

嵌入六方氮化硼的锯齿型石墨烯纳米带的定量矢量磁场成像研究

刘晨曦^{1,2}, 冯宇^{1,2}, 孔自强^{1,2}, 刘家文^{1,2}, 章子曾^{1,2}, 宋俊驰^{1,2},
郭茂森³, 童傲梅³, 姜程鑫^{1,*}, 王浩敏^{1,2,*}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 国仪量子技术(合肥)股份有限公司, 合肥 230088)

摘要: 锯齿型石墨烯纳米带(zigzag graphene nanoribbon, ZZ-GNR)边缘态的磁性是碳基自旋电子学研究中的核心问题。近期, 本研究团队通过将 ZZ-GNR 嵌入六方氮化硼(hexagonal boron nitride, hBN)晶格, 首次在实验中证实了其本征磁性的存在。然而, 前期的扫描氮-空位显微镜(scanning nitrogen-vacancy microscopy, SNVM)测量仅提供了磁场在氮-空位色心轴向上的投影分量, 难以通过成像直接揭示磁各向异性的微观特征。作为前期工作的延伸, 本文提出一种基于傅里叶变换的磁场矢量重构方法, 利用无电流源区域的麦克斯韦方程组约束, 成功从原始全磁场(Full-B)模式数据中反演出了 ZZ-GNR 的三维矢量杂散磁场(B_x , B_y , B_z)。定量分析表明, ZZ-GNR 边缘产生的杂散磁场主要集中在面外方向(B_z), 其峰值强度约为 0.37 mT, 而面内分量较弱。结合扶手椅型纳米带及空沟槽的对照实验, 本研究在纳米尺度上直接证实了嵌入式 ZZ-GNR 具有显著的垂直磁各向异性, 为理解其亚铁磁性基态提供了关键的定量实验依据。

关键词: 锯齿型石墨烯纳米带; 扫描氮-空位显微镜; 矢量磁场重构; 磁各向异性; 自旋电子学

中图分类号: TB383; O469

文献标志码: A

DOI: 10.3724/jfmd.2511094

CSTR: 32180.14.jfmd.2511094

Quantitative vector magnetic field imaging of zigzag graphene nanoribbons embedded in hexagonal boron nitride

LIU Chenxi^{1,2}, FENG Yu^{1,2}, KONG Ziqiang^{1,2}, LIU Jiawen^{1,2}, ZHANG Ziceng^{1,2}, SONG Junchi^{1,2},
GUO Maosen³, TONG Aomei³, JIANG Chengxin^{1,*}, WANG Haomin^{1,2,*}

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. CIQTEK Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: The magnetism of zigzag graphene nanoribbon (ZZ-GNR) represents a pivotal topic in carbon-

收稿日期: 2025-11-28; 修订日期: 2025-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 91964102, No. 62474179, No. 62374169); 国家重点研发计划(No. 2024YFA1207900);
上海市协同创新项目(No. XTCX-KJ-2024-02); 集成电路材料全国重点实验室自主部署项目(No. NKLJC-Z2023-B01); 上海市基础研究计划集成电路项目(No. 25JD1404300)

作者简介: 刘晨曦(2001—), 男, 博士研究生, 研究方向为二维异质材料与器件(E-mail: cxliu@mail.sim.ac.cn)

通信作者: 姜程鑫(1995—), 男, 助理研究员, 研究方向为新型半导体异质材料及器件(E-mail: jiangchx@mail.sim.ac.cn)

王浩敏(1978—), 男, 研究员, 研究方向为新型半导体异质材料及器件(E-mail: hmwang@mail.sim.ac.cn)

based spintronics. Recently, our research team experimentally verified the presence of intrinsic magnetism in ZZ-GNR by embedding them within a hexagonal boron nitride (hBN) lattice. However, prior scanning nitrogen-vacancy microscopy (SNVM) measurements only captured the magnetic field's projected component along the nitrogen-vacancy center axis, complicating the direct visualization of magnetic anisotropy characteristics through imaging. Building upon our previous findings, this paper introduces a magnetic field vector reconstruction method based on Fourier transform. By applying the constraints of Maxwell's equations in current-free regions, we successfully reconstructed the three-dimensional vector stray magnetic fields (B_x , B_y , B_z) of ZZ-GNR from the original Full-B mode data. Quantitative analysis reveals that the stray magnetic field generated by the ZZ-GNR edges is predominantly oriented in the out-of-plane direction (B_z), with a peak intensity of approximately 0.37 mT, while the in-plane components are minimal. Supported by control experiments on armchair graphene nanoribbons (AC-GNR) and empty trenches, this study provides direct confirmation of the pronounced perpendicular magnetic anisotropy of embedded ZZ-GNR at the nanoscale, offering crucial quantitative experimental evidence for understanding their ferrimagnetic ground state.

