进一步测试发现, 该器件的磁电阻率随偏置电流 (1 nA 至 1  $\mu\text{A}$ ) 的增大而显著衰减。在 250 K 下改变外加磁场方向时, 其磁电阻率在整个 360°空间范围内均保持高度恒定, 表现出角度无关特征。这种独特的各向同性磁输运行为直接源于  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  本征的强垂直磁各向异性。本研究不仅验证了全二维体系中实现自旋阀调控的可行性, 也为构筑磁场角度不敏感的新型自旋输运器件提供了坚实的物理基础。

**关键词** |  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ ;  $\text{WSe}_2$ ; 范德华异质结构; 自旋阀; 磁各向异性

Copyright © 2026 by the author(s).

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## 引言

随着半导体产业的发展, 传统电子器件的性能提升面临物理尺寸的极限挑战<sup>[1,12,23]</sup>。自旋电子器件

通过操控电子自旋属性实现信息处理, 具备运行速度快、能耗低、易集成等显著优势, 成为未来信息器件的重要发展方向<sup>[13,25,26]</sup>。自旋阀作为自旋电子学领域的核心单元, 其基本工作原理是通过外加磁场调控两个铁磁层磁化方向的相对排列 (平行或反平行), 从而实现高、低两种器件电阻状态的切

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U14A6002,52571263)

作者简介: 姬生祥, 天津工业大学材料科学与工程学院, 主要从事二维材料器件的制备及其物性表征研究。

文章引用: 姬生祥, 贾志研, 郭雪琪. 基于  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  范德华异质结构的自旋阀效应研究[J]. 应用科技研究, 2026, 1 (3): 99-107.

<https://doi.org/10.68070/jqy7ea68>

换<sup>[2,3,24]</sup>。二维材料以其原子级厚度、无表面悬挂键以及层间范德华力耦合等特性,极大地降低了界面散射,为构筑高质量界面的自旋电子器件提供了理想的材料体系<sup>[9,10,15]</sup>。

在多种二维范德华磁性材料中, $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  因具备优异的金属导电性和显著的垂直磁各向异性,是构建自旋阀自旋源和探测层的优选铁磁材料<sup>[4]</sup>。同时, $\text{WSe}_2$  作为一种带隙合适、载流子迁移率较高的典型二维半导体材料,能够作为隔离铁磁层的有效非磁性间隔通道<sup>[5,18]</sup>。基于此,本文通过精密的微纳加工技术构筑了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  全二维范德华异质结构,并在 250 K 及以下温度系统研究了其基础电输运及自旋阀磁电阻特性<sup>[8]</sup>。结合多组表征测试数据,本文详细阐述了器件在不同偏置电流下的电阻调控演变规律,并深入揭示了由材料本征垂直磁各向异性所决定的角度无关磁电阻机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、设备与数据来源

本研究所用  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  块状单晶采用标准的高温自熔剂法 (self-flux technique) 制备<sup>[4]</sup>。该方法利用富余的组成元素作为溶剂,能够显著降低晶体的生长温度并极大提升晶格的完美度。具体操作步骤如下:在水氧含量均严格控制在 0.1 ppm 以下的高纯氩气手套箱内,将高纯度的铁 (Fe, 纯度 99.98%)、镓 (Ga, 纯度 99.99%) 和碲 (Te, 纯度 99.99%) 粉末按照 1:1:2 的精确摩尔比进行称量。将混合后的前驱体粉末放入高纯度氧化铝坩埚中,为防止高温下 Te 元素的剧烈挥发导致化学计量比失衡,顶部倒置放置另一个空的氧化铝坩埚,两坩埚间使用耐高温的高纯石英棉紧密隔开以过滤可能存在的杂质。使用高纯氩气 (Ar) 对反应管进行至少五次的洗气抽真空循环后,利用氢氧焰将整个坩埚组件完全密封在真空度优于  $1.0 \times 10^{-4}$  Pa 的石英管中。在晶体生长的热力学过程中,首先将密封的石英管置于管式炉的恒温区,以 2 K/min 的升温速率加热至 1273 K,并在该高温下持续保温长达 24 小时,以确保所有金属单质彻底熔融并形成原子级均匀的液相溶液。随后,在 1 小时内迅速降温至 1153 K 以越过体系的初晶区并引发自发形核,接着以约 1 K/h 的极慢冷却速率在 100 小时内缓慢冷却至 1053 K。这种长周期的缓慢结晶过程为原子的长程有序迁移和完美晶格的逐层堆叠提供了极其充足的动力学时间。结晶完成后,在 1053 K 下继续保温 12 小时以对生长的晶体进行退火处理,彻底消除晶格内部的残余热应力。最后,迅速将处于高温状态的石英管从加热炉中取出,并立即放入离心机中进行高速离心处理,利用离心力实现完美固相单晶与多余液相熔剂的彻底物理分离。

