



界面超导新进展: BaAs/FeAs基异质结中的全能隙超导

程强军^{1†}, 任明强^{2†}, 宋灿立^{1,3}, 马旭村^{1,3}, 薛其坤^{1,2,3,4,5*}

1. 清华大学物理系, 北京 100084

2. 南方科技大学物理系, 深圳 518055

3. 量子信息前沿科学中心, 北京 100084

4. 北京量子信息科学研究院, 北京 100193

5. 粤港澳大湾区量子科学中心, 深圳 518045

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: qkxue@mail.tsinghua.edu.cn

New progress in interfacial superconductivity: full-gap superconductivity in BaAs/ferropnictide heterostructures

Qiang-Jun Cheng^{1†}, Ming-Qiang Ren^{2†}, Can-Li Song^{1,3}, Xu-Cun Ma^{1,3} & Qi-Kun Xue^{1,2,3,4,5*}

¹ Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

³ Frontier Science Center for Quantum Information, Beijing 100084, China

⁴ Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China

⁵ Quantum Science Center of Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area (Guangdong), Shenzhen 518045, China

† Equally contributed to this work

* Corresponding author, E-mail: qkxue@mail.tsinghua.edu.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-5495](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5495)

自1986年铜氧化物高温超导体被发现以来^[1], 非常规高温超导机理一直悬而未决, 被誉为凝聚态物理的“圣杯”。尽管经过大量的理论和实验探索, 高温超导电性的配对驱动力和对称性仍存在很多争议^[2]。早期研究受限于单晶样品质量的良莠不齐, 很多实验测量结果存在矛盾。更棘手的是, 高温超导的核心“舞台”(如铜氧面)深藏于电荷库层之间, 难以直接被探测, 这让它的本征超导电性一直被蒙上神秘面纱。2015年, 薛其坤团队创新性地采用氩离子刻蚀技术, 把材料表面一层层“剥开”, 就像剥洋葱一样, 首次在原子尺度上精准地露出了铜氧面^[3], 并在该表面观测到了与电荷库层不同的实验结果, 凸显了直接测量超导面的重要性。为进一步深入解析铜氧化物超导的奥秘, 研究团队随后将目光聚焦于电子掺杂的无限层铜氧化物。他们通过分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE)技术, 像搭积木一样, 把原子一层层堆砌, 成功制备出以铜氧面为终止面的原子级平整单晶薄膜^[4,5], 并观察到无节点超导能隙的存在, 更首次观测到能隙外的声子

共振模式。这些突破性发现不仅为铜氧化物的奥秘提供了新的实验依据, 更确证了超导面可能具有区别于电荷库层的独特电子结构特征。

铁基超导体因其电子之间相互作用相对较弱, 给研究人员提供了独特的优势, 因此被视为探索非常规高温超导机理的理想体系^[6]。在铁硒基超导体研究中, 薛其坤团队率先制备出高质量单晶薄膜^[7], 并最终导致了单层FeSe/SrTiO₃(001)界面高温超导体的发现^[8], 引起了世界范围内的研究热潮。相比之下, 在更具代表性的铁砷基超导体中却存在难题: 它的关键层——铁砷面——本身带有“极性”, 导致用常规方法获得的表面往往呈现显著的结构无序^[9]。这一技术瓶颈严重制约了超导能隙、涡旋束缚态以及拓扑超导特性等微观物理性质的精确表征。如何有效解决终止面的极性问题并抑制无序散射效应, 已成为揭示铁基超导体本征超导机制的关键科学难题。

近年来, 氧化物界面超导研究领域蓬勃发展^[10,11], 这一体

引用格式: 程强军, 任明强, 宋灿立, 等. 界面超导新进展: BaAs/FeAs基异质结中的全能隙超导. 科学通报, 2025, 70: 5009–5011

Cheng Q-J, Ren M-Q, Song C-L, et al. New progress in interfacial superconductivity: full-gap superconductivity in BaAs/ferropnictide heterostructures (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5009–5011, doi: [10.1360/CSB-2025-5495](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5495)

系普遍通过在绝缘氧化物界面引入载流子实现了二维超导性。其关键思路是把掺杂带来的杂乱无序与超导电子配对形成区域进行空间上的分离。这一创新思路为研究铁基超导体的本征超导特性提供了重要启示。以单层铁硒/锶钛氧异质结为例^[8], 衬底不仅提供了高密度载流子, 还通过界面晶格振动(声子)显著增强了超导配对强度, 最终实现了铁基超导体在常压条件下的最高转变温度。类似地, 在LaOFeAs体系中, 绝缘的LaO层作为电荷库层, 与中间的超导活性单元FeAs层形成理想的界面超导结构, 这可能是该体系表现出较高超导转变温度的重要机制。

