

超材料前沿研究一周精选



2026 年 1 月 5 日-2026 年 1 月 11 日

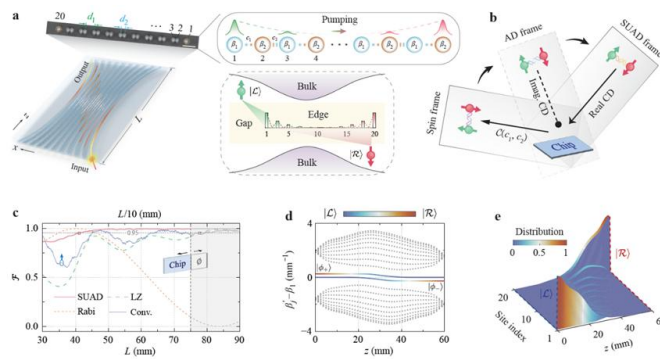
索引:

- 1、光子芯片上的超绝热拓扑泵浦
- 2、集成透明超声换能器和光纤扫描器的手持式光声显微成像探针
- 3、拓扑声学镊子实现稳健的质量输运
- 4、范德华阶梯中双曲声子极化激元的模式转换
- 5、纳米尺度表面声子的时间域极紫外漫散射光谱学研究
- 6、用于解码和设计无序超材料的自监督 AI

1、光子芯片上的超绝热拓扑泵浦

拓扑光子学利用拓扑不变性实现了对光传输的鲁棒调控，为集成光子学提供了新颖的操控机制。其中，动态拓扑泵浦通过参数调制实现可重构的光子输运，并具备固有的抗无序特性，为片上高效、宽带的光子导向提供了重要前景。然而，传统绝热拓扑泵浦的实际应用面临一个关键限制：其严格的绝热性要求需要较低的调制梯度，这从根本上制约了集成光子系统中器件的小型化与可扩展性。尽管已有多项策略试图突破这一限制，例如利用 Landau-Zener 跃迁、量子度量或绝热下界等方法加速态转换，但它们往往仍受限于绝热条件，或为追求速度而牺牲拓扑保护。此外，许多基于绝热捷径的理论方案依赖难以在实验上实现的次近邻或虚耦合，因此，设计出既快速又与平台原生控制参数完全兼容的捷径成为一项关键挑战。

近日，郑州大学的苏石磊副教授、吉林大学的田振男教授、清华大学的孙洪波院士联合研究团队发展了一种基于间隙模式的捷径策略，在光子芯片上通过迭代绝热变换实验演示了超绝热拓扑泵浦新范式。该方法将反绝热驱动融入间隙模式哈密顿量中，构建了仅需实数耦合参数且无需次近邻耦合的可行捷径，从而实现了光晶格中的高保真、超紧凑传输。实验上，利用飞秒激光直写波导阵列，研究展示了突破性的性能：与传统绝热泵浦相比，器件尺寸缩小了 20 倍；与优化的 Landau-Zener 方案以及近期报道的量子度量和绝热下界方案相比，紧凑性提升了约 50%。该工作通过消除对慢速绝热调制的依赖，证明了可通过理论设计与物理约束相结合来系统性地构建可行捷径，从而为具有可定制耦合架构的高密度拓扑光子学开辟了新道路，推动了光子集成的前沿发展。此项研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）