为了全面评估材料的质量,分别采用多项高精度表征设备:采用激光共聚焦拉曼光谱仪 (激发波长 532 nm, 激光功率严格控制在 1 mW 以下以避免局部热效应导致的相变) 和高分辨 X 射线衍射仪 (XRD, 采用 Cu K $\alpha$  辐射源, 步长  $0.01^\circ$ ) 对晶体的内部光学声子振动模式、晶格对称性与宏观相纯度进行表征;采用带有单色化 Al K $\alpha$  靶的 X 射线光电子能谱 (XPS) 深度分析各元素的化学价态及核心电子结合能 (所有结合能均以 C1s 峰的 284.8 eV 为基准进行校准);采用带有高性能能量色散 X 射线谱 (EDS, 加速电压 15 kV) 的场发射扫描电子显微镜表征微米尺度下的微区元素化学分布情况。

### 1.2 实验方法

为了避免二维磁性材料在空气中极易发生的氧化降解, $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  垂直范德华异质结器件的整个构筑过程均采用全干法聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 辅助机械剥离结合高精度显微定向转移技术,在充满高纯氩气 ( $\text{O}_2 < 0.01$  ppm,  $\text{H}_2\text{O} < 0.01$  ppm) 的严苛手套箱环境中完成制备<sup>[6,7,14]</sup>。首先,利用无掩膜激光直写 (Laser Direct Writing) 与电子束蒸发镀膜 (E-beam Evaporation) 技术,在覆盖有 285 nm 厚热氧化层的重掺杂硅 ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) 衬底上预制备底电极阵列 (Ti/Au, 5 nm/15 nm, 沉积真空度优于  $10^{-7}$  Torr)。随后,在手套箱内的高精度三维转移平台上,依次利用 PDMS 精确寻址并转移底层的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  薄片、作为中间非磁性隔离层的  $\text{WSe}_2$  薄片,以及顶层的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  薄片,每一层的转移均在显微镜下进行极其精确的角度与位置对准,最终形成物理接触紧密、界面完全由范德华力主导的“铁磁-半导体-铁磁”三明治结构。为了进一步挤出层间可能残留的微小气泡并优化范德华界面的耦合强度,异质结转移完成后在手套箱内进行了 120  $^\circ\text{C}$ 、10 分钟的背烘。

本研究所涉及的典型展示器件中,各层厚度经原子力显微镜 (AFM) 精确测量:底层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  薄片厚度约为 9.8 nm,中间层  $\text{WSe}_2$  厚度严格控制在约 16 nm (以确保既能阻断直接交换耦合,又能允许自旋输运),顶层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  厚度约为 7.7 nm;垂直交叠的有效结区面积 (即自旋极化电子实际发生输运的几何区域) 约为  $10.5 \mu\text{m}^2$ 。在整个严谨的实验周期内,我们共成功制备并全面测试了多个具有相似几何尺寸与膜厚比例的重复器件,这些器件均观察到了高度一致且稳定的磁输运现象,确保了本文科学结论的极高可重复性与可靠性。制备完成的器件被迅速装载入多场低温物性测量系统中进行极低温至近室温区间的精密电学与磁输运测试,测量采用标准的四线法或准四线法电极配置以消除接触电阻干扰,磁场扫描速率严格设定为 30 Oe/s

以避免动态磁滞效应，测试过程中的环境温度波动由高精度控温仪控制在  $\pm 0.05\text{ K}$  以内。器件磁电阻率 (MR) 按如下公式计算：

$$\text{MR} = (\text{R}_{\text{AP}} - \text{R}_{\text{P}}) / \text{R}_{\text{P}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中： $\text{R}_{\text{AP}}$  表示上下两个铁磁层处于反平行磁化排列（高阻态）时的器件电阻， $\text{R}_{\text{P}}$  表示铁磁层处于平行磁化排列（低阻态）时的器件电阻。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ 晶体的结构与表征

为了严谨验证所生长的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  体相单晶的物相纯度及微观晶体学质量，对其进行了全面的谱学和成分表征。如图 1(a) 的光学拉曼光谱所示， $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  晶体在  $100\sim 150\text{ cm}^{-1}$  的低频波段区间内，展现出了两个强度极高且半峰宽极其狭窄的尖锐特征振动峰。这些特征峰对应于材料特定对称性下的面内与面外光学声子模式，其尖锐无展宽的特性印证了晶体内部具有明确且高度有序的晶格结构，不存在显著的非晶化或强烈的晶格畸变。如图 1(b)，XRD 图谱的广角扫描在  $2\theta$  为  $10^\circ$  至  $90^\circ$  的宽范围内呈现出一系列等间距分布、极其锐利的衍射峰。根据布拉格衍射定律 (Bragg's Law)，这些峰完全对应于该层状材料的 (00l) 晶面族。这一结果直接表明，所生长的单晶  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  不仅相纯度极高，

且沿  $c$  轴（垂直于范德华层状平面的方向）具有极强的优先取向及近乎完美的周期性层状堆叠，这为后续通过蓝膜胶带进行大面积、原子级平整解理提供了极好的内秉力学基础<sup>[17]</sup>。

XPS 高分辨谱图进一步从核心电子能级的物理层面深入确认了晶体中各元素的化学价态及表面化学键合环境（图 2）。图 2(a) 清晰显示了 Fe 2p 轨道的自旋-轨道耦合分裂峰，其中 Fe 2p<sub>3/2</sub> 主峰位精准地落于约  $710\text{ eV}$  处，这完全符合铁元素在铁基碲化物中的金属及微弱共价键合状态，证实了材料的高纯度。图 2(b) 和图 2(c) 则分别详细显示了 Ga 3d 轨道（约  $19\text{ eV}$  附近）和 Te 3d 轨道（发生显著自旋轨道分裂为 3d<sub>3/2</sub> 和 3d<sub>5/2</sub>）的特征吸收能级。三者的信号峰位分布与积分强度面积比例，在进行相对敏感因子 (RFS) 校正后，完全符合目标  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  材料严格的化学组成设计<sup>[19]</sup>。

