

超材料前沿研究一周精选



2025 年 11 月 24 日-2025 年 11 月 30 日

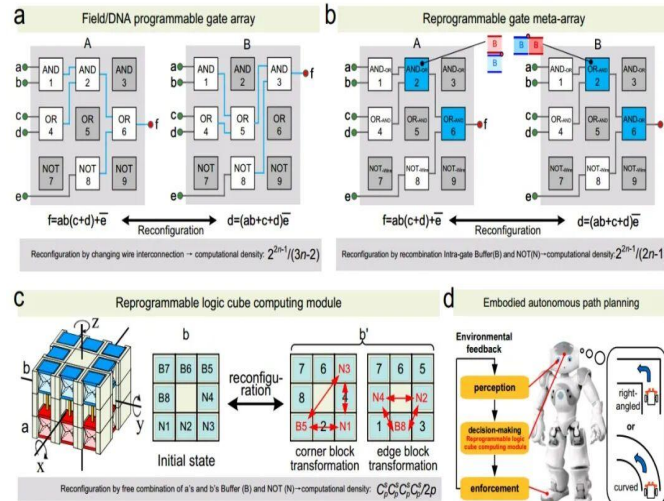
索引:

- 1、空间可编程折纸网络实现自主机器人高密度机械计算
- 2、耦合石墨烯纳米机械谐振器空间分辨参数分析的最小数据方法
- 3、用于高温测量的色散型超透镜温度计
- 4、超快时间尺度下金刚石缺陷的热声子畸变
- 5、 SrTiO_3 中强受限的中红外-太赫兹声子极化激元
- 6、突破传统散热—用于极端热流管理的先进微纳米结构

1、空间可编程折纸网络实现自主机器人高密度机械计算

机械计算作为一种基于机械运动或变形实现逻辑操作的非传统信息处理方式,在复杂环境适应、安全关键系统及能源自主等领域具有独特价值。相较于电子计算,机械计算虽在运算速度与集成度上存在不足,但其能够将计算功能直接嵌入材料结构中,使机器人系统具备分布式自主感知、决策与执行能力,从而提升在动态环境中的适应性与鲁棒性。然而,现有机械计算系统多针对单一任务设计,逻辑功能固定且重构性差,导致计算密度低、冗余单元多,严重限制了其在轻量化结构与复杂认知任务中的应用。因此,开发具备高密度、可重构能力的机械计算架构,成为推动自主机器人发展的关键挑战。

近日,上海交通大学的颜志淼副教授、谭婷副教授研究团队提出一种基于折纸超材料的可编程机械计算方法,通过构建可重构导电网络实现逻辑功能的高密度集成与动态重组。研究设计了二维可编程门元阵列,利用 Buffer 与 NOT 单元作为基本逻辑元素,通过旋转重组实现 AND 与 OR 功能的相互转换,从而在固定布线结构中动态调整布尔级联逻辑。该方法显著降低了逻辑门数量,相比传统现场可编程门阵列减少 46.7%,并高效执行算术运算与比较操作。进一步地,研究引入三维可编程逻辑立方,借鉴魔方结构实现多轴重构,通过层间旋转与块变换灵活组合 Buffer/NOT 单元,完成全加器与全减法等复杂逻辑功能,计算密度提升至 1728。在机器人集成应用中,该逻辑立方作为决策模块与感知-执行系统协同工作,实现了在直角与弯曲路径中的自主识别与运动规划,验证了其在动态环境中的适应性与实用性。该框架不仅解决了机械计算系统中功能固定与集成度低的共性难题,还为物理结构与计算功能的一体化设计提供了通用方法,对推动体现智能、信息材料及自主机器人系统的发展具有重要意义。该研究成果发表于《Nature Communications》。(刘梦洋)