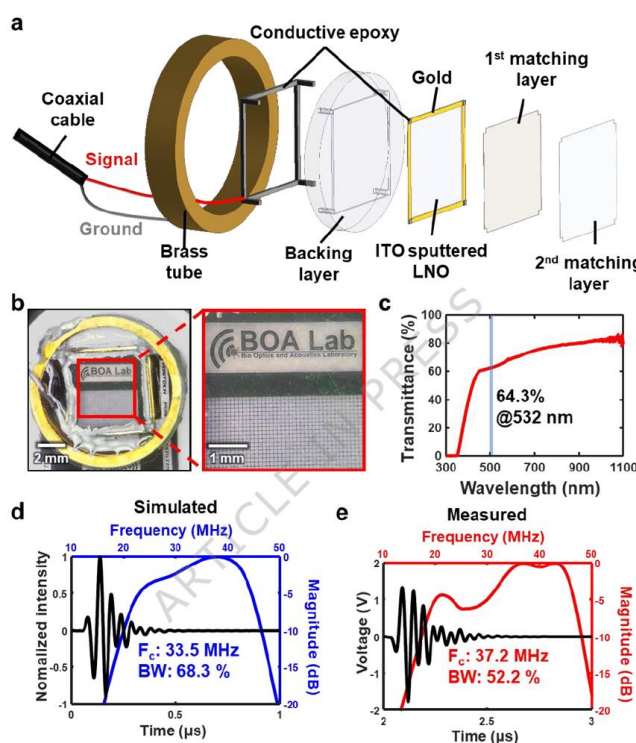


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67693-6>

2、集成透明超声换能器和光纤扫描器的手持式光声显微成像探针

光声成像 (PAI) 是一种融合光学与超声优势的生物学医学成像技术, 利用光声效应将吸收的光能转化为超声信号, 从而同时具备高光学对比度和突破光学扩散极限的深部成像能力。PAI 可对血红蛋白、黑色素、水和脂质等内源性发色团以及外源对比剂进行成像, 在基础研究与临床诊断中展现出广泛应用前景。其中, 光声显微成像 (PAM) 以其高速获取活体微米尺度三维图像的能力, 在血管成像、血氧监测及分子探测等方面具有独特优势。然而, 传统台式 PAM 系统在便携性与灵活性方面受限, 推动了手持式 PAM 的发展。现有手持方案在体积、成像速度与成像性能之间仍存在权衡, 尤其是光学扫描结构难以兼顾高频聚焦换能与系统稳定性。

近日, 浦项科技大学的 Chulhong Kim 教授团队, 展示了一种兼具微型化、高速成像与高性能的手持式光声显微探针 (hPAM-TUT)。该系统整体结构紧凑, 直径仅 17 mm、长度 90 mm, 通过引入高频透明超声换能器与光纤扫描器, 实现了光学与声学的高效协同。该探针可在 1.5 s 内完成一次三维体成像, 覆盖直径 2.6 mm 的视场范围, 并分别达到 7 μm 的横向分辨率和 47 μm 的轴向分辨率, 在便携性与成像精度之间取得良好平衡。其成像能力通过多种体内实验得到验证, 包括对大鼠腹腔暴露器官的高分辨三维成像、对小鼠耳部肾上腺素诱导血管收缩过程的实时监测, 以及对淋巴管内染料流动的动态观测。此外, 该系统还成功实现了小鼠转移性肿瘤血管结构的清晰成像, 显示出其在多种生物学医学成像与潜在临床应用中的广泛适用性。相关工作发表在《Nature Communications》上。(刘帅)