此外，为了在更大的空间尺度上验证材料的均匀性，EDS 大面积面扫描结果（图 3）全景展示了数百微米宽的晶体自然剥离面上 Fe、Ga 和 Te 三种关键元素的空间分布态势。结果显示，这三种元素的特征 X 射线信号分布高度重合，如同像素般均匀、密集地覆盖了整个二维探测区域。在视场内未发现任何局域性的元素偏析、富集点或第二相团聚颗粒，这一宏观与微观相统一的元素分布结果，彻底证明了所合成单晶材料在化学组分上的极端均匀性。

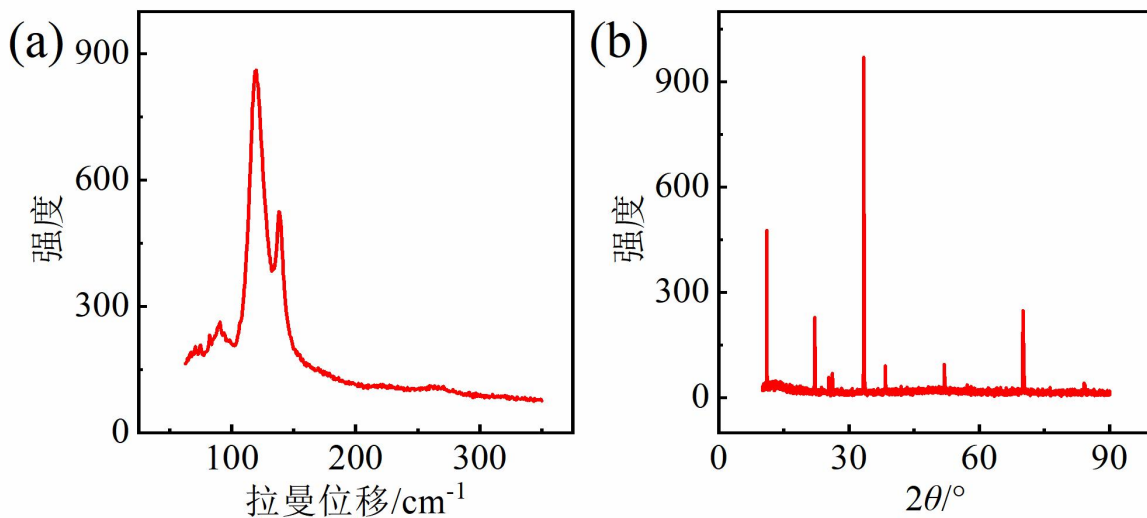
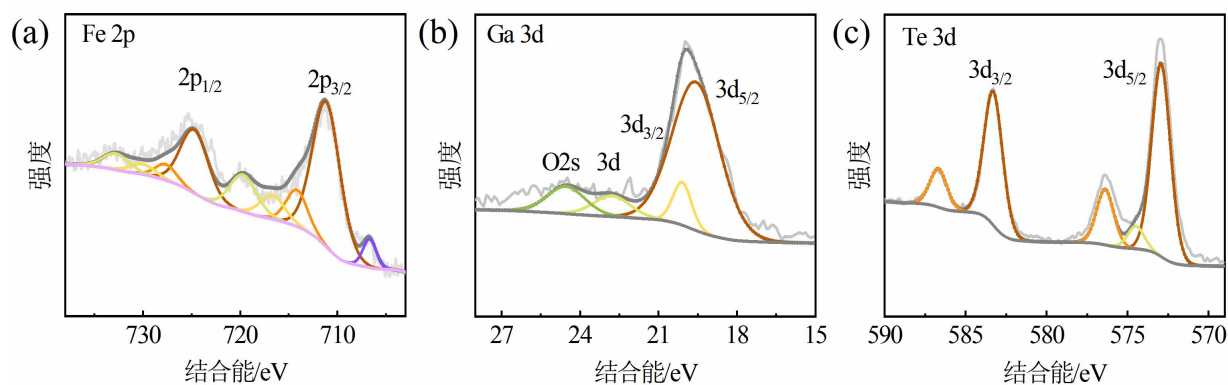
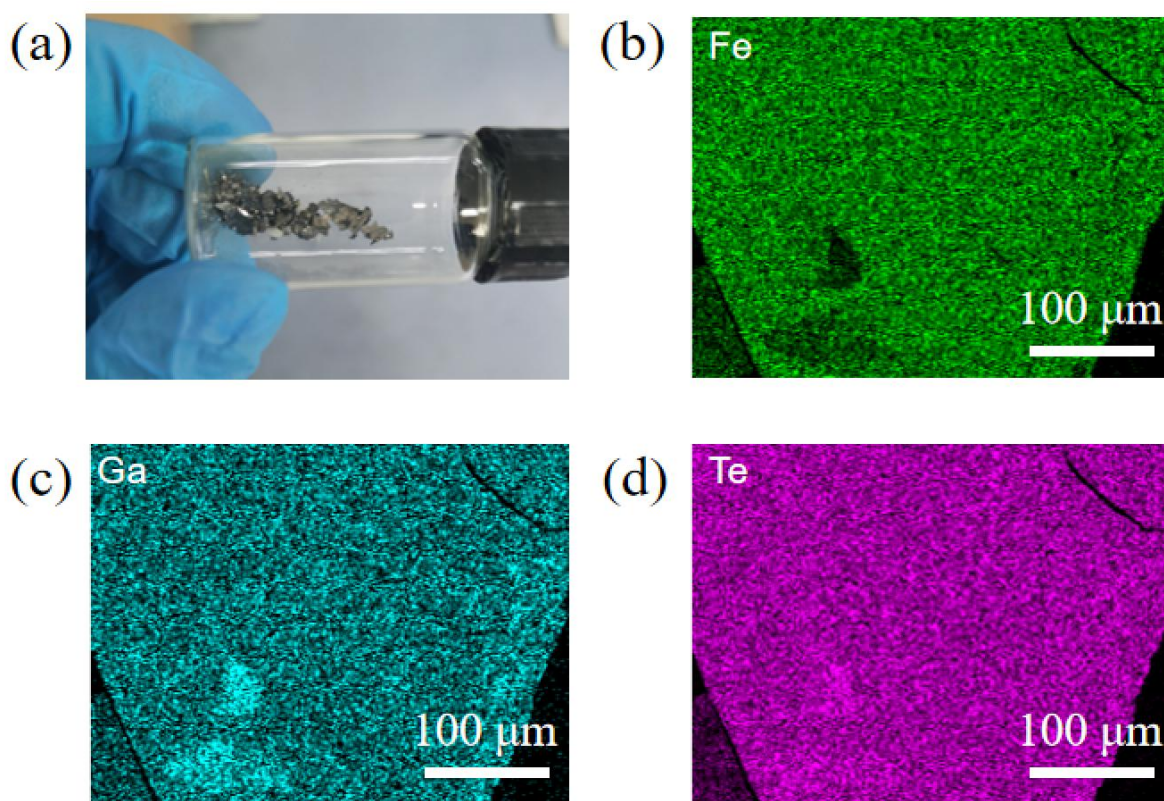