Key words: zigzag graphene nanoribbon; scanning nitrogen-vacancy microscopy; vector magnetic field reconstruction; magnetic anisotropy; spintronics

0 引言

石墨烯作为一种具有狄拉克锥能带结构的二维材料,因其极长的自旋扩散长度和弱自旋轨道耦合,在自旋电子学领域展现出巨大的应用潜力^[1-3]。理论研究表明,当二维石墨烯被裁剪成具有特定手性的准一维纳米带时,其电子性质将发生显著变化^[4]。特别是,具有锯齿型边缘的石墨烯纳米带(zigzag graphene nanoribbon, ZZ-GNR)由于子晶格对称性破缺,被预测在边缘处会形成自旋极化的局域态,即边缘磁性^[5-7]。这种独特的磁性被认为是实现全碳自旋逻辑器件、自旋过滤器以及量子计算中的量子比特的基础^[8-10]。

然而,尽管理论研究已开展了 20 多年,但在实验中对 ZZ-GNR 本征磁性进行直接探测仍面临巨大挑战,其主要原因在于,ZZ-GNR 边缘结构在环境条件下极不稳定,传统的氢钝化边缘易发生重构或氧化,导致磁性猝灭^[11-13]。此外,“自下而上”的化学合成方法虽然能够制备原子级尺度的短带,但受限于长度及其与衬底之间的相互作用,往往难以对该方法制备的纳米带进行单带器件的电学测量^[14-16]。近年来,关于石墨烯纳米带(graphene nanoribbon, GNR)拓扑能带工程、拓扑量子相以及自旋链的研究进一步提升了对高质量样品制备及微观磁性表征的需求,研究人员迫切需要更直接的手

段来探测边缘自旋的极化方向及其分裂行为^[17-21]。

针对上述难题,本研究团队^[22]开发了一种独特的模板法制备工艺,成功制备了嵌入六方氮化硼(hexagonal boron nitride, hBN)晶格的长直 ZZ-GNR。前期研究^[23]还涉及 hBN 中手性控制生长的相关探索,为获得高质量嵌入式结构奠定了基础。由于 hBN 对边缘的有效钝化以及非对称的碳-硼(C—B)和碳-氮(C—N)界面键合,该体系在室温下表现出鲁棒的磁性特征。通过低温磁输运测量,可观测到显著的磁滞回线,这暗示了该体系具有垂直磁各向异性^[22]。然而,宏观输运测量虽能反映样品的整体磁响应,但缺乏空间分辨能力,无法直接将磁信号对应到纳米带的物理边缘上。

为了获取局域磁性的直接证据,本研究团队在之前的研究中^[22]采用了扫描氮-空位(nitrogen-vacancy, NV)中心显微镜(scanning nitrogen-vacancy microscopy, SNVM)技术^[24-27],利用金刚石中 NV 色心对磁场极度敏感的量子特性,实现了纳米级分辨率的磁成像。尽管前期工作^[28-31]展示了 ZZ-GNR 边缘存在杂散磁场,但常规 SNVM 测量获得的数据是磁场矢量在 NV 色心轴向上的投影量(B_{NV})。由于 NV 轴通常与样品表面呈约 54.7° 的夹角,单一的 B_{NV} 标量图像无法完整描述磁场的矢量分布,限制了对磁矩取向和各向异性的精确定量分析。

作为前期研究^[22]的延伸, 本文通过一种定量的矢量重构算法, 对嵌入式 ZZ-GNR 的 SNVM 数据进行深入挖掘与分析。利用傅里叶空间中的磁场传播算符, 结合麦克斯韦方程组的无源约束, 从原始全磁场(Full-B)模式数据中成功分离出磁场的 3 个正交分量(B_x 、 B_y 、 B_z)。研究结果直观地展示了 ZZ-GNR 边缘磁矩的垂直取向, 同时给出了定量的磁场强度, 进一步验证了此前输运实验中观测到的垂直磁各向异性。此外, 通过对比扶手椅型 (armchair, AC) 纳米带和空沟槽的测量结果, 可以确认磁信号来源于 ZZ-GNR 边缘与 C-BN 耦合诱导的本征电子自旋极化。