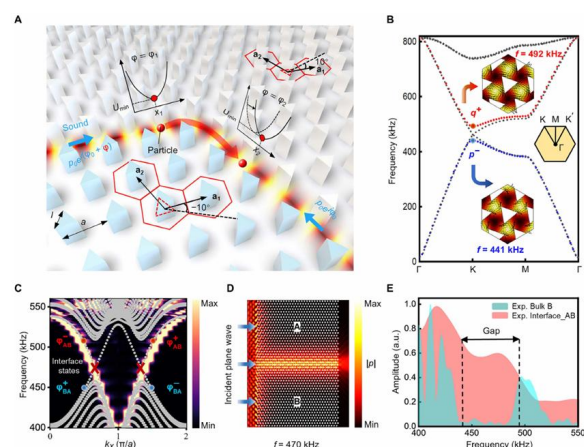


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-68148-8>

3、拓扑声学镊子实现稳健的质量输运

近十年来,结构化波场所产生的辐射力引起了广泛关注,并推动了声学镊子技术的快速发展。基于波散射及动量交换机制,声辐射力能够在声场中形成势阱,实现对微纳乃至宏观粒子的无接触稳定操控。在声学体系中,当粒子尺寸远小于声波波长时,其运动主要由声场梯度力主导。迄今为止,人们已利用驻波、涡旋波束及声学全息场,实现了粒子的悬浮、排列、旋转与输运,并在细胞分选、三维细胞培养及生物表型分析等生物医学领域展现出重要应用潜力。然而,传统驻波声学镊子在空间调控灵活性与复杂路径输运方面存在固有限制,且基于声子晶体的方案对结构缺陷和拐角高度敏感,鲁棒性不足。近年来,声学拓扑绝缘体为声波调控提供了新范式,其拓扑保护的界面态可在带隙内实现低散射传播,具备抗反射和缺陷免疫特性。基于拓扑声场的声学镊子因此能够形成空间局域、可设计且稳健的驻波场,为实现高精度、抗缺陷的定向质量输运提供了全新途径。

近日,中国科学院深圳先进技术研究院郑海荣院士、李飞研究员,联合华中科技大学祝雪丰教授,基于谷霍尔声学拓扑绝缘体实现了一种基于谷态驻波的动态拓扑声学镊子。该方法能够在空间局域的驻波声场中,实现粒子沿任意设计传播路径的高精度、空间选择性和稳健的定向输运。拓扑界面所支持的受限驻波场可将粒子稳定俘获于声压反节点处,通过精确调控入射声波的相位,实现反节点的连续位移,从而驱动粒子稳定迁移。实验结果表明,该拓扑声学镊子对尖角结构和缺陷腔体具有显著鲁棒性,并可实现路径选择性的粒子输运与循环操控。实验还直观展示了多种拓扑质量输运现象,粒子能够在含缺陷和弯曲的波导中实现快速、类弹道式传播。本工作揭示了动态拓扑声场中粒子操控的基本物理机制,为声学微流控及生物医学工程中的稳健无接触操控提供了新的技术路径。相关工作发表在《Science Advances》上。(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adz4301>

4、范德华阶梯中双曲声子极化激元的模式转换

在纳米尺度上操控光，一直是现代光学和材料物理的重要目标。随着二维范德华材料和超材料的发展，人们逐渐认识到，一类被称为“超声子极化子”的准粒子正在重塑光与物质相互作用的方式。超声子极化子是一种由红外光与晶格振动强耦合形成的混合激发，在具有各向异性介电响应的材料中，它们可以呈现出“超曲率”色散关系，使光在纳米尺度上以远超自由空间的动量传播。这一特性为超分辨成像、片上光学、电磁能量高度压缩与传输提供了新的物理基础。然而，超声子极化子并非只有一种模式，而是存在多个阶次的色散分支，不同阶次对应不同的传播动量和场分布形态。长期以来，实验中几乎只能稳定观测到最低阶模式，而更高阶的极化子虽然动量更高、潜力更大，却因传播距离极短、难以被激发和探测，始终像“沉默的资源”一样游离在应用之外。更关键的是，这些不同阶的极化子之间彼此几乎不发生转换，仿佛处在彼此隔绝的“语言体系”中，极大限制了人们对极化子自由度的整体利用。如何打破这种隔离，实现不同阶超声子极化子之间的耦合与转化，成为纳米光学领域一个长期悬而未决的核心问题。

围绕这一挑战，美国奥本大学材料系戴思远教授、休斯顿大学赵博教授提出并实验证实了一种全新的物理机制：通过人为设计的范德华“台阶结构”，实现不同阶超声子极化子的可控模态转换。研究团队在六方氮化硼和 α -MoO₃ 等典型超曲率材料中构建了具有不对称台阶边缘的薄层结构，并利用散射型近场红外显微镜在纳米尺度直接成像极化子的传播行为。实验发现在传统、对称的材料边缘，极化子在反射过程中始终保持原有模式阶次；而当极化子撞击台阶式的不对称边缘时，原本的低阶极化子会被强烈散射，并获得额外的横向动量，从而跨越色散分支，转化为更高阶的极化子模式。正是这种由几何不对称性引入的强散射过程，打破了原有的动量守恒限制，成为连接不同极化子模式的“物理桥梁”。这一模态转换过程在近场图像中表现为叠加在长周期干涉条纹之上的短周期振荡信号，其空间频率与理论计算的高阶极化子动量完全一致，构成了对物理机制的直接实验证据。进一步结合电磁场数值模拟，研究团队从对称性角度揭示了这一现象的本质：对称边界会严格保持极化子模式的奇偶性，而不对称台阶边界则允许不同对称性的模式发生耦合，从而实现跨阶转换。更有意义的是，这种模态转换并非不可控的偶然效应，而是可以通过调节台阶高度比例进行连续调制，使特定阶次的转换效率达到最优。此项研究成果发表于《Nature Communications》。（张