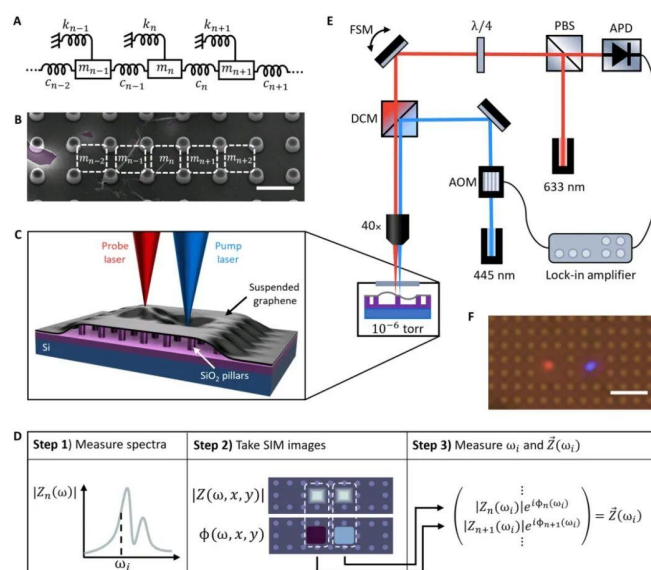


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64956-0>

2、耦合石墨烯纳米机械谐振器空间分辨参数分析的最小数据方法

在自然界和人工系统中，相互作用的许多体系统广泛存在，涵盖从原子固体到人脑乃至天体等不同尺度。这类系统也构成了多种合成体系，如固态与光学量子比特阵列、光子与声子晶体以及神经网络，并在神经形态计算、量子计算、强关联相和超材料等前沿应用中发挥核心作用。纳米机电谐振器（NEMS）网络作为这些系统的实验模拟平台，不仅提供理想的研究载体，还在可重构声子晶体、波导、可调热传输及机械计算与仿真中展现出广阔前景。然而，实现实用化 NEMS 网络面临关键瓶颈：现有参数表征方法严重依赖先验知识、大量数据和迭代拟合，难以从复杂网络响应中准确提取空间分辨的机械参数与耦合强度。特别是在网络规模扩大时，谐振峰重叠、弱耦合信号淹没于噪声等问题，使得传统非线性回归方法效率低下且不确定性高。

近日，美国俄勒冈州立大学的 Benjamín J. Alemán 副教授研究团队，开发的 NetMAP 框架通过求解逆代数问题，仅需两个频率下的空间响应向量即可直接解析网络中各节点的质量、弹性、阻尼及耦合参数，完全避免了模型拟合与初始参数猜测。研究以悬浮于硅基柱阵列上的石墨烯谐振器为实验平台，通过光学泵浦-探测技术与扫描干涉显微成像实现振幅与相位的空间测绘，进而构建响应矩阵并利用奇异值分解求解参数向量。实验表明：对单谐振器，该方法仅凭两个数据点即可高精度预测完整光谱响应；对耦合谐振器对，能准确量化各参数并对实验光谱变异保持 73% 至 99.6% 的解释力。与传统最小二乘法相比，该方法在无需精确初始猜测的情况下仍能获得可比精度，显著提升了参数提取的可靠性和效率。这一非回归性方法具有领域通用性，可推广至光子、电子等各类线性耦合系统，为开发可编程声子晶体、实现机械计算和探索新奇物态提供了关键工具。该成果发表于《Science Advances》。（刘梦洋）

