

# Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 异质结的反对称磁阻机制\*

孙自卿<sup>1)2)3) #</sup> 李治玥<sup>3)4) #</sup> 张崇磊<sup>1)</sup> 王乐<sup>3)</sup> 陈廷勇<sup>2)3) †</sup>

1) (深圳大学微纳光电子学研究院纳米光子学研究中心, 射频异质结构集成全国重点实验室, 深圳 518060)

2) (南方科技大学深圳量子科学与工程研究院, 深圳 518055)

3) (国际量子研究院, 深圳 518048)

4) (深圳大学物理与光电工程学院, 深圳 518060)

(2025 年 11 月 4 日收到; 2026 年 1 月 23 日收到修改稿)

二维范德瓦耳斯磁性材料为探索低维磁性与自旋电子器件提供了理想平台, 其中全铁磁异质结中新奇磁阻现象的微观机制是当前研究的关键问题. 本研究旨在揭示 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> (FGaT/FGT) 异质结在垂直磁场下表现出的多阶跃变与反对称磁阻等复杂行为的物理起源. 研究通过制备高质量的 FGaT/FGT 异质结器件, 并系统测量其在不同温度下的磁输运特性, 结合等效电路模型与磁化动力学进行分析. 结果表明, 异质结的反对称磁阻信号主要源于上下两层铁磁材料因磁化状态非共线导致的 AHE 电压失配, 该失配会驱动局域非平衡环流, 从而显著调制纵向电阻. 研究进一步发现, FGaT 层内部存在“界面区-体区”双重磁化翻转过程, 其由自然氧化层引入的交换偏置效应是导致磁滞回线不对称性与多步翻转的直接原因. 变温测量表明, 随着温度升高, 层间耦合与铁磁各向异性减弱, 反对称信号逐渐消失, 器件从低温下的非平衡输运态转变为高温的顺磁退耦合态. 本工作阐明了反对称磁阻是 AHE 环流、界面交换偏置与温度效应协同作用的结果, 为理解二维磁性界面中的电荷输运机制提供了新见解, 并对设计高性能自旋电子器件具有指导意义.

**关键词:** 范德瓦耳斯异质结, 反对称磁阻, 反常霍尔效应**DOI:** 10.7498/aps.75.20251500**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251500

## 1 引言

二维范德瓦耳斯磁性材料, 以其独特的层状结构、可调的电子特性及强大的自旋-轨道耦合, 为探索低维磁性与开发新一代自旋电子器件开辟了前景广阔的研究平台<sup>[1]</sup>. 相较于传统三维薄膜, 此类材料可通过机械剥离与干法转移技术灵活构建异质结, 实现对界面磁耦合和电荷输运等物理特性的精准调控<sup>[2-4]</sup>. 在众多候选材料中, 兼具室温铁磁性与强垂直磁各向异性的 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> (FGaT) 和 Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> (FGT) 备受关注, 被视为构建高密度、低功耗磁存储与逻辑器件的理想体系<sup>[5,6]</sup>. 特别是

基于 FGaT 与 FGT 构建的全铁磁范德瓦耳斯异质结, 为深入研究层间磁耦合以及由此产生的自旋相关输运现象提供了优异的模型系统<sup>[7]</sup>.

近年来, 针对铁磁/非磁/铁磁三明治结构 (如 FGT/石墨烯/FGT) 的研究揭示了诸多非常规磁输运行为. 例如, 由自旋-动量锁定或反常霍尔效应 (AHE) 诱导的反对称磁阻已被多次观测到<sup>[8]</sup>. Albarakati 等<sup>[7]</sup> 指出界面自旋轨道耦合是产生反对称信号的关键, 而 Wu 等<sup>[9]</sup> 进一步阐明了石墨烯中间层在调节层间耦合强度与磁阻对称性方面的复杂角色. 此外, 在反铁磁/铁磁异质结 (如 MnPS<sub>3</sub>/FGT) 中, 界面反铁磁耦合也被证明能够诱导非互易的电荷输运<sup>[10]</sup>. 这些成果显著深化了我们对二维磁性界面中自旋输运机制的理解. 然而, 对于 FGaT/FGT

\* 广东省重点领域研发计划 (批准号: 2020B0303050001, 2021B0101300001) 和国家自然科学基金 (批准号: 11974158) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: chenty@sustech.edu.cn