基于上述研究思路, 我们选取最具有代表性的铁砷基超薄薄膜 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ (简称BFCA)作为研究平台, 利用分子束外延技术构筑新型界面结构, 旨在揭示FeAs层的本征超导性^[12]。研究团队成功制备出掺杂连续可控的BFCA薄膜样品, 输运测量表明其超导转变温度最高可达30 K, 显著超越过去的同类块材样品。由于FeAs面固有的极性特征, 本征BFCA薄膜表现出两种典型的表面终止结构: 金属性的1/8Ba终止面和超导性的1/4Ba终止面。值得注意的是, 1/4Ba终止面由于无序表现出具有明确的V形超导能隙结构。为了降低表面无序带来的负面影响, 研究团队创新性地结合低温沉积和多步退火工艺在FeAs表面成功构筑出高质量的BaAs界面(图1)。BaAs面具有和FeAs相同的 α -PbO结构以及近乎完美的晶格匹配性, 因此可以有效补偿FeAs面的极性特征。扫描隧道显微镜形貌学研究表明BaAs表面具有优异的平整度且表面原子排布与密度泛函理论高度吻合, 证实了新型界面体系的成功构建。

在低温下(3.0 K), 研究团队在BaAs/BFCA(10-UC)异质结

表面观测到U形能隙结构, 证实了电子掺杂铁砷基超导体中的全能隙超导性(图1左)。变温实验进一步表明这个超导能隙遵循传统的BCS平均场理论, 能隙闭合温度达到26 K。通过逐层削薄BFCA薄膜厚度, 研究团队发现该U形能隙稳健存在, 即使在单胞层厚的BFCA薄膜和BaAs异质结构中仍可观测到稳定的U形能隙, 证实BaAs/BFCA异质结为本征二维超导体。值得注意的是, 输运测量发现无BaAs修饰的BFCA薄膜的超导临界温度随着薄膜厚度降低而迅速下降, 这一现象可能源于衬底应力和无序散射效应对长程超导序参量的影响。在面外磁场条件下, 研究团队在BaAs/BFCA异质结表面观测到清晰的磁通涡旋及其伴随的零能电导峰, 不仅表明该体系为第二类超导体, 更为深入探索铁砷基超导体中的拓扑超导性提供了理想平台。

为了深入解析BaAs/BFCA异质结中全能隙超导态的物理起源, 研究团队系统比较了BFCA薄膜1/4Ba终止面的V形超导能隙特征, 能隙内存在显著的剩余态密度。双能隙模型拟合结果表明, 尽管BaAs/BFCA与1/4Ba-BFCA体系的超导能隙幅值相近, 暗示两者可能具有相当的电子配对强度, 但其准粒子散射寿命却呈现显著差异: 1/4Ba表面的准粒子散射寿命为1.2 meV, 而BaAs修饰界面展现出异常洁净的超导特征($\Gamma = 0.08$ meV), 散射强度降低达两个数量级。这一关键对比实验直接证实, 通过BaAs界面工程实现的原子级平整表面可有效抑制杂质散射效应, 为揭示本征超导特性提供了理想平台。

最后, 通过对电子掺杂水平的高精度连续调控, 研究团队成功绘制了BaAs/BFCA异质结体系的完整超导相图, 揭示了其穹顶型演化规律。值得注意的是, 异质结超导能隙尺寸

