

原子级精准调控笼目金属中演生准二维超导态和配对密度波

韩相和¹, 陈辉^{1,2*}, 高鸿钧^{1,2*}

1. 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 纳米物理与器件实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 物理科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: hchenn04@iphy.ac.cn; hjgao@iphy.ac.cn

Atomic manipulation of the emergent quasi-2D superconductivity and pair density wave in a kagome metal

Xianghe Han¹, Hui Chen^{1,2*} & Hong-Jun Gao^{1,2*}

¹ Nanoscale Physics and Devices Laboratory, Beijing National Center for Condensed Matter Physics and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding authors, E-mail: hchenn04@iphy.ac.cn; hjgao@iphy.ac.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-5483](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5483)

发展人工操纵单个原子技术, 实现人类“用原子搭积木”的愿景, 是纳米技术的核心目标. 早在1989年, IBM科学家利用扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)在镍表面精准排列35个氦原子, 拼出公司Logo, 标志着人类进入原子操纵时代^[1]. 从此, 原子操纵技术迅速发展, 使原子尺度上调控物质的多种物理性质成为可能. 这包括: 将原子或分子按照特定的几何构型排列, 用以调控其能带结构^[2]; 在原子尺度上对磁性原子链或磁性纳米结构进行调控^[3]; 以及在原子尺度上实现精准刻蚀^[4]等. 然而, 传统的原子操纵与物性调控研究多集中于贵金属或半导体材料表面. 近年来, 关联量子材料中演生物态的原子级精确调控对于实现原子级新型量子器件具有重大意义. 目前, 利用原子操纵技术对关联量子材料中演生量子物态进行原子级精确调控的研究极具挑战性, 国际上未曾有过报道.

最近, 在笼目金属CsV₃Sb₅中, 我们利用极低温-强磁场扫描隧道显微镜/谱与原子操纵技术人工构筑了与表面2×2电荷密度波(charge density wave, CDW)具有相同周期的碱金属铯(Cs)有序结构, 原子级精准调控了演生准二维超导态和配对密度波, 成功实现了对关联量子材料中演生物态的精确调控. 该研究成果发表于*Nature Nanotechnology*^[5].

通过调控样品的解理温度, 我们获得了一种全新的解理面——2×2 Cs解理面. 该解理面上Cs原子最短间距为两倍晶格常数. 经测量发现, 2×2 Cs面在费米能级附近存在一个显著的局域束缚态, 并且展现出一个大小约为1.7 meV, 关于费米能级对称的能隙(图1(a)). 系统的变磁场和变温实验确认了该能隙为2×2 Cs面的新型演生准二维超导能隙. 此外, 在对应准二维超导能量范围内, 我们还观测到调制周期为4倍晶格周期(4a₀×4a₀)的准二维超导配对密度波^[6,7].

为揭示演生超导的产生机制, 我们利用STM原子操纵技术人工构建了不同尺寸的正三角形2×2 Cs纳米岛(图1(b), (c)). 研究发现, 当纳米岛边由多于20个Cs原子组成时(图1(d)), 可在纳米岛特征谱中探测到演生超导态. 据此可以精确计算出该演生超导态的相干长度约为6 nm, 该数值和通过磁通涡旋估算得到的结果一致.

碱金属原子会在样品表面引入局域电子掺杂, 这会对样品表面能带造成影响^[8]. 但是除2×2 Cs以外, 在CsV₃Sb₅中还被报道发现过多种重构^[9], 其中不乏与2×2 Cs有着相似表面Cs原子覆盖度的重构, 然而我们并未在这些重构中探测到演生超导态. 所以除了电子掺杂外, 一定还存在其他的诱导因素. 我们注意到, 不同于其他重构, 2×2 Cs和CsV₃Sb₅的三维

引用格式: 韩相和, 陈辉, 高鸿钧. 原子级精准调控笼目金属中演生准二维超导态和配对密度波. 科学通报, 2026, 71: 4–6

Han X, Chen H, Gao H-J. Atomic manipulation of the emergent quasi-2D superconductivity and pair density wave in a kagome metal (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2026, 71: 4–6, doi: [10.1360/CSB-2025-5483](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5483)