等结构相对简单的全铁磁异质结, 其在垂直磁场下表现出的复杂磁阻行为, 其物理起源至今仍未明确. 这些行为包括多阶磁阻跃变、显著的反对称峰型以及磁滞回线的不对称性<sup>[11,12]</sup>. 值得注意的是, 即便在磁性特性完全对称、电流与电压触点布置得当的样品中, 此类不对称的磁阻效应也时有发生, 亟待深入探究<sup>[13,14]</sup>. 现有线索表明, 该复杂性可能源于磁畴动力学、界面氧化、反常霍尔环流以及温度效应等多重物理机制的协同作用<sup>[15]</sup>. 例如, Cheng 等<sup>[16]</sup>在 Co/Pt 多层膜中将类似反对称磁阻归因于磁畴壁处的非平衡电流, 但该机制在范德瓦耳斯界面中的适用性尚待验证. 另一方面, FGT 等材料在空气中易发生表面氧化, 形成反铁磁性的氧化层 (如 O-FGT), 从而引入交换偏置效应<sup>[17]</sup>. 尽管 Du 等<sup>[18]</sup>与 Balan 等<sup>[19]</sup>观察到自然氧化对 FGT 磁性的非易失性调控, 但此类界面效应如何影响异质结的整体磁输运行为, 尤其是其对反对称信号的贡献, 仍缺乏系统的实验分析与理论建模. 同时, 温度变化会差异化地影响异质结中各铁磁层的矫顽场与层间耦合强度, 从而加剧磁化翻转过程的复杂性<sup>[20]</sup>. Zhou 等<sup>[11]</sup>虽在 FGT 基异质结中观测到电压可调的磁阻开关效应, 但其多态磁化翻转的微观机理仍有待深化阐释.

本文旨在通过系统的实验表征, 揭示 FGaT/FGT 范德瓦耳斯异质结中反对称磁阻的多物理机

制耦合起源. 我们制备了高质量的 FGaT/FGT 双层器件, 重点考察了其在不同温度下的磁输运特性. 结合等效电路模型与磁化动力学分析, 重点阐明以下 3 个核心问题: 1) 上下两层铁磁材料因 AHE 电压失配导致的局域非平衡电流, 如何贡献于反对称峰型信号; 2) 界面氧化诱导的交换偏置效应, 如何引发磁滞回线的不对称性及多阶磁化翻转行为; 3) 温度变化如何通过调控各层矫顽场及层间耦合强度, 从而影响整体磁阻响应. 本研究不仅为理解二维磁性异质结中的复杂输运现象提供了新的物理视角, 也为未来设计基于界面与磁畴工程的高性能、多态自旋电子器件提供了坚实的理论基础与实验基础数据.

## 2 实验

本研究所用的 FGaT/FGT 异质结器件制备于带有 300 nm 热生长 SiO<sub>2</sub> 的硅衬底上. 首先, 通过激光直写光刻技术在衬底上定义电极图形, 随后采用电子束蒸发法依次沉积厚度为 5 nm 的钛 (Ti) 黏附层和 50 nm 的金 (Au) 层, 形成 Ti/Au(5 nm/50 nm) 双层金属电极<sup>[21]</sup>. FGaT 与 FGT 薄层通过机械剥离法从其块体晶体上获得, 并借助聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 薄膜的干法转移技术, 精确地将薄层转移至预制备的电极上, 以构建面内异质结结构 (器件光学图像见图 1(a), 结构示意图见图 1(b)).