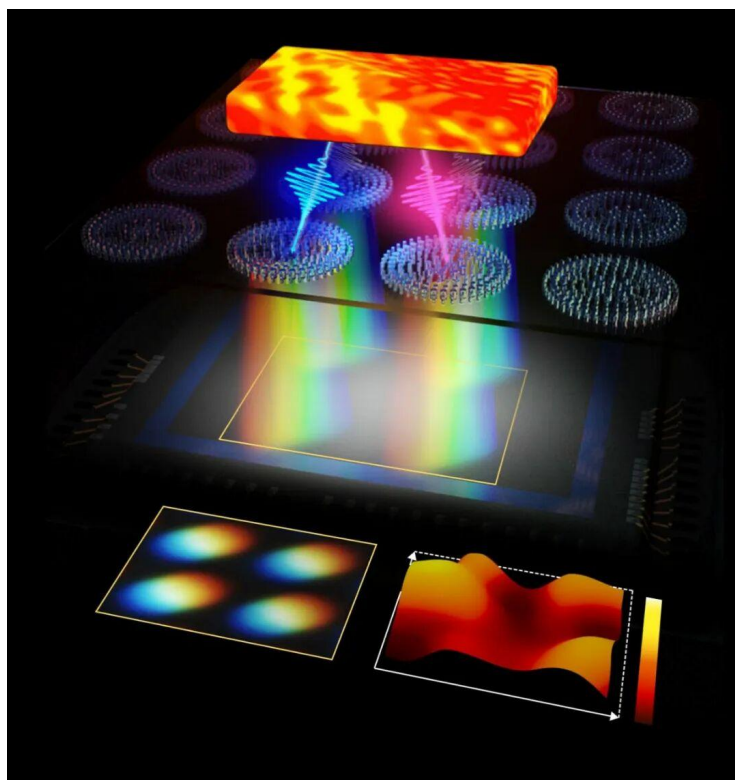


文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adq0621>

3、用于高温测量的色散型超透镜温度计

温度决定物质能量与状态变化，是工业、能源及自然过程的重要参数。随着材料与设备不断向极限工况发展，高温测量精度愈加关键，例如航空发动机高推重比需求使燃烧温度逼近 2400K，已接近甚至超过涡轮叶片材料极限。因此，实现高温下安全、耐久及寿命预测必须依赖准确的非接触测温技术。相比接触式传感，辐射测温适合极端环境，但其精度受材料发射率影响显著，而传统单波或双波测温依赖发射率假设误差较大。多光谱虽有优势，却面临光学系统笨重、难以小型化的问题。超表面超透镜具备亚波长操控能力，尺寸轻薄，可实现相位、振幅与色散调控，为压缩光谱成像与小型化测温提供新方向。尤其在可见波段，高温辐射更强、常见燃烧气体吸收更弱，结合商用 CMOS 传感器，有望突破传统红外测温限制。由此，色散型超透镜成为高温多光谱测温的潜在关键技术。

近日，上海交通大学施圣贤教授、中国航发湖南动力机械研究所曾飞研究员、清华大学耿子涵副教授、哈尔滨工业大学肖淑敏教授、香港城市大学蔡定平教授团队，提出了一种用于高温测量的色散型超透镜测温技术（DMT），利用具备可控色散特性的色散超透镜，将高温辐射的高光谱信息压缩编码到单帧图像中，并通过凸光谱压缩感知算法与深度逆色散网络进行解码与光谱重建。实验表明，该方法相较先进的多光谱光场测温技术，测量误差降低了约六倍（小于 0.32%），且在火焰冲击环境下仍能保持低于 1.5% 的误差。尽管系统仍需进一步集成，但该成果展示了高温测量向小型化、高光谱、高精度方向发展的重要潜力。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



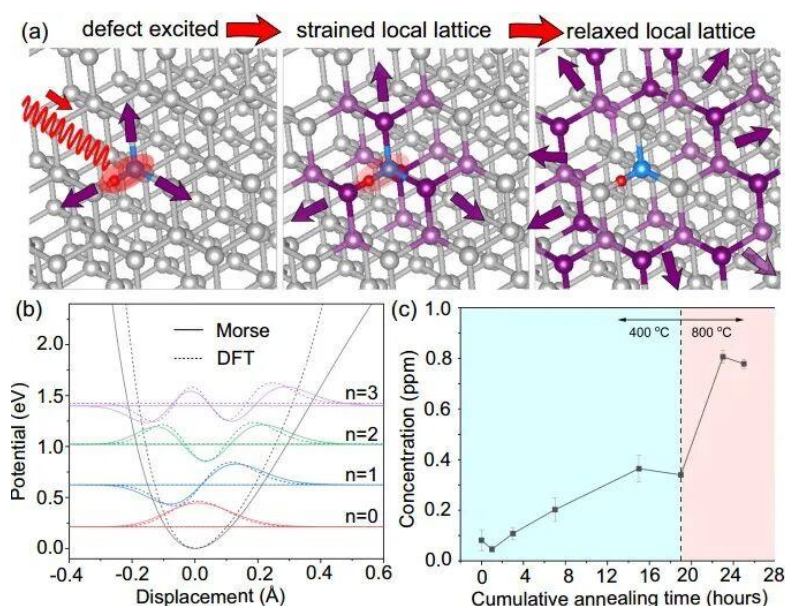
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65171-7>