图 1  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  晶体的拉曼光谱与 XRD 图谱  
Fig. 1. Raman spectrum and XRD pattern of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  crystals

图 2  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  晶体的高分辨 XPS 谱图Fig. 2. High-resolution XPS spectra of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  crystals图 3  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  晶体形貌及 EDS 元素面扫描能谱图Fig. 3. Morphology and EDS elemental mapping of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  crystals

## 2.2 异质结构及垂直电输运特性

利用上述经多重验证的高质量单晶，我们成功构筑了自旋阀微纳垂直异质结构。在图 4(a)的高倍率光学显微图像中，可以极其直观且清晰地观察到器件的三维空间层叠形貌及与金属电极的接触状态。多边形的顶层与底层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  铁磁薄片，被呈现半透明的  $\text{WSe}_2$  非磁性半导体间隔层在空间上分隔，其中，黄色虚线处代表底层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ ，黑色虚线

处代表中间层  $\text{WSe}_2$ ，红色虚线处代表顶层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ 。为了精确获取各结构层的几何参数，我们利用原子力显微镜 (AFM) 对异质结区域进行了高分辨的形貌表征，如图 4(b)所示。AFM 图像清晰地展示了各薄片的台阶高度剖面，证实了底层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ 、中间层  $\text{WSe}_2$  以及顶层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的厚度分别约为 9.8 nm、16 nm 和 7.7 nm。这一高精度的厚度确认不仅验证了前述制备工艺的精准度，也

为后续自旋扩散长度与界面散射的分析提供了确切的几何边界条件。

为了探明该全固态范德华异质界面的基础电荷传输机制,图 4(c)详细展示了器件在 250 K 环境温度下的静态直流电压-电流 (I-V) 特性曲线。在设定的 -0.02 V 至 0.02 V 精密测试电压区间内,器件的纵向电流响应呈现出极其完美的线性特征(即恒定的电阻斜率),并且数据点严格平滑地穿过坐标系的物理原点,最大测试电流达到  $\pm 1.0 \mu\text{A}$ 。这一线

性的电学输出证明  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  铁磁电极与  $\text{WSe}_2$  间隔层界面处形成了极其优异的欧姆接触。从图 4(d) 的变温电阻 (R-T) 曲线可以看出,当温度从 300 K 逐渐冷却时,器件纵向电阻从约 25.5 k $\Omega$  平滑下降;在降至 100 K 附近时,电阻达到极小值约 22.3 k $\Omega$ ,展现出典型的金属导电特性。而在 100 K 以下的极低温区,器件电阻随着温度的进一步降低而发生反常增加,这印证了磁性金属体系中特征的 Kondo 散射效应<sup>[19]</sup>。