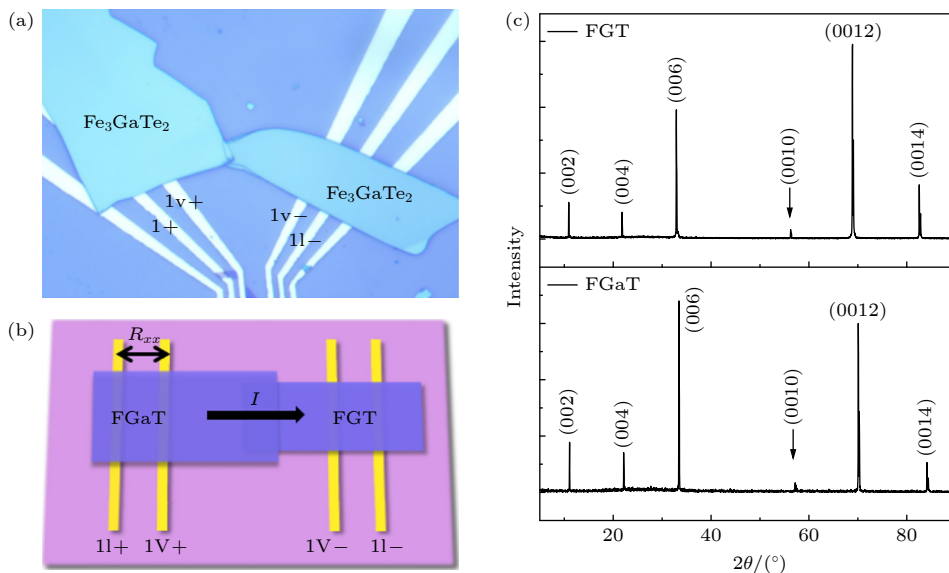


图 1 FGaT/FGT 异质结器件 1 的磁阻特性 (a) 器件光学图像, 上层是 FGaT, 下层是 FGT; (b) 器件的结构以及电极示意图; (c) FGaT 与 FGT 的 XRD 谱图

Fig. 1. Characterization of the magnetotransport properties of the FGaT/FGT heterojunction device 1: (a) Optical micrograph of the device, with the top layer being FGaT and the bottom layer FGT; (b) schematic diagram of the device structure and electrodes; (c) XRD spectra of FGaT and FGT.

两种材料的晶体结构通过 X 射线衍射 (XRD) 进行表征, 结果如图 1(c) 所示.

器件的磁输运测量在综合物性测量系统 (quantum design PPMS-14T) 中进行, 最低温度可达 1.8 K, 最大垂直面外磁场为 14 T. 电学测量采用标准的四端法, 以消除接触电阻的影响<sup>[22]</sup>. 测量时, 电流 ( $I$ ) 沿异质结面内方向施加, 从  $I^+$  电极注入, 经异质结区域后由  $I^-$  电极引出, 电压 ( $V$ ) 信号则直接从结区两侧的  $V^+$  与  $V^-$  电极读取, 磁场 ( $H$ ) 垂直于样品平面方向施加.

### 3 结果与讨论

图 1(b) 展示了 FGaT/FGT 异质结纵向电阻 ( $R_{xx}$ ) 的测量方式: 采用四探针法, 电流从最外侧电极输入/输出, 电压则在中间两个电极间测量. 利用此方法, 在 10 K 温度下观测到该异质结表现出明显的磁滞与非线性的磁输运行 (图 2(a)), 其最突出的特征是在零场附近出现了强烈的反对称磁阻 (MR), 具体表现为随磁场扫描方向不同而呈现极性相反的尖锐峰: 当磁场从负向扫至零时 (10 K-扫描), 出现负 MR 峰; 而从正向扫至零时 (10 K+扫描)

则出现正 MR 峰. 该反对称信号叠加于宽阔的磁滞回线之上, 且 MR 曲线在磁化翻转过程中呈现多步转变, 表明 FGaT 与 FGaT 两层存在逐层翻转行为, 反映了二者具有不同的矫顽场及可能的弱层间耦合. 反向电流测试表明, 该反对称峰型信号稳定出现, 不随电流方向改变. 将其主要归因于 AHE 诱导的局域非平衡电流机制: 在垂直各向异性的磁性多层结构中, 当电流、磁化与畴壁构型相互垂直时, 由于显著的反常霍尔效应, 当上下两层磁化翻转不同步时, 界面处会产生巨大的霍尔电势差. 这一电势差无法被平衡, 从而在畴壁附近产生环流, 从而对器件的  $R_{xx}$  产生额外贡献<sup>[17]</sup>, 这与在 FGT/石墨/FGT 等类似结构中报道的机制一致<sup>[16]</sup>. 鉴于所测  $R_{xx}$  主要来源于串联的 FGaT 与 FGT 层产生的 AHE 电压, 上述证据共同表明, 反对称信号源于上下两层铁磁材料 AHE 电压失配所驱动的非平衡环流效应.

图 2(b) 为器件 2 中 FGT 层采用两线法测得的  $R_{xx}$  随磁场变化曲线. 尽管存在一定噪声, 仍可清晰识别出两次明显的磁阻转变. 为明确其与异质结行为的关联, 将异质结与 FGT 层的 MR 曲线进行叠加对比 (图 2(b)). 结果显示, 在约  $\pm 3200$  Oe 和