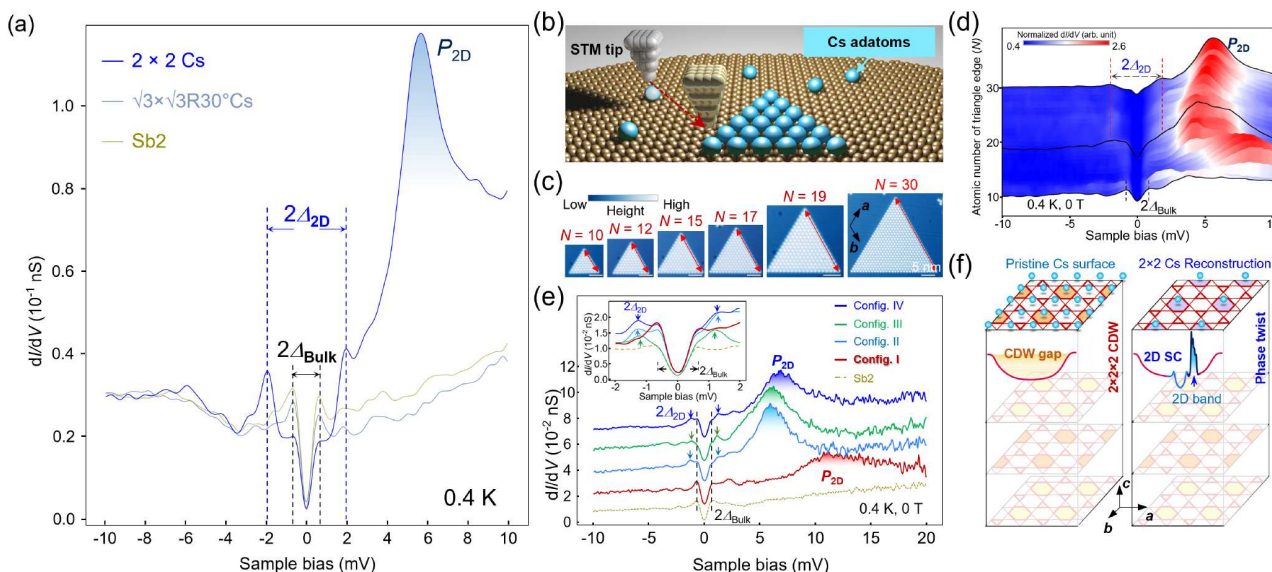


图 1 (网络版彩色)在笼目金属 CsV_3Sb_5 表面构筑碱金属人工量子结构, 演生出新型的准二维超导态并实现原子级精准调控^[5]. (a) 不同表面的微分电导谱. (b) STM原子操纵构建人工 2×2 Cs三角形纳米岛的示意图. (c) 不同尺寸的人造 2×2 Cs纳米岛. (d) 三角形岛特征隧穿电导谱对岛尺寸的依赖关系. (e) 四种 2×2 Cs重构构型的特征微分电导谱. (f) 在 2×2 CDW的“反相位”界面产生准二维超导

Figure 1 (Color online) Construction of artificial alkali-metal quantum superstructures on the surface of the kagome metal CsV_3Sb_5 , giving rise to a novel quasi-two-dimensional superconducting state and the atomic manipulation of it^[5]. (a) Differential conductance spectra acquired over distinct surfaces. (b) Schematic of STM-tip-based atomic manipulation for constructing artificial 2×2 Cs triangular nano-islands. (c) STM topographies of 2×2 Cs nano-islands with different sizes. (d) Evolution of the characteristic tunneling conductance spectra of triangular islands as a function of island size. (e) Characteristic differential conductance spectra for four distinct 2×2 Cs reconstruction configurations. (f) Emergence of quasi-2D superconductivity at antiphase boundaries of the 2×2 CDW