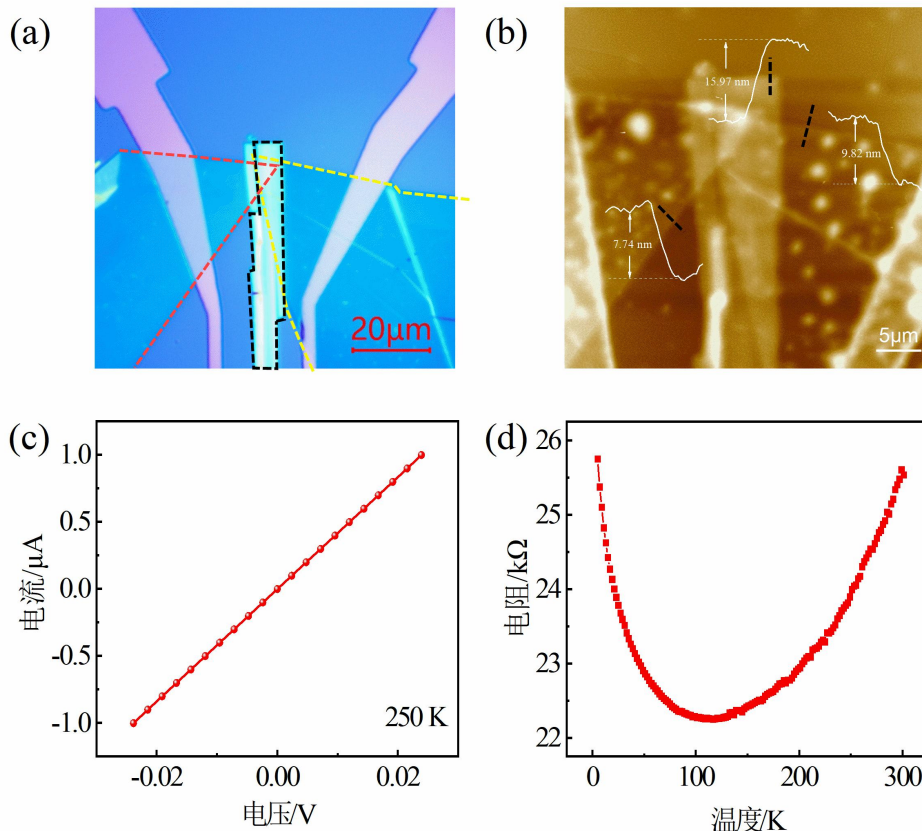


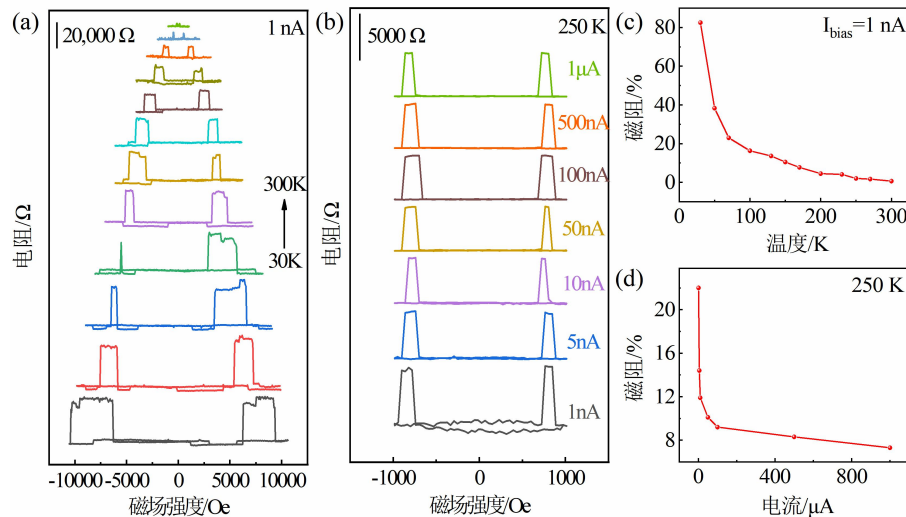
图 4  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  异质结的光学形貌与基础电输运特性

Fig. 4. Optical image and basic electrical transport properties of the  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  heterojunction

### 2.3 自旋阀磁电阻及其偏置电流调控

器件的磁电阻特性主要在 250 K 温度下进行深入测试。图 5(a)和图 5(b)分别展示了面外磁场扫描过程中的电阻变化曲线。随着磁场的往复扫描,器件电阻呈现出具有明显层次的台阶状磁滞回线。这种台阶状电阻的形成,是因为底层和顶层  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  由于几何尺寸或微观形貌的差异具有不同的矫顽力<sup>[8]</sup>。在扫场过程中,矫顽力较小的一层首先发生磁矩翻转,导致上下电极磁化方向由平行转为反平行,电阻跃升至高阻平台(RAP);磁场继续增大时,第二层电极发生翻转,磁化方向再次平行,电阻回落至低阻态(RP)。这一过程充分说明在全二维体系中成功实现了自旋阀效应。