1 实验

1.1 样品制备与 SNVM 表征

实验所用的嵌入式 ZZ-GNR 样品制备流程详见文献^[22]。简而言之, 首先利用金属纳米颗粒催化刻蚀 hBN 表面, 形成具有特定晶向的纳米沟槽。根据催化金属颗粒种类的不同, 可获得不同构型的沟槽。例如, 使用 Zn 和 Pt, 可分别获得锯齿型和扶手椅型取向的沟槽。随后通过化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 在沟槽内生长石墨烯纳米带, 形成平面内的 hBN-GNR-hBN 异质结构。

磁成像实验在基于原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM) 的 SNVM 系统中进行 (图 1)。所用的金刚石探针尖端含有单个 NV 色心, 距离探针尖端约 6 nm, NV 色心距离样品表面的高度约为 10 nm。实验在大气环境下进行。SNVM 通常包含两种工作模式: 用于快速定性描绘磁场轮廓的等磁场 (Iso-B) 模式, 以及用于精确获取定量磁场数值的全磁场模式。为排除样品形貌和光致发光淬灭的影响, 并获取准确的磁场强度数据用于矢量重构, 本研究主要采用 Full-B 模式进行测量^[31]。在每个像素点系统地扫描微波频率以获取完整的光探测磁共振谱, 并通过拟合塞曼 (Zeeman) 分裂峰的频率差, 精确提取沿 NV 轴的磁场投影分量 B_{NV} 。

1.2 矢量磁场重构原理

在 SNVM 扫描过程中, 探针位于样品上方的特定高度。由于该区域不存在传导电流, 静态磁场需满足麦克斯韦方程组的无源约束条件:

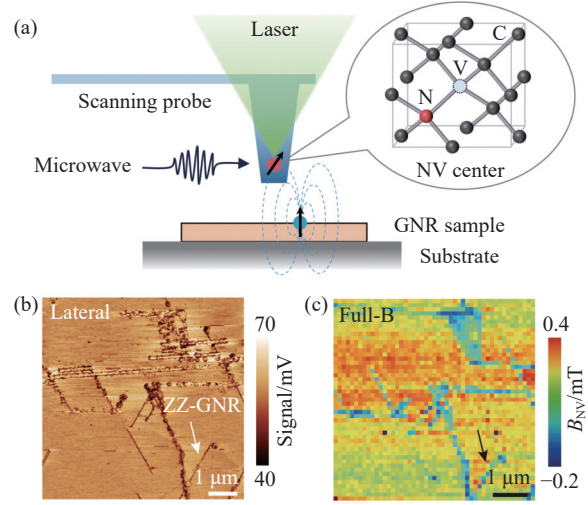


图 1 利用 SNVM 在环境条件下探测嵌入 hBN 的 ZZ-GNR 磁性。(a) SNVM 的实验装置示意图; (b) 同一区域对应的 AFM 侧向力图像; (c) ZZ-GNR 的 Full-B 模式扫描成像结果

Fig. 1 Probing the magnetism of hBN-embedded ZZ-GNR using SNVM under ambient conditions. (a) Schematic representation of the SNVM experimental setup; (b) corresponding lateral force AFM image of the same ZZ-GNR; (c) Full-B mode magnetic imaging of a ZZ-GNR

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

式中, ∇ 为矢量微分算子, $\mathbf{B}$ 为空间中的磁场矢量。

基于上述条件, 可以建立测量量 B_{NV} 与 3 个直角坐标分量 (B_x , B_y , B_z) 在傅里叶空间 (k -space) 中的数学关系, 从而实现从二维标量图到三维矢量场的反演^[32-33]。该方法在二维磁性材料的杂散场分析中已被证明具有较高的有效性^[34-35]。具体计算流程如图 2(a) 所示, 步骤如下。

1.2.1 坐标定义

定义样品平面为 xy 平面, 垂直方向为 z 轴。设 NV 轴在样品坐标系中的方向单位矢量为

$$\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z) = (\sin \theta_{NV} \cos \Phi_{NV}, \sin \theta_{NV} \sin \Phi_{NV}, \cos \theta_{NV}) \quad (3)$$

式中, θ_{NV} 和 Φ_{NV} 分别为极角和方位角 (图 2(b))。

测量得到的磁场为

$$B_{NV}(x, y) = \mathbf{B}(x, y) \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

1.2.2 傅里叶变换

对实空间测量的 $B_{NV}(x, y)$ 图像进行二维傅里叶变换, 得到谱空间数据 $b_{NV}(k_x, k_y)$:

$$b_{NV}(k_x, k_y) = \iint B_{NV}(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (5)$$