4、超快时间尺度下金刚石缺陷的热声子畸变

钻石作为一种优异的材料，因其高热导性、硬度和化学稳定性而广泛应用于量子信息处理、纳米磁力计等领域。近年来，钻石中的缺陷中心，尤其是氮空位（NV）和硅空位（SiV）缺陷，因其长时间的自旋相干性和可调的光学特性，成为量子计算和量子传感器研究的热点。为了实现高精度的量子工程与控制，研究人员对这些缺陷-晶格相互作用的理解愈发深入，尤其是缺陷在激发后如何与晶格发生能量交换，以及其如何影响能量的弛豫速率。钻石的刚性碳-碳共价网络提供了非常高的热导性（ $2200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ），通常意味着当钻石中的原子级缺陷受到振动激发时，热量会迅速通过晶体传导，从而避免热能在缺陷周围堆积。然而，钻石独特的高热导性是否足以完全消除由缺陷引起的局部温度升高，尤其在极短时间尺度内，仍然是一个悬而未决的问题。基于这一问题，本研究探讨了钻石缺陷在超快时间尺度下的振动动力学，特别是与局部晶格振动模式（LVM）相关的热激发过程。

近日，来自沃里克大学的 James Lloyd-Hughes 教授课题组通过对钻石中的 $\text{Ns}:\text{H-C}_\text{o}$ 缺陷进行超快振动光谱学实验，揭示了钻石缺陷-晶格相互作用的新机制。该研究首次展示了钻石中的 $\text{Ns}:\text{H-C}_\text{o}$ 缺陷在超快时间尺度下如何引发局部声子的产生，并形成热激发的“热基态”（HGS）。这一发现令人惊讶地表明，尽管钻石具有异常高的热导性，局部产生的热声子却能在极短时间内扭曲晶格，并使得缺陷的势能面发生瞬时修改。研究团队详细描述了这一过程的物理机制。在超快激发后， $\text{Ns}:\text{H-C}_\text{o}$ 缺陷的伸展模式会通过局部声子的发射，导致缺陷周围的晶格发生局部的非平衡振动，这种振动可以通过形成 HGS 的方式扰动晶格结构。通过第一性原理计算和 Morse 势模型，课题组模拟了 C-H 键的伸展模式潜力，

并验证了实验结果与理论预测的一致性。此外，团队还进行了多维共振吸收光谱（2DIR）实验，发现热基态特征出现在 3329 cm^{-1} 的波数上，且该特征在激发后逐渐增强，表明晶格的局部热化效应持续存在。通过这些超快光谱实验，研究者揭示了热基态的形成及其在缺陷弛豫过程中的关键作用，挑战了传统上对钻石晶格弛豫过程的刚性假设。此外，课题组探讨了 HGS 的冷却过程，并通过温度依赖吸收实验发现，随着温度的升高， 3323 cm^{-1} 的特征发生蓝移，这表明更高的声子人口增强了 $n=0$ 和 $n=1$ 状态之间的能量差。结合这些实验数据，研究团队进一步推导出了一个三能级模型，并利用该模型精确模拟了缺陷的振动动力学，得到了与实验结果高度一致的弛豫时间常数。这一模型不仅有助于深入理解钻石缺陷的热化过程，还为量子信息学中的自旋-声子耦合提供了新的物理视角，特别是在氮空位和硅空位等缺陷的量子比特性能优化方面。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。（张琰炯）



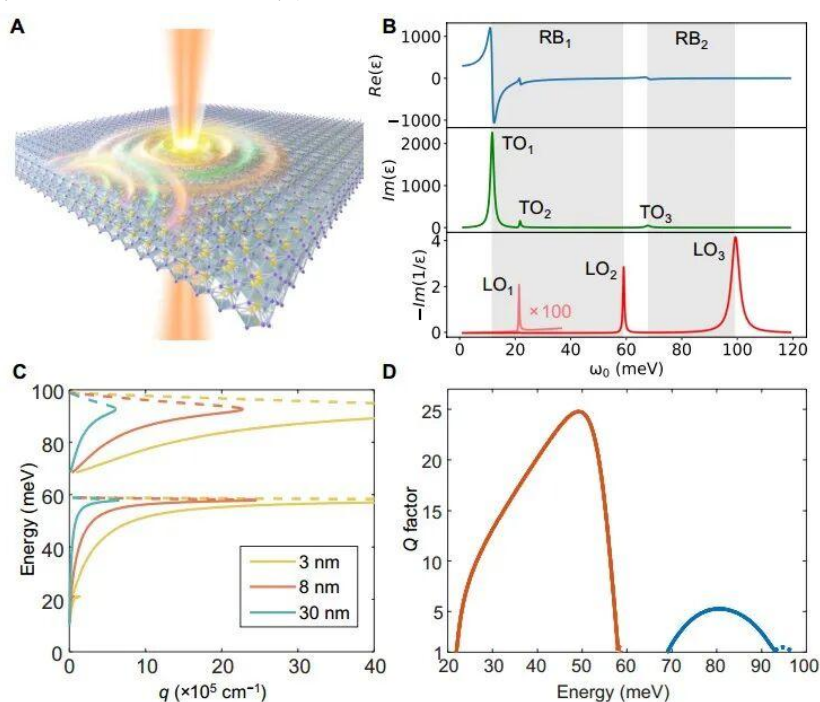
文章链接: <https://doi.org/10.1103/mvdf-bdrx>