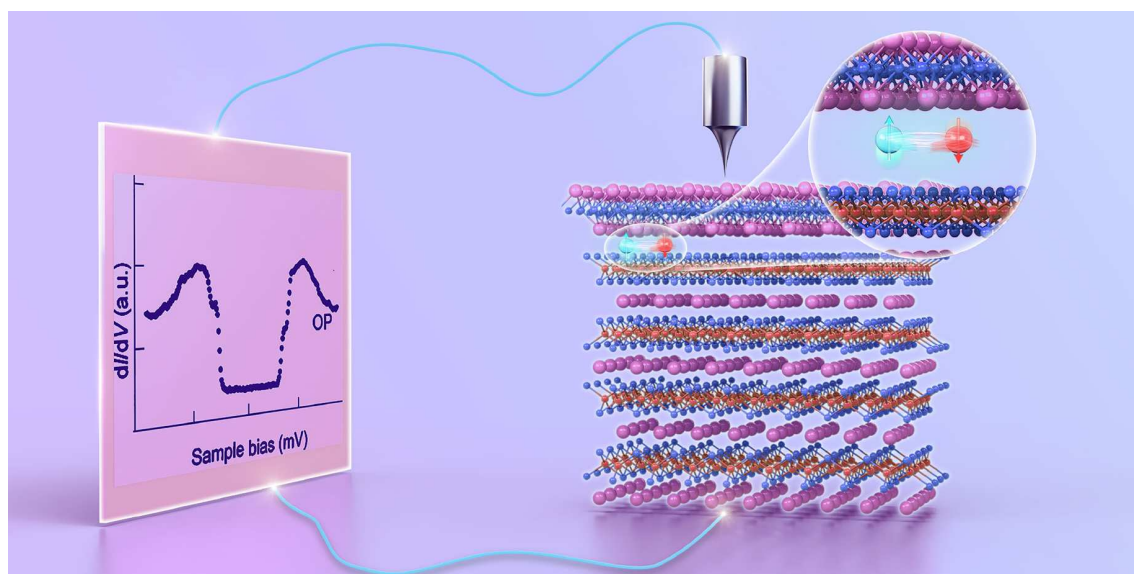


图1 (网络版彩色)BaAs/BFCA异质结中的全能隙超导。左: BaAs表面的U形超导能隙; 右: BaAs/BFCA异质结的晶体结构
Figure 1 (Color online) Full-gap superconductivity in BaAs/BFCA heterostructure. Left: U-shaped superconducting gap on the BaAs surface; right: crystal structure of the BaAs/BFCA heterostructure

与输运测量获得的超导转变温度变化趋势高度一致,这一关联性不仅证实了异质结构中的电子掺杂行为与体材料BFCa具有相同的物理机制,更重要的是揭示了界面工程在探索本征超导特性方面的独特价值。第一性原理计算进一步从电子结构层面支持了这一实验发现,为理解界面调控对超导特性的影响提供了理论依据。

钡锶/铁锶异质结体系中观测到的全能隙超导态为高温超导机理研究提供了全新的物理视角,同时也为探索新型高温超导材料体系指明了重要方向。在层状高温超导体中,较弱的层间耦合作用使得超导电性主要源于单个原胞层内的物理过程,因此超导层与电荷库层之间的界面耦合机制具有决定性作用。这种耦合具有双重效应:一方面,电荷库层通过载流子掺杂为超导电性提供了必要的配对电子态;另一方面,

掺杂引入的结构无序和杂质散射又会显著抑制超导序参量的建立。研究团队通过系统的界面工程研究发现,对电荷库层进行精确修饰不仅可以调控超导能隙的结构,还能显著影响磁通涡旋的动力学行为,这为理解杂质散射对超导态的影响机制提供了直接实验证据。

结合研究团队过去在铁硒^[8,13]、铜氧化物^[5]以及富勒烯^[14]等多种高温超导薄膜中成功实现的全能隙超导态的观测,这些成果最终导向了一个普适性的材料设计原则:构建具有原子级平整界面、极低杂质散射和本征二维特性的新型异质结构体系。这一研究范式不仅为理解铁基超导体中无节点超导配对机制开辟了新途径,更重要的是为未来拓扑超导材料、量子信息器件等前沿领域的材料设计提供了可推广的技术路线。

推荐阅读文献

- 1 Bednorz J G, Müller K A. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 1986, 64: 189–193
- 2 Tsuei C C, Kirtley J R. Pairing symmetry in cuprate superconductors. *Rev Mod Phys*, 2000, 72: 969–1016
- 3 Lv Y F, Wang W L, Peng J P, et al. Mapping the electronic structure of each ingredient oxide layer of high- T_c cuprate superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 237002
- 4 Zhong Y, Fan J Q, Wang R F, et al. Direct visualization of ambipolar Mott transition in cuprate CuO_2 planes. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 077002
- 5 Fan J Q, Yu X Q, Cheng F J, et al. Direct observation of nodeless superconductivity and phonon modes in electron-doped copper oxide $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{CuO}_2$. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwab225
- 6 Stewart G R. Superconductivity in iron compounds. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 1589–1652
- 7 Song C L, Wang Y L, Cheng P, et al. Direct observation of nodes and twofold symmetry in FeSe superconductor. *Science*, 2011, 332: 1410–1413
- 8 Wang Q Y, Li Z, Zhang W H, et al. Interface-induced high-temperature superconductivity in single unit-cell FeSe films on SrTiO_3 . *Chin Phys Lett*, 2012, 29: 037402
- 9 Yin Y, Zech M, Williams T L, et al. Scanning tunneling spectroscopy and vortex imaging in the iron pnictide superconductor $\text{BaFe}_{1.8}\text{Co}_{0.2}\text{As}_2$. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 097002
- 10 Gozar A, Logvenov G, Kourkoutis L F, et al. High-temperature interface superconductivity between metallic and insulating copper oxides. *Nature*, 2008, 455: 782–785
- 11 Nethwewala A, Lee H, Li J, et al. Electron pairing and nematicity in $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ nanostructures. *Nat Commun*, 2023, 14: 43539
- 12 Ren M Q, Cheng Q J, He H H, et al. Full-gap superconductivity in BaAs/ferropnictide heterostructures. *Phys Rev Lett*, 2025, 134: 246203
- 13 Song C L, Zhang H M, Zhong Y, et al. Observation of double-dome superconductivity in potassium-doped FeSe thin Films. *Natl Sci Rev*, 2016, 116: 157001
- 14 Ren M Q, Han S, Wang S Z, et al. Direct observation of full-gap superconductivity and pseudogap in two-dimensional fullerides. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 187001