式中, k_x 和 k_y 分别表示二维傅里叶空间中沿 x 轴

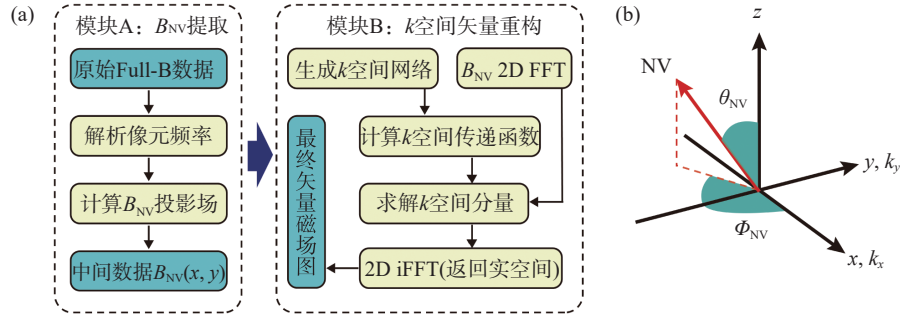


图2 磁场矢量定量重构的原理与计算流程。(a)基于傅里叶变换和麦克斯韦方程组约束,从单分量 B_{NV} 数据中反演提取三维矢量磁场 (B_x, B_y, B_z) 的逻辑流程图; (b) NV 色心磁场投影示意图

Fig. 2 Principle and workflow of quantitative vector magnetic field reconstruction. (a) Computational workflow for reconstructing the full 3D vector magnetic field components (B_x, B_y, B_z) from the scalar B_{NV} map, employing Fourier space analysis and Maxwell's equations; (b) schematic diagram of the magnetic field projection onto the NV center

和 y 轴方向的空间频率分量。

1.2.3 传递函数求解

在无源区域, 磁场不仅具有无旋特性, 还表现出无散特性, 这种双重性质导致不同方向的磁场分量在 k 空间中存在耦合关系。通过采用格林函数法或直接求解偏微分方程, 可推导出各分量与 b_{NV} 之间的传递函数 $T_{x,y,z}$ 。 x, y, z 方向的分量^[30] 可表示为

$$\begin{cases} b_x(k) = \frac{b_{NV}(k)}{in_z \frac{k}{k_x} + in_y \frac{k_y}{k_x} + n_x} \\ b_y(k) = \frac{b_{NV}(k)}{in_z \frac{k}{k_y} + in_x \frac{k_x}{k_y} + n_y} \\ b_z(k) = \frac{b_{NV}(k)}{-in_x \frac{k_x}{k} - in_y \frac{k_y}{k} + n_z} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ 。

1.2.4 逆变换与重构

将计算得到的 b_x, b_y, b_z 进行二维逆快速傅里叶变换 (two-dimensional inverse fast Fourier transform, 2D iFFT), 即可获得实空间的矢量磁场分布 $B_x(x, y), B_y(x, y), B_z(x, y)$ 。

在实际计算中, 为了抑制高频噪声的放大 (尤其是当分母接近 0 时), 引入 Hanning 窗函数作为低通滤波器, 并对 k 空间的奇点进行正则化处理。

2 结果与讨论

2.1 ZZ-GNR 的磁性探测

图 1 展示了利用 SNVM 探测嵌入 hBN 的 ZZ-

GNR 磁性的基本结果。图 1(b) 清晰显示了 ZZ-GNR 的物理轮廓, 其宽度约为 9 nm, 表面平整且无明显颗粒。对应的 Full-B 模式磁成像结果如图 1(c) 所示, 在纳米带位置存在明显的杂散磁场信号, 最大强度不超过 0.4 mT。磁信号的分布轮廓与 AFM 形貌高度吻合, 初步证实了磁性来源于 ZZ-GNR 本身。值得注意的是, 这是我们前期工作^[22] 中确认 ZZ-GNR 磁性的关键定性证据, 但图 1(c) 中的颜色标尺仅代表沿 NV 轴方向的磁场分量, 尚不能直接反映磁矩的真实取向。