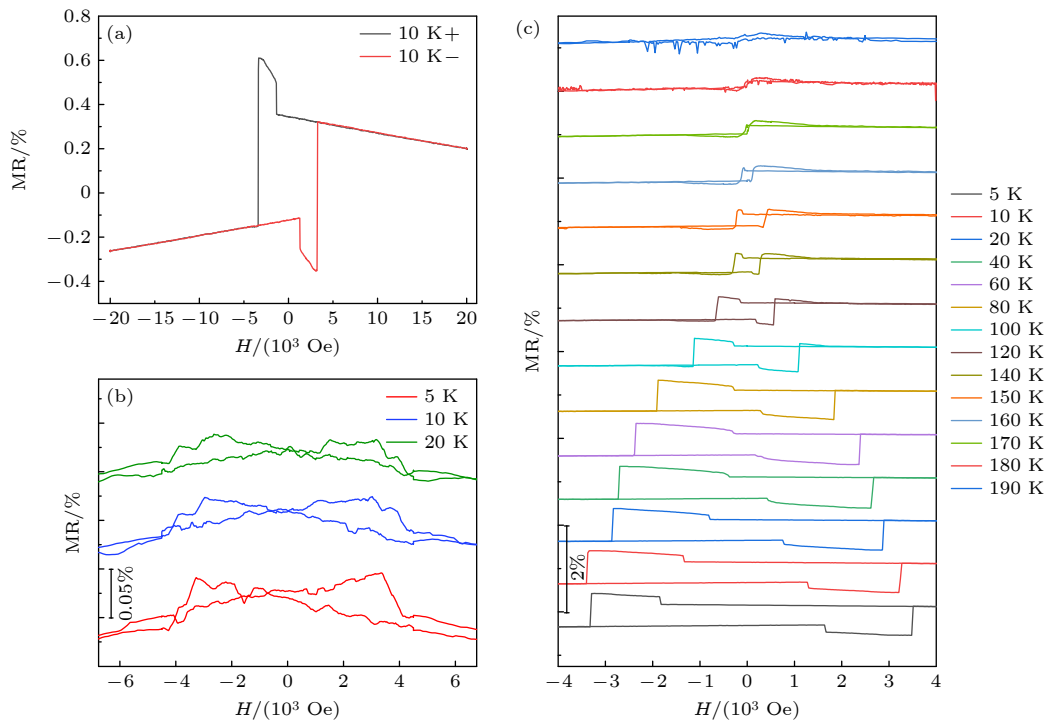


图 2 FGaT/FGT 异质结器件的磁阻特性 (a) 10 K 下器件的 MR 曲线; (b) FGT 的  $R_{xx}$  测量结果; (c) 器件的 MR 随温度变化  
Fig. 2. Magnetoresistance characterization of the FGaT/FGT heterostructure: (a) MR at 10 K; (b)  $R_{xx}$  of FGT; (c) MR vs. temperature.

3500 Oe 处, 异质结区的磁阻跳变与 FGT 层的转变位置相对应, 表明两者之间存在耦合关系. 其中, 第 2 次转变在总磁阻中初始表现较弱, 说明其本身磁阻变化幅度较小; 但随着温度升高, 该转变在总磁阻中逐渐凸显, 反映出其在升温过程中对器件整体响应的贡献增强.

FGaT/FGT 异质结在 5—190 K 温度区间内测得的 MR 随磁场 (−4000—4000 Oe) 的变化如图 2(c) 所示. 随着温度降低,  $R_{xx}$  逐渐呈现出宽平台特征, 表明由范德瓦耳斯间隙主导的层间耦合较弱, 导致 FGaT 与 FGT 两铁磁层的矫顽场差异在低温下更为显著, 从而引起磁化翻转过程的分步进行<sup>[23]</sup>. 在磁阻曲线上, 低温下可观察到明显的反对称峰结构, 其峰值随温度升高逐渐向零场方向靠拢, 反映出铁磁层各向异性随热涨落增强而减弱, 矫顽场相应降低的基本特性<sup>[24]</sup>. 温度达到 100 K 时, 在反对称峰附近出现第 2 个缓慢变化的磁阻; 当温度进一步升高至 180 K 以上时, 中间跳变特征逐渐消失; 至 190 K 时, 磁阻行为由低温的尖锐反对称峰转变为更明显的缓变背景信号, 表明器件在此温度区间内由 AHE 主导的非平衡输运机制被显著抑制, 磁响应行为趋于顺磁或退耦合态.