5、 SrTiO_3 中强受限的中红外-太赫兹声子极化激元

随着纳米光子学和红外技术的快速发展，表面声子极化激元（PhP）因其能够实现在亚波长尺度上对光的调控，成为了现代红外传感、成像和光电子学领域中的重要研究方向。PhP 是由光子与极性材料中的光学声子强烈耦合而形成的混合光学模式，具有强烈的光-物质相互作用、超强的亚波长束缚、低损耗传播以及可调的色散关系，广泛应用于光学成像、数据存储、和协同热辐射等技术中。尽管如此，传统极性材料的 Reststrahlen 带相对狭窄，限制了其在宽光谱范围内的应用。因此，探索具有宽广光谱范围和高效光束约束特性的材料，成为了推动 PhP 应用发展的关键。然而，随着材料厚度的减小，如何维持 PhP 的优异性能并实现前所未有的光束约束和低群速度，是一个尚未解决的重要问题。钛酸钡（ SrTiO_3 ）作为一种典型的钙钛矿氧化物材料，其在极紫外到太赫兹（THz）范围内的广泛 Reststrahlen 带，使其成为研究宽光谱范围 PhP 的理想候选材料。由于其具有强大的 LO-TO 分裂效应， SrTiO_3 能够支持覆盖中红外（MIR）到太赫兹（THz）范围的 PhP。因此，钛酸钡薄膜作为 PhP 研究平台，具有广泛的应用

潜力，尤其是在超慢光、红外纳米光子学和增强光-物质相互作用等领域。然而，尽管理论上预期 SrTiO₃ 薄膜的 PhP 会在纳米尺度下展现出超强的约束能力和极低的群速度，但由于其强离子键和三维晶格结构，直到最近，这一现象才开始得到实验验证。因此，如何在纳米尺度下有效调控 SrTiO₃ 薄膜的 PhP 特性，尤其是在 THz 频段的性能，仍然是一个亟待解决的重要课题。

近日，北京大学高鹏教授课题组和清华大学于浦教授课题组合作，通过扫描透射电子显微镜中的电子能量损失谱（STEM-EELS）技术，成功实现了对超薄 SrTiO₃ 薄膜中 PhP 特性的精确测量。团队结合了电子能量损失谱（EELS）技术、第一性原理计算和薄膜样品的制备，揭示了 SrTiO₃ 薄膜中 MIR 到 THz 范围内的 PhP 的光学性能，尤其是其极高的光束约束能力和极低的群速度。实验结果表明，在 3 纳米厚度的 SrTiO₃ 膜中，PhP 的约束因子超过了 500，群速度低至 $7 \times 10^{-5} c$ ，这是迄今为止所记录的最高值，堪比最优秀的范德华材料。研究团队进一步分析了薄膜 PhP 的光学特性，发现在不同膜厚下，SrTiO₃ 薄膜展现出广泛的色散范围和超强的束缚特性。通过电子束激发，课题组观察到了 PhP 的两条分支，分别覆盖 MIR 和 THz 频段，并且其光学特性随着膜厚的减小而呈现出更加显著的超高约束性和极低的群速度。特别是在 3 纳米薄膜中，MIR-PhPs 和 THz-PhPs 的群速度都出现了显著的减缓，突破了传统材料的性能极限，为下一代光子学器件的设计提供了重要的实验依据。团队还通过理论模拟进一步验证了这些实验结果，计算显示，随着膜厚的减小，PhP 的色散关系逐渐变得平坦，群速度也进一步降低，这使得 SrTiO₃ 薄膜成为光学衍射极限的理想突破口。通过这项研究，课题组展示了 SrTiO₃ 薄膜在 MIR 到 THz 范围内极高的光束约束和超慢群速度，开创了超薄钙钛矿氧化物材料在纳米光子学和量子信息技术中的新应用。特别是，研究表明通过调节 SrTiO₃ 薄膜的厚度，可以实现对 PhP 传播速度和约束性的精准调控，为未来的高性能光子器件、光学存储和光-物质相互作用的增强提供了新的思路。这项研究不仅突破了 PhP 在 THz 频段的应用瓶颈，也为实现超高效的纳米光学器件奠定了基础。相关内容发表于《Science Advance》上。（张琰炯）