2.2 矢量磁场分布与垂直各向异性

图 2 展示了磁场矢量定量重构的原理与计算流程。为深入理解磁场的空间分布特性, 将图 1(c) 中的 B_{NV} 数据重构为三维矢量场, 结果如图 3 所示。

图 3(a)~(b) 分别展示了重构得到的面内分量 B_x (沿纳米带长度方向) 和 B_y (垂直于纳米带长度方向)。可以看出, 这两个分量虽然强度较弱, 但仍能观察到与纳米带位置相关的分布特征。面内残余分量的出现主要归因于样品制备工艺中的衬底效应: 在 1300 °C 高温下进行 CVD 生长时, 石英衬底表面会发生软化并出现微小的形貌起伏, 这些起伏会传递给 hBN, 导致嵌入其中的 ZZ-GNR 并非处于严格的水平面上而存在局部的随机倾斜。这种倾斜使得垂直于纳米带平面的磁矩在 x 和 y 方向上产生了投影分量。此外, 磁场作为矢量场, 其磁感线在大尺度上是闭合的, 磁力线在边缘处的自然弯曲也会贡献一部分面内分量。相比之下, 面外分量 B_z (图 3(c)) 展现出清晰、连续且强的磁信号, 其

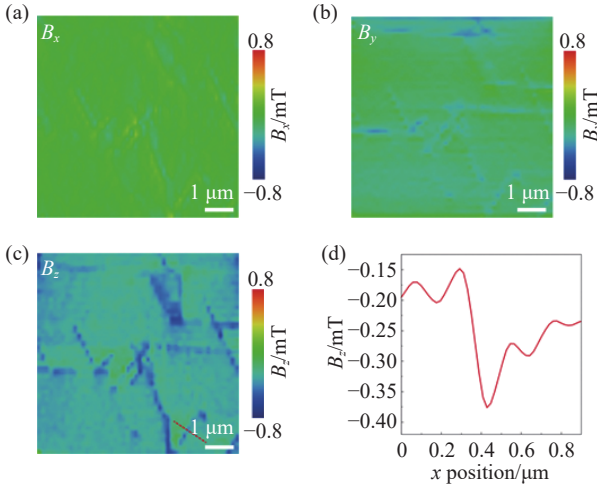


图3 ZZ-GNR的三维矢量磁场分布图及垂直磁各向异性证据。基于图1(c)数据重构得到的ZZ-GNR杂散磁场分量(a) B_x 、(b) B_y 、(c) B_z 的分布图; (d)从图(c)中红色虚线处提取的 B_z 截面轮廓线

Fig. 3 Quantitative vector magnetic imaging and evidence of perpendicular magnetic anisotropy in ZZ-GNR. Reconstructed spatial distribution of the stray magnetic field components derived from Fig. 1(c): (a) B_x , (b) B_y , (c) B_z ; (d) cross-sectional line profile extracted from the B_z map (indicated by the red dashed line in (c))

空间分布完美勾勒出了ZZ-GNR的形状。

为了定量分析磁场强度,沿图3(c)中红色虚线提取截面轮廓线,结果如图3(d)所示。数据显示,在ZZ-GNR正上方,垂直磁场强度 B_z 出现一个明显的负向峰值(即净磁矩方向向下)。这一符号特征与嵌入式体系的微观磁性机制相符。由于C—B界面与C—N界面的不对称性,靠近硼一侧的局域自旋磁矩显著强于靠近氮一侧,从而诱导了显著的亚铁磁性^[36]。若定义占主导地位的硼边自旋磁矩向下,则体系整体表现为方向向下的非零净磁矩,导致测量得到的 B_z 数值为负。值得注意的是,本次测量的实际探测距离(NV色心至样品表面的距离)约为10 nm。即便在该探测距离下,依然测得了高达0.37 mT的杂散磁场强度。

为验证该磁场强度的合理性及其物理来源,采用无限长磁偶极子线模型进行简要估算。已有第一性原理计算^[37-39]表明,当石墨烯纳米带嵌入hBN晶格时,C-BN界面会破坏子晶格对称性,边界处的强库仑相互作用及电荷转移效应可诱导鲁棒的边缘自旋极化,甚至产生半金属性。这些理论研究预测,在理想的嵌入结构中,边缘碳原子的局部

净磁矩最高可达约 $1 \mu_B/\text{atom}$ ($\mu_B \approx 9.274 \times 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$, 为玻尔磁子)。假设ZZ-GNR边缘为一条线磁矩密度为 λ 的长直导线,根据经典电磁学公式,其在垂直距离 d 处产生的磁场 B_z 可表示为

$$B_z \approx \frac{\mu_0 \lambda}{2\pi d^2} \quad (7)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ 为真空磁导率。若取边缘碳原子的最大净磁矩为 $1 \mu_B/\text{atom}$, 对应的线密度 $\lambda \approx 3.77 \times 10^{-14} \text{ J} \cdot (\text{T} \cdot \text{m})^{-1}$, 则在探测距离 $d \approx 10 \text{ nm}$ 处产生的磁场约为0.08 mT。可以看出,实验测量值(约0.37 mT)与理论估算值为同一量级,这有力地证实了观测信号源于ZZ-GNR边缘的本征电子自旋极化。