2×2 CDW有着相同的面内周期, 二者可能存在紧密联系. 而每个 2×2 Cs超晶格只包含一个Cs原子, 该原子可占据下层笼目晶格中CDW的 2×2 超结构内四个六边形中心位之一. 由此可以得到四种 2×2 Cs超晶格在表面的排布构型, 其中只有一种与面内 2×2 CDW同相位, 其余三种皆为反相位, 即存在 π 相位差. 而且经密度泛函理论计算发现, 表面 2×2 CDW与 2×2 Cs存在相位锁定关系, 经表面弛豫后 2×2 CDW会与 2×2 Cs保持同相位, 故四种 2×2 Cs构型中, 仅一种与体CDW同相, 其余三种因 π 相位差破坏CDW的相位相干, 形成“反相位”界面. 据此, 我们再次利用STM原子操纵技术, 在表面构建了四种同尺寸不同相位的正三角形 2×2 Cs纳米岛, 在其中三种构型中观测到了较强的演生超导, 剩余一种构型中则无法探测到(图1(e)). 这说明三维 2×2 CDW的“反相位”界面是演生准二维超导态的关键因素(图1(f)).

为进一步证明演生超导态与体材料中三维CDW密切相关, 我们也设计了对比实验. 在同样具有三维CDW的其他笼目超导体(KV_3Sb_5 和 RbV_3Sb_5)中, 我们均观测到了演生超导态的迹象. 此外, 通过Ti掺杂, 笼目超导体中长程有序的CDW被完全抑制^[10]. 在该材料表面构筑的 2×2 的Cs有序结构中未能观测到演生超导态.

该研究创新性地通过原子操纵技术人工构建了碱金属有序结构, 首次实现了笼目金属材料中的演生准二维超导态与配对密度波的调控, 通过精确构筑CDW“反相位”界面探明了三维CDW堆垛的相位缺陷是产生准二维超导的关键因素, 提出了在笼目金属乃至其他关联量子材料中演生、操控与控制量子多体态的新方法. 未来, 借助自动化操纵^[11]或化学方法^[12], 有望在微米尺度上CDW相位的调控, 为角分辨光电子谱、输运测量等手段提供全新的量子材料平台.

推荐阅读文献

- 1 Eigler D M, Schweizer E K. Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope. *Nature*, 1990, 344: 524–526
- 2 Kempkes S N, Slot M R, van den Broeke J J, et al. Robust zero-energy modes in an electronic higher-order topological insulator. *Nat Mater*, 2019, 18: 1292–1297
- 3 Krause S, Berbil-Bautista L, Herzog G, et al. Current-induced magnetization switching with a spin-polarized scanning tunneling microscope. *Science*, 2007, 317: 1537–1540

- 4 Weber B, Mahapatra S, Ryu H, et al. Ohm's law survives to the atomic scale. [Science](#), 2012, 335: 64–67
- 5 Han X, Chen H, Tan H, et al. Atomic manipulation of the emergent quasi-2D superconductivity and pair density wave in a kagome metal. [Nat Nanotechnol](#), 2025, 20: 1017–1025
- 6 Chen H, Yang H, Hu B, et al. Roton pair density wave in a strong-coupling kagome superconductor. [Nature](#), 2021, 599: 222–228
- 7 Chen H, Gao H J. Widespread pair density waves spark superconductor search. [Nature](#), 2023, 618: 910–912
- 8 Yu J, Xu Z, Xiao K, et al. Evolution of electronic structure in pristine and Rb-reconstructed surfaces of kagome metal RbV_3Sb_5 . [Nano Lett](#), 2022, 22: 918–925
- 9 Liang Z, Hou X, Zhang F, et al. Three-dimensional charge density wave and surface-dependent vortex-core states in a kagome superconductor CsV_3Sb_5 . [Phys Rev X](#), 2021, 11: 031026
- 10 Yang H, Huang Z, Zhang Y, et al. Titanium doped kagome superconductor $\text{CsV}_{3-x}\text{Ti}_x\text{Sb}_5$ and two distinct phases. [Sci Bull](#), 2022, 67: 2176–2185
- 11 Chen I J, Aapro M, Kipnis A, et al. Precise atom manipulation through deep reinforcement learning. [Nat Commun](#), 2022, 13: 7499
- 12 Khalil S M, Sedky A. Annealing temperature effect on the properties of Bi:2212 superconducting system. [Physica B-Condensed Matter](#), 2005, 357: 299–304