图 3(a) 展示了 FGaT 单层在 5—280 K 温度范围内测得的霍尔电阻 ( $R_{xy}$ ) 随磁场  $H$  的变化关系. 所有曲线均表现出明显的磁滞回线行为, 表明该信号主要由反常霍尔效应主导, 其物理起源为铁磁材料中磁化强度 ( $M$ ) 对横向输运的调制作用. 磁滞回线呈现出两个关键特征: 首先, 回线在正负磁场方向表现出轻微的不对称性, 这源于 FGaT 表面自然氧化层 (O-FGaT) 与体相铁磁层之间界

面耦合所诱导的交换偏置效应, 导致回线整体沿磁场轴发生偏移. 其次, 每一回线均呈现清晰的“双阶”结构, 即在低场区电阻变化陡峭, 而在高场区变化平缓. 该特征表明 FGaT 内部存在磁学性质不同的两个区域 (图 3(b) 示意模型): 区域 FM I 为 O-FGaT/FGaT 界面区, 受界面反铁磁耦合作用影响而被钉扎, 导致 FM I 的磁矩更难被外磁场反转, 其矫顽场较大, 磁化翻转缓慢, 对应高场区的缓变; 区域 FM II 为 FGaT 体区, 矫顽场较小, 磁化翻转快, 表现为低场区的陡变<sup>[17]</sup>.

随着温度从 5 K 升高至 280 K, 曲线发生系统性演变: 体区磁各向异性随温度升高迅速减弱, 其对应的快速翻转信号逐渐退化; 而界面区因各向异性本身较大且随温度变化缓慢, 其缓慢翻转特征在高温下仍得以保留<sup>[25]</sup>. 这一演化行为与图 2(c) 中 FGaT/FGT 异质结 MR 随温度的变化高度一致, 异质结 MR 回线由低温下具有快速反转的反对称峰, 随温度逐渐转变为有明显“双阶”台阶 (一个陡变一个缓变) 的形状, 再逐渐转变为高温下近乎闭合的缓变曲线, 说明异质结的宏观磁输运特性受到 FGaT 层内部“界面-体区”双重磁化机制的共同调控.

根据图 4(a) 所示的等效电路模型, FGT/FGaT 异质结的磁输运特性可由其显著的 AHE 主导. 如 (1) 式所示, 铁磁薄膜中的霍尔电压可表述为<sup>[26]</sup>

$$V_t = I(R_0 B + \mu_0 R_{\text{AHE}} M), \quad (1)$$

其中  $I$  表示电流强度,  $t$  表示厚度,  $R_0$  和  $R_{\text{AHE}}$  分别代表常规霍尔系数与反常霍尔系数,  $B$  和  $M$  则分别对应磁场感应与磁化的面外分量. 其中 AHE 项

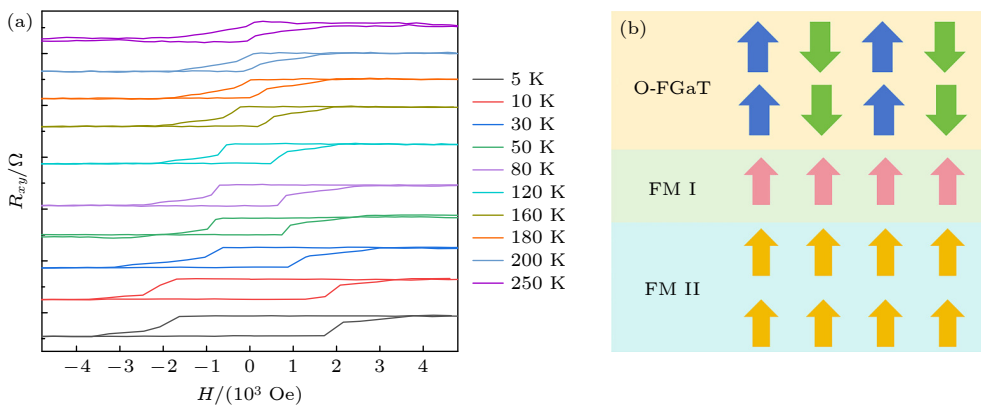


图 3 异质结中的 FGaT 层 (a)  $R_{xy}$  曲线随温度的变化; (b) 磁化示意图

Fig. 3. Properties of the FGaT layer within the heterojunction: (a)  $R_{xy}$  curves as a function of temperature; (b) corresponding magnetization schematic.