同时观察到实验值约为理论基准值的5倍,这种磁信号的增强效应反映了嵌入式hBN-GNR体系独特的物理特性。例如:Ge等^[36]在研究hBN嵌入的三角形石墨烯纳米片时发现,C—N界面与C—B界面的不对称性会导致基于超交换作用的局域电子强关联,这可能引起磁矩的集体增强及稳态铁磁有序的形成;Filho等^[40]的理论计算也表明,体系的自旋态及轨道占据对外部场和具体界面构型高度敏感,可能导致更高自旋多重态的出现。因此,观测到的强磁信号不仅证实了由非对称hBN界面诱导的亚铁磁性基态的存在,也暗示了边缘磁矩在长程范围内具有高度的有序性和相干性。鉴于其复杂性,这一问题值得在未来的工作中结合更精细的原子级表征和多体理论计算进行深入探讨。

2.3 对照实验与磁性起源验证

为证实观测到的矢量磁信号特异性来源于ZZ-GNR与hBN的边界耦合(boundary coupling),并排除其他潜在干扰因素(如非磁性的结构边缘效应或背景杂质),结合前期积累的定向刻蚀与生长工艺^[23],设计并开展了两组严格的对照实验。

首先,对具有扶手椅型边缘的石墨烯纳米带(armchair graphene nanoribbon, AC-GNR)进行相同的SNVM扫描。理论上,由于子晶格对称性未破坏,AC-GNR不具备边缘态(其与ZZ-GNR的原子结构对比示意如图4(a)所示),因此应是非磁性^[4]。在同区域的Iso-B模式磁扫描图像(图4(b))中,未观测到任何可分辨的磁对比度;而对应的AFM高度图像(图4(c))和侧向力图像(图4(d))则清晰证实了AC-GNR的物理形貌确实存在。

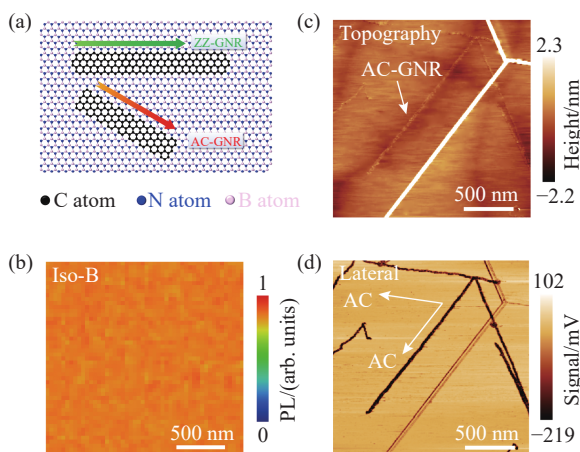


图4 AC-GNR中磁性的缺失。(a)嵌入hBN晶格中的ZZ-GNR和AC-GNR的原子结构示意图;(b)AC-GNR的Iso-B模式扫描结果;对应AC-GNR区域的AFM(c)高度图像和(d)侧向力图像

Fig. 4 Absence of magnetism in AC-GNR. (a) Schematic diagram of the atomic structures for ZZ-GNR and AC-GNR nanoribbons embedded within an hBN lattice; (b) Iso-B mode SNVM scan of an AC-GNR; (c) topography and (d) lateral force AFM images of the AC-GNR region

其次,为了进一步排除单纯物理结构台阶(step edge)可能带来的干扰,在未生长石墨烯的hBN空沟槽(trench)区域进行扫描(如图5所示)。图5(c)~(d)的AFM图像显示了一种不同取向的沟槽,即锯齿型沟槽(ZZ-trench)和扶手椅型沟槽(AC-trench),但在Iso-B磁图(图5(b))中同样未检测到磁信号。这表明hBN沟槽边界并未导致磁信号的产生。

综合上述对照实验结果,可以确证图3中展示的垂直磁场信号并非源于结构形貌或其他非本征干扰,而是源于嵌入式ZZ-GNR边缘由C-BN耦合诱导的本征电子自旋极化。

3 结论

作为本研究团队近期工作^[22]的延伸,本文利用扫描氮-空位显微镜结合傅里叶空间矢量重构技术,对嵌入hBN晶格的ZZ-GNR的磁性进行了定量表征。通过建立从单轴SNVM数据重构全矢量磁场的有效流程,成功从原始投影数据中提取了三维磁场矢量分布。

