



新型人工非范德华超晶格实现超高电导率和优异电磁屏蔽性能

赵麒, 杨树斌*

北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191

* 联系人, E-mail: yangshubin@buaa.edu.cn

Achieving superhigh electrical conductivity and exceptional EMI shielding performance in novel non-van der Waals artificial superlattices

Qi Zhao & Shu-Bin Yang*

School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

* Corresponding author, E-mail: yangshubin@buaa.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2025-5887

人工超晶格是一类由石墨烯、过渡金属硫化物等二维原子层材料经周期性堆叠构筑而成的新材料体系, 因其展现出超越常规材料的独特物理化学性质而受到广泛关注^[1,2]. 通常根据组成与晶体结构的不同, 现有的超晶格主要可分为摩尔超晶格和异质结超晶格两大类^[3]. 其中, 摩尔超晶格表现出超导性、铁磁性以及拓扑绝缘态等一系列非常规特性^[4,5]; 而异质结超晶格则通过两种或多种原子层的周期性交替堆叠, 呈现出独特的电学与磁学行为, 在电子学、能源存储等多个领域展现出广阔的应用潜力^[6,7]. 目前, 人工超晶格的构筑主要依赖于逐层堆叠范德华原子层, 常用方法包括机械剥离法^[8]与化学气相沉积法^[9]. 其中, 机械剥离法能有效获得表面平整和洁净的二维原子层材料, 实现理想超晶格模型的构建, 但由于其人工转移步骤多和复杂, 导致超晶格的产率与可重复性受到限制. 此外, 研究人员发展了基于分子束外延或金属有机化学气相沉积等技术的外延生长策略, 用于制备范德华超晶格材料. 这类方法能够精确调控原子层的成分、厚度及取向, 从而实现特定性能的超晶格设计. 然而, 目前该领域的研究主要集中在二维范德华超晶格材料体系, 其层间依赖较弱范德华相互作用, 易受环境热扰动和结构无序性影响, 严重制约了人工超晶格的规模化制备和产业化应用.

MXenes作为一类新型的非范德华二维过渡金属碳/氮化

物材料, 其化学通式为 $M_{n+1}X_nT_x$ ($n = 1\sim4$, M为Ti、Nb、V等早期过渡金属, X为C或N, T表示-F、-OH、=O等表面官能团)^[10]. 因其丰富的化学组成、可调控的原子结构及表面化学特性, MXenes通常表现出高导电性、优异力学强度和良好亲水性等性质, 在电子器件、能源存储与电磁屏蔽等领域展现出广阔的应用前景^[11,12]. 近期, 我们提出了一种“刚度介导卷曲”的合成新策略^[13], 通过精确调控MXene原子层的弯曲刚度, 使其在快速形变过程中发生有序卷曲, 成功构建出一系列由层间氢键耦合的非范德华超晶格材料(图1(a)). 如以非范德华固体 V_2AlC 为前驱体, 经原位氢氟酸刻蚀得到高金属空位含量的多层MXene(V_2CT_x). 基于理论计算, 金属空位的引入可显著降低MXene的弯曲刚度, 从而促进其柔性卷曲(图1(b)). 随后, 通过引入尺寸大、表面张力低的四丁基氢氧化膦(TBPH)处理该MXene, 实现了0.3 s的快速剥离与定向卷曲, 并表现出优异的单分散性和结构可控性. 通过微观结构表征, 所制备的样品呈现出均一纳米卷形貌, 并具有周期性的摩尔条纹(图1(c)), 表明了其摩尔超晶格结构. 傅里叶变换红外光谱进一步证实该材料层间存在大量氢键网络, 这与传统vdW界面结构截然不同. 基于此, 我们将这种兼具“摩尔周期”与“氢键网络”的结构体系定义为非范德华超晶格. 进一步, 通过紫外光电子能谱测试, 发现该非范德华超晶格费米