该器件的磁电阻率对偏置输运电流表现出极强的敏感性。图 5(b)详细记录了 250 K 下偏置电流从 1 nA 逐步增大至 1  $\mu\text{A}$  时磁电阻的演变情况。当施加极低的 1 nA 电流时,器件表现出最为宽阔和显著的台阶状电阻响应。随着偏置电流逐渐增大,高低阻态之间的绝对差值不断收窄,并在图 5(d)中呈现出急剧下降的趋势。统计显示,250 K 时的磁电阻率从 1 nA 下的最高值约 22%显著衰减,在偏置电流达到 1  $\mu\text{A}$  时已降至 8%左右。这一衰减机制是因为较大的偏置电流使得高能载流子在  $\text{WSe}_2$  非磁性层内部或异质界面处遭遇更为频繁的散射与自旋翻转过程,从而降低了自旋注入与探测的效率。

图 5 250 K 下  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  异质结的自旋阀磁电阻及偏置电流调控效应Fig. 5. Spin-valve magnetoresistance and bias-current modulation of the  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  heterojunction at 250 K

## 2.4 磁场角度无关磁电阻的各向同性特征

为了评估外场方向对自旋阀输运稳定性的影响,在保持 250 K 恒温 and 固定偏置电流的条件下,对器件施加了不同角度的磁场。图 6(a)展示了将外加磁场与样品平面法线的夹角在  $360^\circ$  空间内进行旋转测试的系列磁电阻曲线。结果清晰地表明,无论外加磁场以何种倾角入射,器件都能输出轮廓分明的台阶状磁电阻信号,且不同角度下的磁电阻曲线形态高度一致。

从图 6(b)提取的磁电阻率随角度分布关系可以看出,异质结的磁电阻率在  $0^\circ$  至  $360^\circ$  的所有测试角

度下均基本维持在同一水平线,未发生连续性偏移,展现出了完美的角度无关(各向同性)磁电阻特征[2,3,5]。该现象的物理根源在于  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  二维晶体所具备的极其强烈的垂直磁各向异性。在强大的各向异性能量势垒约束下,即使外加磁场的矢量方向发生偏转,  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的内部磁化方向也不会顺应外场进行连续性旋转。相反,其磁矩始终被锚定在垂直于样品表面的两个稳定易磁化轴上。只有当外场在垂直方向的投影分量超过临界场时,磁矩才会发生瞬间突变翻转。因此,两个铁磁层之间始终维持着严格的平行或反平行关系,使得最终测得的电阻差值对外加磁场的具体入射方向完全不敏感。

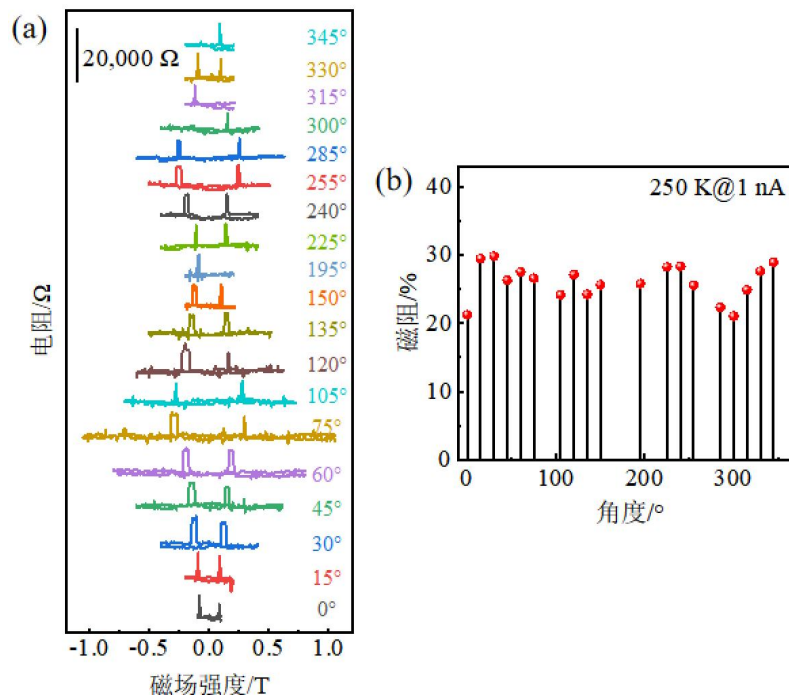


图 6 250 K 下异质结的角度依赖磁电阻

Fig. 6. Angle-dependent magnetoresistance of the heterojunction at 250 K

### 3 讨论

纵观全篇研究, 本文通过从单晶材料的热力学基础生长到微纳器件的高真空精密加工, 再到极其严苛的多物理场维度下的极低温与高温电磁输运测试, 确凿且系统地证实了这种完全由原子级平整的二维范德华材料逐层堆叠而成的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  全固态垂直异质结, 在高达 250 K 这一接近常规工程工作温度的高温区间内, 依然能够克服强烈的声子热涨落干扰, 输出极其稳定、台阶特征清晰可辨的自旋阀宏观巨磁阻信号。相比于传统半导体工业界普遍采用的基于金属薄膜磁控溅射工艺生长的薄膜自旋阀 (如自旋阀多层膜 GMR 或 MTJ) 器件, 该二维物理器件体系极其巧妙地利用了范德华二维晶体材料表面天然不存在悬挂键的化学钝化特性。这种原子级的“完美表面”从物理根源上规避了界面原子的相互扩散、非晶化层生成以及因晶格常数严重失配而引入的位错与界面粗糙度缺陷, 从而成功实现了近乎完美的优异无势垒欧姆接触物理界面<sup>[11,12]</sup>。电学调控测试表明, 器件的磁电阻率对偏置电流具有显著的响应, 这一输运规律不仅揭示了高能载流子在二维异质界面处的自旋散射机制, 也为未来通过能带工程精准调控自旋输运效率提供了重要的实验依据<sup>[20,21]</sup>。