对数据的定量分析表明,ZZ-GNR产生的杂散磁场主要集中在面外方向(B_z),峰值强度约为0.37 mT,而面内分量较小。这一结果在纳米尺度上直

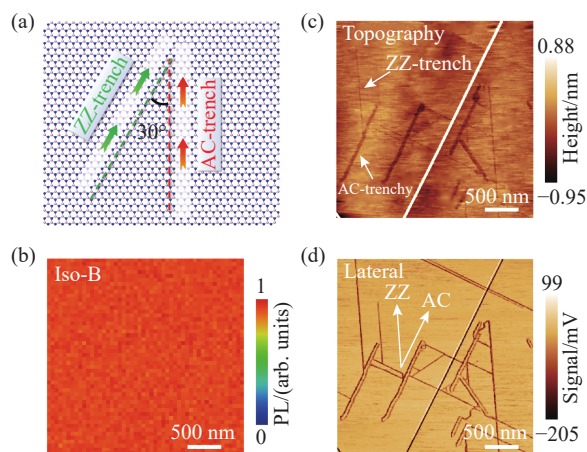


图5 hBN纳米沟槽的磁信号表征。(a)hBN衬底上刻蚀形成的ZZ-trench和AC-trench纳米沟槽的结构示意图;(b)空沟槽区域的Iso-B模式图像;对应沟槽区域的AFM(c)高度图像和(d)侧向力图像

Fig. 5 Characterization of magnetic signals in hBN nano-trenches. (a) Schematic representation of ZZ-trench and AC-trench nanotrenches etched into hBN substrate; (b) Iso-B mode image of the empty trench region; corresponding AFM (c) topography and (d) lateral force images

接证实了该体系具有显著的垂直磁各向异性,支持了由非对称hBN界面(C—B/C—N)诱导的亚铁磁性基态理论。本研究不仅完善了对嵌入式ZZ-GNR磁性起源的理解,也展示了矢量SNVM技术在解析二维量子材料复杂磁结构方面的强大能力,为未来基于石墨烯的自旋电子器件设计提供了关键的物理参数支持。

参考文献:

- [1] Han Wei, Kawakami R K, Gmitra M, et al. Graphene spintronics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(10): 794-807.
- [2] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [3] Tombros N, Jozsa C, Popinciuc M, et al. Electronic spin transport and spin precession in single graphene layers at room temperature[J]. *Nature*, 2007, 448(7153): 571-574.
- [4] Nakada K, Fujita M, Dresselhaus G, et al. Edge state in graphene ribbons: nanometer size effect and edge shape dependence[J]. *Physical Review B, Condensed Matter*, 1996, 54(24): 17954-17961.
- [5] Son Y W, Cohen M L, Louie S G. Half-metallic graphene nanoribbons[J]. *Nature*, 2006, 444(7117): 347-349.