a Dispersion curves of the SiO₂ waveguide for different mode orders $l=0, 1, 2$. The y-axis is angular frequency ω (cm⁻¹) and the x-axis is wave vector k_z (μm^{-1}). A red arrow indicates the mode conversion process.

b Schematic of the hBN waveguide. The waveguide is made of hBN (blue) and is surrounded by SiO₂ (grey). A scale bar of 20 μm is shown.

c Cross-sectional view of the device. The SiO₂ waveguide has a width of 51 nm. The hBN waveguide has a width of 34 nm. The gap between them is 17 nm.

d Experimental results showing the mode conversion process. The color map shows the intensity of the light. The SiO₂ waveguide has a width of 51 nm. The hBN waveguide has a width of 34 nm. The gap between them is 17 nm. A scale bar of 2 μm is shown. The frequency is $\omega = 1407 \text{ cm}^{-1}$.

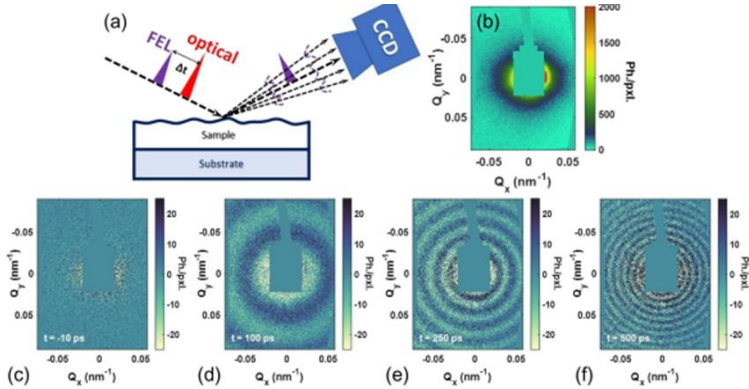
e Schematic of the mode conversion process. The light enters the SiO₂ waveguide and is converted into the hBN waveguide. The process is labeled "Mode conversion" and "Step".

f Cross-sectional view of the device. The SiO₂ waveguide has a width of 12 nm. The hBN waveguide has a width of 17 nm. The gap between them is 17 nm.

5、纳米尺度表面声子的时间域极紫外漫散射光谱学研究

围绕上述关键问题，来自意大利 Elettra Sincrotrone Trieste 的 F. Capotondi 和麻省理工的 A. A. Maznev 研究员，系统开展了基于自由电子激光的超快极紫外漫散射实验研究，首次发现并阐明了一种全新的时间域极紫外漫散射谱学方法，用于在未图案化表面上激发和探测纳米尺度表面声子。研究中，团队利用飞秒光学脉冲对样品进行均匀激发，随后用飞秒极紫外自由电子激光作为探测光，记录样品表面漫散射强度随时间的演化。实验发现在光激发后，极紫外漫散射图样中会出现随时间演化的同心环状干涉条纹。进一步分析表明，在探测器上的每一个散射波矢位置，漫散射强度都以确定的频率发生振荡，该频率严格对应于具有相同波矢的表面声子模式。这一现象直接表明，飞秒光激发在样品表面同时产生了覆盖各个传播方向、波长范围可达约 60 - 300 纳米的相干表面声子。通过对金属多层薄膜、单层金属膜以及体半导体（如 GaAs）等多种体系的系统测量，研究团队发现该现象具有高度的普适性，实验获得的表面声子色散关系与理论计算

