

科技新闻

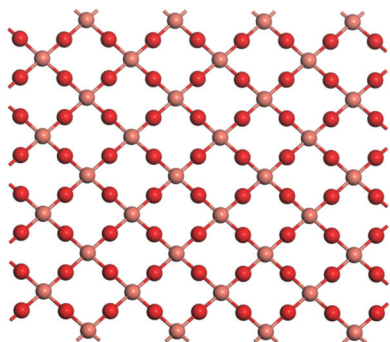
·前沿动态·

高温超导在单面原子层中延续

复旦大学物理学系张远波团队联合国内外科研人员,首次制备出仅含单个 CuO_2 平面的极限二维铜基高温超导体 Bi-2201 ,并利用这一高度可调的材料研究超导与绝缘态之间的量子相变。2026年8月12日,相关研究成果发表于《Nature》。

铜基高温超导自1986年被发现以来,其微观机理一直是凝聚态物理的重要难题。不同铜基超导材料虽然化学组成和超导转变温度各不相同,却都包含 CuO_2 平面,高温超导的关键物理过程被认为主要发生在这种近乎二维的原子层中。然而,依据二维体系中热涨落的基本理论,严格的二维条件下并不存在超导长程序。为何常压下具有最高超导转变温度的铜基超导体均为二维层状结构?这是超导微观机理研究中一个长期悬而未决的问题。

要解开高温超导维度问题的



铜氧化物高温超导体中的 CuO_2 二维平面结构示意:铜原子和氧原子在平面内构成规则的二维网络

(图片来源:张远波研究团队)

谜团,一个思路就是不断把材料做薄:如果只剩一个 CuO_2 面,超导是否仍然存在?然而,原子级薄的铜氧化物极易受到空气和水汽破坏,而且其超导性质对氧含量十分敏感,样品制备和载流子浓度调节都非常困难。

此次研究选择铜基超导体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6+\delta$ (Bi-2201),将材料减薄到只含一个 CuO_2 面的单层极限。研究团队自主搭建低温惰性气氛实验设备,在隔绝空气和水汽的条件下完成样品剥离和器件加工,并发展出原位氧含量调控技术。通过改变臭氧浓度和温度,研究人员可以连续调节材料中的空穴掺杂,掺杂分辨率 δp 达到约0.0005,从而在同一类单层样品中观察从莫特绝缘态到超导态的完整演化过程。

实验发现,单层 Bi-2201 依然能够保持超导,其最佳超导转变温度比块体材料降低约10%。这说明,当材料减薄到单个 CuO_2 面时,维度变化确实开始影响超导性能;但与此同时,单层材料仍保留了块体铜氧化物的主要关联电子特征,表明许多与高温超导相关的核心物理性质在一个 CuO_2 面中就能够存在。

(综合:《Nature》、复旦大学官网)

二维半导体上直接长出单晶金属

二维半导体有望突破传统硅基晶体管持续微缩面临的物理限制,但金属接触界面的高电阻、易损伤和稳定性不足,一直制约其器件性能和规模化应用。复旦大学、中国科学院上海技术物理研

究所、湖南大学和新加坡国立大学等组成的联合团队提出一种原子尺度分步蒸镀技术,在单层二维半导体表面直接生长出多种单晶金属,为构建低功耗、高集成度的下一代电子器件提供了新的材料与工艺路径。2026年8月27日,相关研究成果发表于《Science》。

二维半导体只有一个或几个原子层厚,被视为延续晶体管微缩的重要候选材料。但要把它接入电路,仍需金属充当源、漏电极。传统蒸镀会让高能金属原子连续撞击材料表面,造成晶格损伤和热量积累,形成大量晶界与缺陷。这些无序结构不仅阻碍电子或空穴通过,还会引起费米能级钉扎,使界面势垒难以按需要调控。

研究团队没有连续“倾倒”金属原子,而是每次沉积约0.5 nm,随后暂停5 min,再进行下一轮沉积。暂停期间,反应腔内温度和压力逐渐稳定,已沉积的原子得以沿表面扩散,小晶畴横向生长并相互并合,同时减少新的无序晶核和局部热损伤。借助这一动力学窗口,原本缺少悬挂键、只能与金属产生较弱范德华作用的二维材料表面,反而成为引导单晶生长的平整模板。

利用该方法,团队在二硫化钼和二硒化钨表面制备出铋、银、铜、金和钯等单晶金属。所得界面原子排列整齐、功函数空间分布均匀,金属与半导体之间的势垒接近理想的肖特基-莫特关系。其中,采用单晶铋接触的单层二硫化钼N型晶体管,接触电阻低

至 $36\ \Omega\cdot\mu\text{m}$; 采用单晶钼接触的
单层二硫化钨P型晶体管, 接触
电阻低至 $145\ \Omega\cdot\mu\text{m}$ 。2类器件开
关比均超过 1010; 当沟道缩短至
约 50 nm 时, 开态电流仍超过 1.1
 $\text{mA}/\mu\text{m}$ 。单晶钼器件的耐受温度
还由多晶接触时的约 510 K 提高
至约 705 K。