更为核心与具有前瞻应用价值的是, 通过极具挑战性的全空间变角度连续旋转强磁场测试, 本研究以确凿的电学证据明确了该全二维体系具有一种极其罕见且极具应用前景的物理特征: 即完全不受外部复杂磁场入射方向干扰的角度无关 (各向同性) 磁电阻响应行为。这种建立在铁磁晶体材料极强内禀单轴垂直磁各向异性 (PMA) 物理基础上的独特输运性质, 赋予了该类自旋微纳器件极高的环境服役鲁棒性。这意味着在未来的复杂电磁场环境乃至深空探测应用中, 应用此类芯片结构时, 传感器件或非易失性存储单元在面对不可预测的杂散场或未完全对准的写入磁场时, 无需再配备体积庞大、算法复杂且功耗高昂的精密空间角度校准与外场补偿反馈电路, 即可维持极高可靠性的稳定逻辑电信号输出与读写操作。此外, 将此类自旋阀 (SV-MTJ) 结构与具有极高磁电阻 (XMR) 和强自旋轨道矩 (SOT) 效应的二维拓扑材料 (如  $\text{WTe}_2$  等) 相结合<sup>[16, 27-30]</sup>, 有望在未来实现无外场辅助的确定性磁化翻转, 为开发下一代超低功耗、抗干扰的新型自旋电子器件提供了详实的实验数据支撑与广阔的设计空间<sup>[1, 2, 23]</sup>。

### 4 结论

本文研究了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  异质结构的自旋阀效应。

(1) 采用高温自熔剂法成功制备了高结晶质量的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  单晶。拉曼与 XRD 确认了其层状单晶结构特征, XPS 与 EDS 证明了其化学价态的准确性及微观元素分布的高度均匀性。

(2) 基于机械剥离与干法转移成功构筑了  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  垂直范德华异质结构。电学测试表明器件在 250 K 下呈现出优异的线性欧姆接触响应, R-T 曲线证实了该体系中金属导电特性与低温 Kondo 散射效应的共存现象。

(3) 器件在 250 K 面外磁场环境下展现出轮廓清晰的台阶状自旋阀磁电阻。测试结果表明磁电阻率高度依赖于外部偏置条件, 随着偏置电流从 1 nA 增大至 1  $\mu\text{A}$ , 因界面高能电子散射加剧, 磁电阻率产生了显著的衰减。

(4) 异质结在 250 K 全空间磁场旋转下展现出优异的角度无关磁电阻特征。该特性源于  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  内禀的强垂直磁各向异性对磁矩翻转路径的严格限制, 该结论为未来设计开发抗干扰二维自旋电子器件提供了详实的实验数据支撑与理论参考。

### 声明

利益冲突声明: 全体作者声明在本文的研究过程及文章撰写中, 不存在任何形式的学术或商业潜在利益冲突。

数据可用性声明: 支撑本研究核心科学结论的所有原始光谱数据、电磁测量数据和微磁学分析资料, 均具有高度可复现性, 研究人员可向通讯作者提出合理请求以获取完整数据文件。

### 参考文献

- [1] Yang H, Valenzuela S O, Chshiev M, et al. Two-dimensional materials prospects for non-volatile spintronic memories[J]. *Nature*, 2022, 606(7915): 663-673.
- [2] He X, Zhang C H, Zheng D X, et al. Nonlocal spin valves based on graphene/ $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  van der Waals heterostructures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(7): 9649-9655.
- [3] Wang Z, Sapkota D, Taniguchi T, et al. Tunneling spin valves based on  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{hBN}/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  van der Waals heterostructures[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4303-4308.
- [4] Zhang G J, Guo F, Wu H, et al. Above-room-temperature robust ferromagnetism in a cleavable van der Waals crystal[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5067.