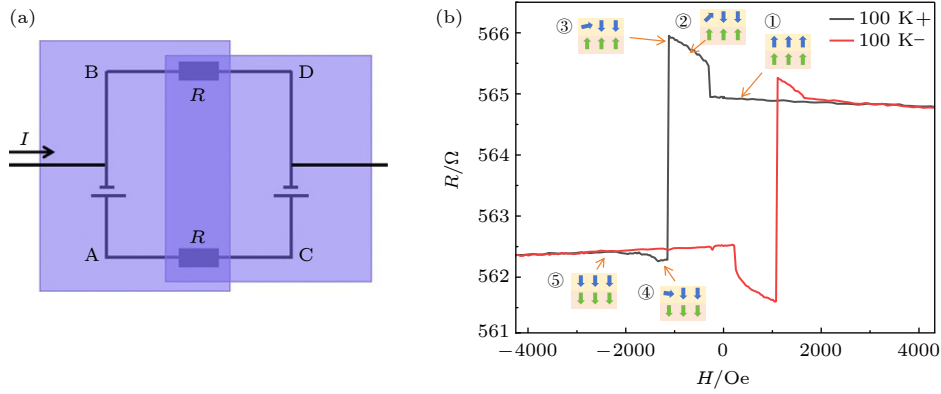


图 4 异质结模型分析 (a) 异质结有效电路图; (b) 各点磁化状态示意图

Fig. 4. Modeling and analysis of the heterojunction: (a) Equivalent circuit model; (b) schematic of the corresponding magnetization states.

的贡献远大于常规项, 因此在后续讨论中我们将忽略常规霍尔分量. 基于此, 上下两层铁磁材料 (FGT 与 FGaT) 在垂直磁场下会因边缘电荷积累而产生显著的霍尔电压, 分别记为  $V_{AB}$  和  $V_{CD}$ . 当这两层磁化状态不同导致  $V_{AB} \neq V_{CD}$  时, 将在异质结中引发电势差与非平衡电流. 图 4(b) 进一步给出了不同磁化状态对应的方程关系:

$$\textcircled{1} V_{AC}(\uparrow|\uparrow) = (IR + |V_{AB}| - |V_{CD}|)/2,$$

$$\textcircled{2} V_{AC}(\downarrow'|\uparrow) = (IR + |V_{AB}| + |V_{CD}'|)/2;$$

由于  $|M'| < |M|''$ , 所以  $|V_{CD}'| < |V_{CD}|''$ ,  $V_{AC}$  升高,

$$\textcircled{3} V_{AC}(\downarrow''|\uparrow) = (IR + |V_{AB}| + |V_{CD}|'')/2,$$

$$\textcircled{4} V_{AC}(\downarrow''|\downarrow) = (IR - |V_{AB}| + |V_{CD}|'')/2;$$

因为  $|V_{CD}|'' < |V_{CD}|$ ,  $V_{AC}$  继续升高,

$$\textcircled{5} V_{AC}(\downarrow|\downarrow) = (IR - |V_{AB}| + |V_{CD}|)/2.$$

其中, ' 和 '' 表示未完全磁化, 即  $|M'| < |M|'' < |M|$ , 因此  $|V'| < |V|'' < |V|$ .

当器件处于未完全磁化状态时, 相应的霍尔电压绝对值也低于饱和值. 根据基尔霍夫定律对电路模型进行分析, 这种由部分磁化导致的横向电压非平衡性会直接引起纵向电压  $V_{AC}$  的升高. 该结果表明, 异质结的磁阻行为主要源于两层磁性材料 AHE 响应的差异及其在非饱和磁化状态下的耦合作用, 为理解此类范德瓦耳斯异质结中的磁电调控机制提供了清晰的物理图像.

## 4 结论

本研究通过系统分析 FGaT/FGT 异质结的磁输运特性, 揭示了其反对称磁阻行为起源于反常霍尔效应电压失配所诱导的局域非平衡环流, 该机

制在等效电路模型中被明确验证; 同时, FGaT 层因界面氧化形成的交换偏置及其内禀“界面-体区”双重磁化翻转模型, 直接解释了磁滞回线的不对称性与多步跳变特征, 表明界面效应在调控层间磁耦合中具有关键作用; 进一步地, 变温测量揭示了热涨落通过削弱磁各向异性和层间耦合强度, 主导了反对称信号从低温非平衡态向高温顺磁退耦态的演化. 这些结果不仅将宏观输运现象与微观磁结构动态关联, 深化了对二维磁性异质结中非平衡输运机制的理解, 也为未来利用界面与畴工程设计多态自旋电子器件提供了明确的理论与实验依据. 后续工作可聚焦于界面磁畴的原位表征与可控氧化工艺, 以期实现对其磁电性能的主动调控.