《Science》同期视角文章认为, 这项研究将二维材料“缺少强键”的弱点转化为不受严格晶格匹配限制的优势, 为在芯片中集成多种单晶金属乃至绝缘材料提供了新路径。不过, 反复暂停会降低生产效率, 若要用于先进三维芯片, 还需解决低温沉积及复杂侧壁均匀覆盖等问题。

(综合:《Science》、复旦大学官网)

双缝干涉缩小到原子尺度

东京大学柴田直哉、田畑浩大等与维也纳大学研究人员合作, 将经典双缝干涉实验缩小约 1000 万倍, 利用相距仅 $1.36\ \text{\AA}$ 的 2 列硅原子柱形成电子干涉, 并进一步从干涉条纹中读取相邻原子的协同振动。2026 年 8 月 19 日, 相关研究成果发表于《Nature》。

19 世纪初, 托马斯·杨通过双缝实验展示了光的波动性质。当波穿过 2 个相邻狭缝后重新叠加, 会形成明暗相间的干涉条纹。此后, 这一原理被推广至电子、中子、原子乃至复杂分子, 并逐渐发展成为精密测量的重要工具。

如果把“双缝”进一步缩小到原子尺度, 干涉图案就可能携带局部原子结构和运动的信息。然而, 真实晶体由大量周期排列的

原子构成, 电子同时受到众多原子的散射作用, 很难将测量限制到特定的一对原子。

研究团队借助扫描透射电子显微镜解决了这一难题。他们将高度聚焦的电子束精确照射到硅晶体沿[110]方向相邻 2 列原子柱之间, 2 列原子的投影间距仅为 $1.36\ \text{\AA}$ 。

这里的 2 列原子柱并不是像传统双缝实验那样真正开出的 2 个“孔”。电子进入晶体后, 受到原子势场作用, 会沿相邻 2 列原子柱附近传播, 这一过程称为“沟道效应”。当电子离开约 10 nm 厚的晶体时, 其波函数形成 2 个彼此分开的强度峰, 相当于 2 个相干电子波源。2 个电子波随后在远处叠加, 在探测器上产生规则的干涉条纹。

实验获得的条纹周期与 $1.36\ \text{\AA}$ 的原子柱间距准确对应。当电子束改为直接照射单个原子柱时,

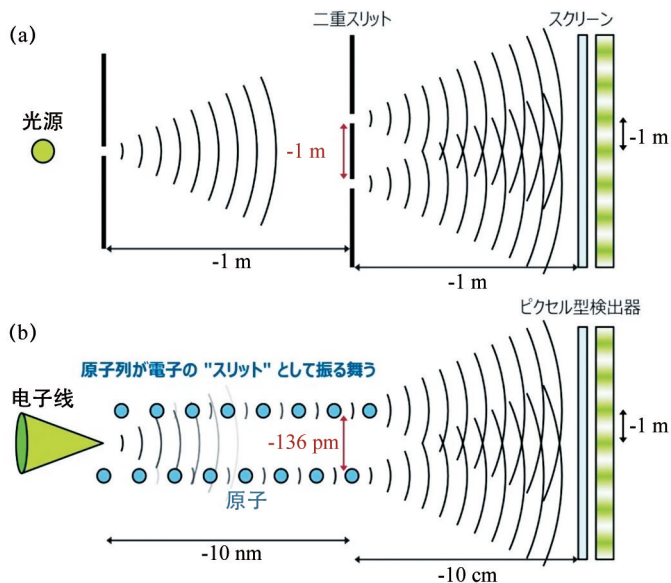
这种周期性条纹消失, 进一步证明干涉来源于相邻 2 列原子柱共同作用形成的 2 个相干波源。

研究的另一项重要突破, 是利用干涉条纹测量原子如何运动。

晶体中的原子并非静止不动, 而是在平衡位置附近持续热振动。按照简单模型, 如果相邻原子彼此独立地随机振动, 它们之间的距离会不断变化, 2 个电子波的相位关系也会迅速被扰乱, 高阶干涉条纹应随之消失。

然而实验发现, 即使将温度从约 300 K 升高到 900 K, 干涉条纹依然存在, 其中二级条纹在 900 K 时仍清晰可见。

研究人员发现, 这是因为相邻原子的振动并非彼此独立。许多晶格振动会让 2 个相邻原子近似朝同一方向运动。虽然它们都在振动, 但彼此之间的相对距离变化较小, 因此仍能维持电子波的相干性。只有那些使 2 个原子



(a) 经典的杨氏双缝干涉实验; (b) 原子尺度干涉示意, 使用从特定方向照射的相邻硅原子行作为“双缝”(缝间距 136 pm, 晶体厚度约 10 nm)

(图片来源: 东京大学官网)