- [6] Son Y W, Cohen M L, Louie S G. Energy gaps in graphene nanoribbons[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(21): 216803.
- [7] Yazyev O V. Emergence of magnetism in graphene materials and nanostructures[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2010, 73(5): 056501.
- [8] Wang Z F, Jin S, Liu F. Spatially separated spin carriers in spin-semiconducting graphene nanoribbons[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(9): 096803.
- [9] Trauzettel B, Bulaev D V, Loss D, et al. Spin qubits in graphene quantum dots[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(3): 192-196.
- [10] Wang Haomin, Wang Huishan, Ma Chuanxu, et al. Graphene nanoribbons for quantum electronics[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3(12): 791-802.
- [11] Wang Xinran, Ouyang Yijian, Li Xiaolin, et al. Room-temperature all-semiconducting sub-10-nm graphene nanoribbon field-effect transistors[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 206803.
- [12] Koskinen P, Malola S, Häkkinen H. Self-passivating edge reconstructions of graphene[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(11): 115502.
- [13] Kunstmann J, Özdoğan C, Quandt A, et al. Stability of edge states and edge magnetism in graphene nanoribbons[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(4): 045414.
- [14] Cai Jinming, Ruffieux P, Jaafar R, et al. Atomically precise bottom-up fabrication of graphene nanoribbons[J]. *Nature*, 2010, 466(7305): 470-473.
- [15] Ruffieux P, Wang Shiyong, Yang Bo, et al. On-surface synthesis of graphene nanoribbons with zigzag edge topology[J]. *Nature*, 2016, 531(7595): 489-492.
- [16] Magda G Z, Jin Xiaozhan, Hagymási I, et al. Room-temperature magnetic order on zigzag edges of narrow graphene nanoribbons[J]. *Nature*, 2014, 514(7524): 608-611.
- [17] Rizzo D J, Veber G, Cao Ting, et al. Topological band engineering of graphene nanoribbons[J]. *Nature*, 2018, 560(7717): 204-208.
- [18] Gröning O, Wang Shiyong, Yao Xuelin, et al. Engineering of robust topological quantum phases in graphene nanoribbons[J]. *Nature*, 2018, 560(7717): 209-213.
- [19] Cao Ting, Zhao Fangzhou, Louie S G. Topological phases in graphene nanoribbons: junction states, spin centers, and quantum spin chains[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(7): 076401.
- [20] Brede J, Merino-Díez N, Berdonces-Layunta A, et al. Detecting the spin-polarization of edge states in graphene nanoribbons[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6677.
- [21] Blackwell R E, Zhao Fangzhou, Brooks E, et al. Spin splitting of dopant edge state in magnetic zigzag graphene nanoribbons[J]. *Nature*, 2021, 600(7890): 647-652.
- [22] Jiang Chengxin, Wang Huishan, Liu Chenxi, et al. Signatures of magnetism in zigzag graphene nanoribbons embedded in a hexagonal boron nitride lattice[J]. *Nature Materials*, 2025, 24(10): 1592-1599.
- [23] Wang Huishan, Chen Lingxiu, Elibol K, et al. Towards chirality control of graphene nanoribbons embedded in hexagonal boron nitride[J]. *Nature Materials*, 2021, 20(2): 202-207.
- [24] Taylor J M, Cappellaro P, Childress L, et al. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(10): 810-816.
- [25] Maze J R, Stanwix P L, Hodges J S, et al. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond[J]. *Nature*, 2008, 455(7213): 644-647.
- [26] Balasubramanian G, Chan I Y, Kolesov R, et al. Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions[J]. *Nature*, 2008, 455(7213): 648-651.
- [27] Thiel L, Wang Z, Tschudin M A, et al. Probing magnetism in 2D materials at the nanoscale with single-spin microscopy[J]. *Science*, 2019, 364(6444): 973-976.
- [28] Rondin L, Tetienne J P, Hingant T, et al. Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2014, 77(5): 056503.
- [29] Casola F, van der Sar T, Yacoby A. Probing condensed matter physics with magnetometry based on nitrogen-vacancy centres in diamond[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3: 17088.
- [30] Gross I, Akhtar W, Garcia V, et al. Real-space imaging of non-collinear antiferromagnetic order with a single-spin magnetometer[J]. *Nature*, 2017, 549(7671): 252-256.
- [31] Tetienne J P, Hingant T, Kim J V, et al. Nanoscale imaging and control of domain-wall hopping with a nitrogen-vacancy center microscope[J]. *Science*, 2014, 344(6190): 1366-1369.
- [32] Lima E A, Weiss B P. Obtaining vector magnetic field maps from single-component measurements of geological samples[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B6): 2008JB006006.
- [33] Broadway D A, Tetienne J P, Stacey A, et al. Quantum probe

- hyperpolarisation of molecular nuclear spins[J]. [Nature Communications](#), 2018, 9: 1246.
- [34] Dovzhenko Y, Casola F, Schlotter S, et al. Magnetostatic twists in room-temperature skyrmions explored by nitrogen-vacancy center spin texture reconstruction[J]. [Nature Communications](#), 2018, 9: 2712.
- [35] Schlussek Y, Lenz T, Rohner D, et al. Wide-field imaging of superconductor vortices with electron spins in diamond[J]. [Physical Review Applied](#), 2018, 10(3): 034032.
- [36] Ge Yang, Chen Lingxiu, Jiang Chengxin, et al. Edge magnetism of triangular graphene nanoflakes embedded in hexagonal boron nitride[J]. [Carbon](#), 2023, 203: 59-67.
- [37] Tepliakov N V, Ma Ruize, Lischner J, et al. Dirac half-semimetallicity and antiferromagnetism in graphene nanoribbon/hexagonal boron nitride heterojunctions[J]. [Nano Letters](#), 2023, 23(14): 6698-6704.
- [38] Ding Yi, Wang Yanli, Ni Jun. Electronic properties of graphene nanoribbons embedded in boron nitride sheets[J]. [Applied Physics Letters](#), 2009, 95(12): 123105.
- [39] Pruneda J M. Origin of half-semimetallicity induced at interfaces of C-BN heterostructures[J]. [Physical Review B](#), 2010, 81(16): 161409.
- [40] Filho L F, Terroso C J, de Souza F A L, et al. Spin state engineering of triangulene graphene embedded in h-BN nanoflake[J]. [Carbon](#), 2023, 213: 118186.