引用格式: 赵麒, 杨树斌. 新型人工非范德华超晶格实现超高电导率和优异电磁屏蔽性能. 科学通报, 2026, 71: 2087–2089

Zhao Q, Yang S-B. Achieving superhigh electrical conductivity and exceptional EMI shielding performance in novel non-van der Waals artificial superlattices (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2087–2089, doi: 10.1360/CSB-2025-5887

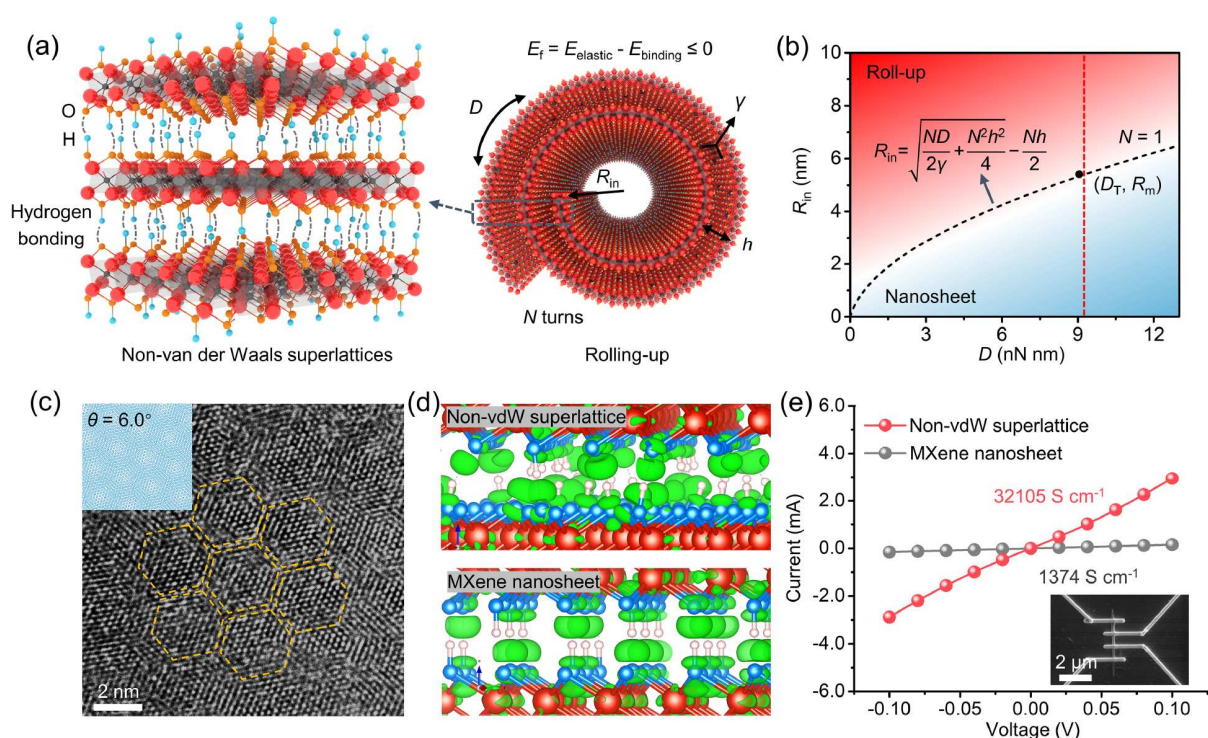


图 1 (网络版彩色)MXene非范德华超晶格的晶体结构与电学性质^[13]. (a) 非范德华超晶格结构示意图. (b) 非范德华超晶格形成机制图. (c) 非范德华超晶格原子结构图. (d) 非范德华超晶格电子结构示意图. (e) 非范德华超晶格电学测试结果

Figure 1 (Color online) Crystal structure and electrical properties of MXene non-vdW superlattice^[13]. (a) Structural schematic of the non-vdW superlattice. (b) Formation mechanism diagram of the non-vdW superlattice. (c) Atomic structure diagram of the non-vdW superlattice. (d) Electronic structure diagram of the non-vdW superlattice. (e) Electrical measurement results of the non-vdW superlattice