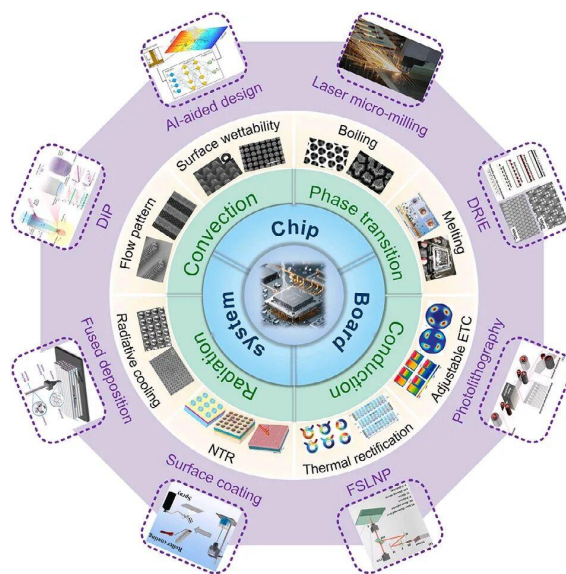


文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.ady7316>

6、突破传统散热—用于极端热流管理的先进微纳米结构

随着社会对计算能力需求的快速增长,电子设备在通信、个人终端及航空航天等领域的性能要求不断提高,高性能与高度集成带来了极高热流密度(可达 $500 - 1000 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$),使散热成为电子设计中的关键瓶颈。热管理旨在通过控制热产生、传导和散失,保障设备性能、可靠性与寿命,其研究涉及芯片级、板级与系统级三个层面。其中,芯片级面临局部热点与尺寸效应挑战;板级需通过 PCB 传导与对流扩散优化高功率器件布局;系统级则需通过结构设计与智能控制提升冷却效率,并保证在极端环境下稳定运行。传统散热如空气冷却受导热与热容量限制,难以满足高热流需求;水冷虽具更高能力,却依赖高流量,且相变材料存在寿命受限问题。因此,微/纳米结构成为突破散热瓶颈的重要方向。它们可通过定制化形貌提升导热、优化热流方向、改变流体流动以增强对流,甚至调控光学属性以提高热辐射散热,实现多尺度电子系统的高效与定向热管理。然而,当前研究仍缺乏对不同尺度下微/纳米结构调控热传递机制的系统综述,亟需针对目标性散热策略的深入研究与总结。

近日，山东大学郭春生教授与澳大利亚皇家墨尔本理工大学贾宝华院士团队合作，发表综述并系统探讨了多尺度下由微/纳米结构所实现的热传递机理，重点介绍了多种生物启发式或人工设计的结构，并指出其作为高效热学与流体力学超材料的重要潜力。文章阐述了新型微/纳米结构在电子散热中对耦合热传输过程的调控作用，包括对传导、对流及辐射等多种散热机制的协同增强。同时，对现有微/纳米结构的设计方法与制造工艺进行了对比分析，指出不同技术在应用中的优势与局限。此外，综述总结了未来微/纳米散热策略在材料、设计、可制造性及实际应用平台上的挑战，并展望其在高性能电子设备中实现可靠、可持续与精准热管理的广阔前景。这些研究表明微/纳米结构将在未来电子设备散热领域产生深远影响，并将有望突破传统冷却技术的瓶颈，为高功率器件提供针对性与高效散热解决方案。相关工作发表在《Advanced Materials》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202504706>

(来源：两江科技评论)