## 参考文献

- [1] 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, Hui J X, Zhang Y B 2018 *Nature* **563** 94
- [2] Zhang G, Guo F, Wu H, Wen X, Yang L, Jin W, Zhang W, Chang H 2022 *Nat. Commun.* **13** 5067
- [3] Li Z Y, Song S M, Wang W X, Dai M J, Lin S S, Chen T Y, Sun H 2023 *Mater. Adv.* **4** 6535
- [4] Li Z Y, Du W S, Liao L Z, Sun Z Q, Zhang Z R, Wen T Y, Zhang Z K, Tao W, Chen T Y 2025 *Aggregate* **6** e70098
- [5] Hu G J, Zhu Y M, Xiang J X, Yang Z, Huang M, Wang Z, Wang Z, Liu P, Zhang Y, Feng C, Hou D Z, Zhu W G, Gu M, Hsu C, Chuang F, Lu Y L, Xiang B, Chueh Y L 2020 *ACS Nano* **14** 12037
- [6] Bao C H, Li Z Y, Yin X L, Shao J F, Li L X, Ma X M, Guo S, Chen T Y 2026 *Nanomaterials* **16** 123
- [7] Albarakati S, Tan C, Chen Z J, Partridge J G, Zheng G, Farrar L, Mayes E L H, Field M R, Lee C, Wang Y, Xiong Y, Tian M, Xiang F, Hamilton A R, Tretiakov O A, Culcer D, Zhao Y J, Wang L 2019 *Sci. Adv.* **5** eaaw0409
- [8] Jiang L X, Li Q C, Li J F, Guo H R, Wu C W, Luo Z J, Xiong R, Zeng M, Luo Z C, Zhao J K, Chen Z X, Zhang Z

- W, Wu H 2025 *Nano Lett.* **25** 9712
- [9] Wu Q M, Cui Z Z, Zhu M, Jiang Z Y, Fu Z P, Lu Y L 2023 *2D Mater.* **10** 025009
- [10] Tan C, Lee J, Jung S, Park T, Albarakati S, Partridge J, Field M, McCulloch D, Wang L, Lee C 2018 *Nat. Commun.* **9** 1554
- [11] Zhou L, Huang J W, Tang M, Qiu C Y, Qin F, Zhang C R, Li Z Y, Wu D, Yuan H T 2023 *Infomat* **5** e12371
- [12] Wu Q M, Zhang Y Y, Cui Z Z, Liu P, Xiang B, Li Z C, Fu Z P, Lu Y L 2023 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2214007
- [13] Li X, Wang F, Wu C, Zhang J, Li G, Wu J, Bie Y 2025 *Front. Phys.* **20** 055203
- [14] Gerber A, Milner A, Goldshmit L, Karpovski M, Lemke B, Habermeier H U, Sulpice A 2002 *Phys. Rev. B* **65** 054426
- [15] Li Z Y, Zhang G P, Chen T Y 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 050701 (in Chinese) [李治玥, 章国平, 陈廷勇 物理学报 2026 **75** 050701]
- [16] Cheng X, Urazhdin S, Tchernyshyov O, Chien C, Nikitenko V, Shapiro A, Shull R 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 017203
- [17] Zhao R J, Xu W F, Wu Y F, Liu X J, Zhang Z Y, Zhu M Y, Zhang L Y, Shen J X, Shen S P, Huang H, Zhang J Y, Zheng X Q, Wang S G 2023 *ACS Appl. Nano Mater.* **6** 20982
- [18] Du J T, He K, Chen J Y, He Y K, He M, Xu X T, Qu Z, Gu L, Zhang Q H, Duan X D, Huang M Y, Jiang C B, Li B, Yang S X 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2501047
- [19] Balan A, Kumar A, Scholz T, Lin Z, Shahee A, Fu S, Denneulin T, Vas J, Kovács A, Dumin-Borkowski R, Wang H, Yang J, Lotsch B, Nowak U, Kläui M 2024 *ACS Nano* **18** 8383
- [20] Franco V, Batlle X, Labarta A 2000 *Eur. Phys. J. B* **17** 43
- [21] Li Z Y, Luo H X, Chen T Y 2026 *Crystals* **16** 65
- [22] Li Z Y, Yang H Z, Chen S C, Lu Y B, Xin Y Q, Yang T L, Sun H 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 175101
- [23] Kim D, Park S, Lee J, Yoon J, Joo S, Kim T, Min K, Park S, Kim C, Moon K, Lee C, Hong J, Hwang C 2019 *Nanotechnology* **30** 245701
- [24] Segal A, Shaya O, Karpovski M, Gerber A 2009 *Phys. Rev. B* **79** 144434
- [25] Mohiuddin T M G, Hill E, Elias D, Zhukov A, Novoselov K, Geim A 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 2624
- [26] Zhao K K, Xing Y H, Han J, Feng J F, Shi W H, Zhang B S, Zeng Z M 2017 *J. Magn. Magn. Mater.* **432** 10