- [5] Pan H Y, Singh A K, Zhang C S, et al. Room-temperature tunable tunneling magnetoresistance in  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  van der Waals heterostructures[J]. *InfoMat*, 2024, 6(1): e12504.
- [6] Fei Z Y, Huang B, Malinowski P, et al. Two-dimensional itinerant ferromagnetism in atomically thin  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ [J]. *Nature Materials*, 2018, 17(9): 778-782.
- [7] Deng Y, Yu Y J, Song Y C, et al. Gate-tunable room-temperature ferromagnetism in two-dimensional  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ [J]. *Nature*, 2018, 563(7729): 94-99.
- [8] Lin H L, Yan F G, Hu C, et al. Spin-valve effect in  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{MoS}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  van der Waals heterostructures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(39): 43921-43926.
- [9] Burch K S, Mandrus D, Park J G. Magnetism in two-dimensional van der Waals materials[J]. *Nature*, 2018, 563(7729): 47-52.
- [10] Gong C, Li L, Li Z L, et al. Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals[J]. *Nature*, 2017, 546(7657): 265-269.
- [11] Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E, et al. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit[J]. *Nature*, 2017, 546(7657): 270-273.
- [12] Sierra J F, Fabian J, Kawakami R K, et al. Van der Waals heterostructures for spintronics and optospintronics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(8): 856-868.
- [13] Ahn E C. 2D materials for spintronic devices[J]. *npg 2D Materials and Applications*, 2020, 4(1): 17.
- [14] Jiang S, Li L, Wang Z, et al. Spin tunnel field-effect transistors based on two-dimensional van der Waals heterostructures[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(4): 159-163.
- [15] Gibertini M, Koperski M, Morpurgo A F, et al. Magnetic 2D materials and heterostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(5): 408-419.
- [16] Li W H, Zhu W K, Zhang G J, et al. Room-temperature van der Waals 2D ferromagnet switching by spin-orbit torques[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(7): 2311326.
- [17] Zhang X M, Wang J, Zhu W K, et al. Giant Magneto-Optical Effect in van der Waals Room-Temperature Ferromagnet  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ [J]. *Chinese Physics Letters*, 2024, 41(6): 067503.
- [18] Wang X, Yang W, Yang W, et al. Spin manipulation by giant valley-Zeeman spin-orbit field in atom-thick  $\text{WSe}_2$ [J]. *Applied Physics Reviews*, 2022, 9(3): 031402.
- [19] Zhu J X, Janoschek M, Chaves D S, et al. Electronic correlation and magnetism in the ferromagnetic metal  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ [J]. *Physical Review B*, 2016, 93(14): 144404.
- [20] Wang X, Tang J, Xia X X, et al. Current-driven magnetization switching in a van der Waals ferromagnet  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ [J]. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaaw8904.
- [21] Soumyanarayanan A, Reyren N, Fert A, et al. Emergent phenomena induced by spin-orbit coupling at surfaces and interfaces[J]. *Nature*, 2016, 539(7630): 509-517.
- [22] Manchon A, Miron I M, Jungwirth T, et al. Current-induced spin-orbit torques in ferromagnetic and antiferromagnetic systems[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2019, 91(3): 035004.
- [23] Dieny B, Prejbeanu I L, Garello K, et al. Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronics industry[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(8): 446-459.
- [24] Hellman F, Hoffmann A, Tserkovnyak Y, et al. Interface-induced phenomena in magnetism[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(2): 025006.
- [25] Zutic I, Fabian J, Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and applications[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76(2): 323-410.
- [26] Chappert C, Fert A, Van Dau F N. The emergence of spin electronics in data storage[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(11): 813-823.
- [27] MacNeill D, Stiehl G M, Guimaraes M H D, et al. Control of spin-orbit torques through crystal symmetry in  $\text{WTe}_2$ /ferromagnet bilayers[J]. *Nature Physics*, 2017, 13(3): 300-305.
- [28] Ali M N, Xiong J, Flynn S, et al. Large, non-saturating magnetoresistance in  $\text{WTe}_2$ [J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 205-208.
- [29] Shi S, Liang S, Zhu Z, et al. All-electric magnetization switching and Dzyaloshinskii-Moriya interaction in  $\text{WTe}_2$ /ferromagnet heterostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(10): 945-949.
- [30] Kao I H, Muzzio R, Zhang H, et al. Deterministic magnetization switching using lateral spin-orbit torque[J]. *Nature Materials*, 2022, 21(9): 1029-1034.

## Research on Spin-Valve Effect Based on $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ van der Waals Heterostructures

Ji Shengxiang<sup>1</sup>, Jia Zhiyan<sup>1\*</sup>, Guo Xueqi<sup>2\*</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin; 2. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin

**Abstract:** Spin valves are core components in spintronics, widely used in magnetic memory and sensing. To advance the miniaturization and low power consumption of 2D spintronic devices, this study systematically investigates the magnetotransport properties of a fully 2D van der Waals spin valve heterostructure based on ferromagnetic  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  and semiconductor  $\text{WSe}_2$ .  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  single crystals were synthesized via a high-temperature self-flux technique, and their excellent crystalline quality and uniform elemental distribution were confirmed by Raman spectroscopy, XRD, XPS, and EDS. Subsequently, the  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{WSe}_2/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  vertical heterostructure was fabricated using mechanical exfoliation and dry transfer techniques, and its transport properties were evaluated in a physical property measurement system. Experimental results demonstrate that the heterojunction shows a strictly linear I-V response at 250 K, establishing an excellent Ohmic contact. Under an out-of-plane magnetic field, the device exhibits a distinct step-like magnetoresistance curve at 250 K, firmly confirming the spin valve effect. Furthermore, the magnetoresistance ratio decays significantly as the bias current increases from 1 nA to 1  $\mu\text{A}$ , and remains highly constant over a  $360^\circ$  range when the direction of the applied magnetic field is varied at 250 K, demonstrating a completely angular-independent characteristic. This unique isotropic transport behavior originates from the intrinsic strong perpendicular magnetic anisotropy of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ . This study verifies the feasibility of achieving spin valve modulation in all 2D systems and provides a solid physical basis for constructing magnetic angular-insensitive spin transport devices.

**Keywords:**  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ ;  $\text{WSe}_2$ ; van der Waals heterostructure; spin valve; magnetic anisotropy