能级附近的电子态密度显著增强, 结合密度泛函理论计算发现, 其层间氢键促进了界面连续的电子传输通道形成(图1(d)), 有利于电子的高效传导。

为深入探究该非范德华超晶格的电输运性能, 构建了单根超晶格微型器件。通过四探针测试, 其 I - V 曲线呈现典型的欧姆特性, 导电率高达 $3.0 \times 10^4 \text{ S cm}^{-1}$, 为对应纳米片单元的22倍(图1(e))。霍尔效应测试进一步揭示其载流子浓度达到 10^{22} cm^{-3} , 超出常规MXene两个数量级, 同时其载流子迁移率也提高了3倍, 共同促成了其卓越的导电性能。基于超高

电导率和独特卷曲结构, 该MXene非范德华超晶格薄膜在X波段(8.2~12.4 GHz)展示出卓越的电磁屏蔽性能(124 dB, 40 μm), 超越了目前所有同厚度电磁屏蔽材料。其绝对屏蔽效能(SSE/t)更是高达 $200000 \text{ dB cm}^2 \text{ g}^{-1}$, 分别为MXene纳米片薄膜和金属铜箔的10倍与25倍^[14,15]。该非范德华超晶格材料和薄膜在电子、5G/6G通讯、能量存储和转化等领域具有广阔的应用前景。该项研究突破了传统二维范德华超晶格的局限, 发展出构筑新型非范德华超晶格材料、探索新物性与新功能的新方向。

推荐阅读文献

- Geim A K, Grigorieva I V. Van der Waals heterostructures. *Nature*, 2013, 499: 419–425
- Liu Y, Huang Y, Duan X. Van der Waals integration before and beyond two-dimensional materials. *Nature*, 2019, 567: 323–333
- Jariwala D, Marks T J, Hersam M C. Mixed-dimensional van der Waals heterostructures. *Nat Mater*, 2017, 16: 170–181
- Cao Y, Fatemi V, Fang S, et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature*, 2018, 556: 43–50
- Chen G, Sharpe A L, Fox E J, et al. Tunable correlated Chern insulator and ferromagnetism in a moiré superlattice. *Nature*, 2020, 579: 56–61
- Liu Y, Weiss N O, Duan X, et al. Van der Waals heterostructures and devices. *Nat Rev Mater*, 2016, 1: 16042
- Zhao B, Wan Z, Liu Y, et al. High-order superlattices by rolling up van der Waals heterostructures. *Nature*, 2021, 591: 385–390
- Haigh S J, Gholinia A, Jalil R, et al. Cross-sectional imaging of individual layers and buried interfaces of graphene-based heterostructures and

- superlattices. *Nat Mater*, 2012, 11: 764–767
- 9 Li M Y, Shi Y, Cheng C C, et al. Epitaxial growth of a monolayer WSe₂-MoS₂ lateral p-n junction with an atomically sharp interface. *Science*, 2015, 349: 524–528
 - 10 Naguib M, Kurtoglu M, Presser V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. *Adv Mater*, 2011, 23: 4248–4253
 - 11 VahidMohammadi A, Rosen J, Gogotsi Y. The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes). *Science*, 2021, 372: eabf1581
 - 12 Zhou J, Dahlqvist M, Björk J, et al. Atomic scale design of MXenes and their parent materials—From theoretical and experimental perspectives. *Chem Rev*, 2023, 123: 13291–13322
 - 13 Zhao Q, Du Z, Si K, et al. Non-van der Waals superlattices of carbides and carbonitrides. *Nature*, 2025, 647: 80–85
 - 14 Iqbal A, Shahzad F, Hantanasirisakul K, et al. Anomalous absorption of electromagnetic waves by 2D transition metal carbonitride Ti₃CNT_x (MXene). *Science*, 2020, 369: 446–450
 - 15 Wan S, Li X, Chen Y, et al. High-strength scalable MXene films through bridging-induced densification. *Science*, 2021, 374: 96–99