## Antisymmetric magnetoresistance mechanism of $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ heterojunction\*

SUN Ziqing<sup>1)2)3)#</sup> LI Zhiyue<sup>3)4)#</sup> ZHANG Chonglei<sup>1)</sup>  
WANG Le<sup>3)</sup> CHEN Tingyong<sup>2)3)†</sup>

1) (*Nanophotonics Research Center, Institute of Microscale Optoelectronics & State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

2) (*Shenzhen Institute for Quantum Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*)

3) (*International Quantum Academy, Shenzhen 518048, China*)

4) (*College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

( Received 4 November 2025; revised manuscript received 23 January 2026 )

### Abstract

Van der Waals (vdW) magnetic materials have emerged as a promising platform for investigating low-dimensional magnetism and developing next-generation spintronic devices. Among them, all-ferromagnetic heterojunctions, such as the  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  (FGaT/FGT) system, exhibit intriguing magneto transport phenomena, including multi-step transitions and antisymmetric magnetoresistance (MR) peaks under perpendicular magnetic fields. However, the underlying physical mechanisms governing these complex behaviors remain elusive. This study aims to elucidate the origin of the antisymmetric MR in FGaT/FGT vdW heterojunctions, focusing on the interplay between the anomalous Hall effect (AHE), interfacial oxidation, and temperature-dependent interlayer coupling.

High-quality FGaT/FGT heterojunction devices were fabricated using mechanical exfoliation and dry

\* Project supported by the Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2020B0303050001, 2021B0101300001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11974158).

# These authors contributed equally.

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

transfer techniques. The magneto transport properties were systematically characterized from 5 K to 190 K using a physical property measurement system (PPMS). The experimental results, combined with an equivalent circuit model analysis, reveal that the antisymmetric MR signal primarily stems from a local non-equilibrium current driven by a mismatch in the AHE voltages generated across the top (FGT) and bottom (FGaT) ferromagnetic layers when their magnetizations are non-collinear. This voltage imbalance significantly modulates the longitudinal resistance ( $R_{xx}$ ), producing the characteristic sharp MR peaks near zero field.

Furthermore, detailed analysis of the individual FGaT layer uncovers a two-stage magnetization reversal process, attributed to the coexistence of a magnetically distinct interface region, influenced by a naturally formed antiferromagnetic O-FGaT oxide layer, and the FGaT bulk region. This interfacial oxidation induces an exchange bias effect, which is responsible for the observed asymmetry and multi-step transitions in the heterojunction's MR hysteresis loops. Temperature-dependent measurements demonstrate that the antisymmetric MR diminishes upon heating, evolving into a smooth, paramagnetic-like background above 180 K. This transition highlights the suppression of the AHE-driven non-equilibrium transport and the interlayer decoupling as thermal fluctuations reduce magnetic anisotropy.

In conclusion, our work demonstrates that the antisymmetric MR in FGaT/FGT heterojunctions arises from the synergistic effects of AHE-induced circulating currents, interface oxidation-mediated exchange bias, and thermally activated layer decoupling. These findings provide a comprehensive understanding of the charge transport mechanisms at magnetic vdW interfaces and offer valuable insights for the design of future multi-state spintronic devices based on interface and domain engineering.

**Keywords:** van der Waals heterojunction, antisymmetric magnetoresistance, anomalous Hall effect

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251500](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251500)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251500](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251500)

$\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  异质结的反对称磁阻机制

孙自卿 李治玥 张崇磊 王乐 陈廷勇

**Antisymmetric magnetoresistance mechanism of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  heterojunction**

SUN Ziqing LI Zhiyue ZHANG Chonglei WANG Le CHEN Tingyong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 070802 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251500

CSTR: 32037.14.aps.75.20251500

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251500>

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

$\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结中拓扑界面耦合调控铁磁性研究

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

物理学报. 2026, 75(6): 070802 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251620>

$\text{GaN}/\text{VSe}_2$  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  $\text{GaN}/\text{VSe}_2$  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>

石墨烯/ $\text{C}_3\text{N}$  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/ $\text{C}_3\text{N}$  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>

$\text{Sb}/\text{SnC}$  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  $\text{Sb}/\text{SnC}$  van der Waals heterojunction and its application

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