的 Rayleigh 模式高度一致。研究从物理机制层面揭示了这一纳米尺度表面声子激发的根源：样品不可避免存在的天然表面粗糙度。团队提出并论证了这样一个物理图像——飞秒光激发在材料内部产生纵向声波，当声波传播至粗糙表面并发生反射时，会被散射并转化为具有高波矢分量的表面声子；与此同时，极紫外探测光在表面粗糙度和表面声子调制下产生相位锁定的散射干涉，从而在动量空间中形成清晰可解析的干涉条纹。理论分析表明，漫散射信号的时间调制项源于“静态表面粗糙度散射场”与“声子调制散射场”之间的干涉，这不仅自然解释了实验中观察到的线性激发强度依赖关系，也揭示了该方法对极小表面位移（声子振幅仅为表面粗糙度的百分之一量级）仍具备极高灵敏度。此项研究成果发表于《Physical Review Letters》。（张琰炯）



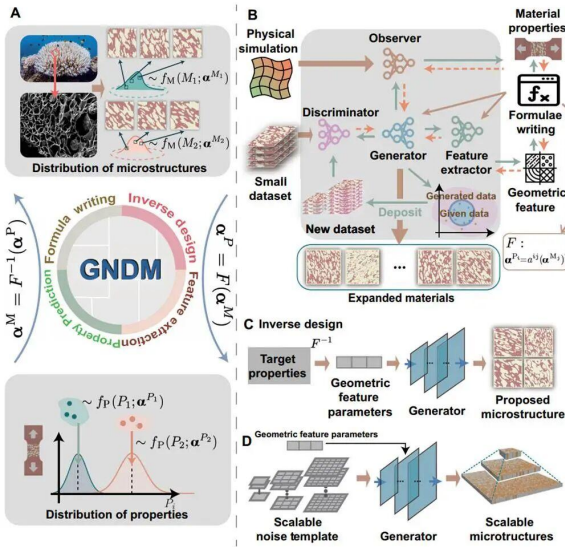
文章链接：<https://doi.org/10.1103/dq8w-62bm>

6、用于解码和设计无序超材料的自监督 AI

无序微结构是许多自然材料具备独特多功能性质的关键，如木材、海绵骨骼、龟壳、珊瑚与人体骨骼等，其微观结构的无序性、非均匀性与非周期性往往与优异的力学性能相关联。然而，理解这类无序微结构的几何特征与宏观物理性质之间的内在联系一直是材料科学领域的重大挑战，传统几何描述方法难以有效刻画无序特征，这严重制约了相应人工超材料的设计与应用。尽管增材制造等技术已能实现精细结构制备，当前人工超材料多数仍局限于有序周期性设计，与自然界广泛存在的无序高性能材料形成鲜明对比。引入可控无序性有望带来如缺陷容错、应力调制、负泊松比调控等新颖性能，因此发展能够解析并设计无序超材料的方法具有重要意义。近年来人工智能的迅速发展，特别是深度生成模型在逼近高维概率分布方面的优势，为从数据中学习无序材料的结构-性能关联提供了新的途径。

近日，北京大学的毛晟助理教授、刘珂助理教授研究团队，提出了一种物理引导、自监督的人工智能框架——生成网络用于无序超材料（GNDM），旨在从少量初始样本出发，通过渐进扩展数据集，学习无序超材料的构效关系并实现逆向设计。该框架包含生成器、判别器、特征提取器和观测器四个神经网络模块，并集成了物理仿真工具与现象学公式书写模块，通过最大化潜在编码与生成分布之间的互信息，以自监督方式解耦出与性能最相关的几何不变量。借助提出的“沉积-再训练”策略，这种方法能够有效拓展材料性能空间，超越初始数据集的范围。实验验证表明，该方法在二维与三维无序双相超材料设计中成功预测并生成了具有目标杨氏模量、比表面积与各向异性取向的微结构，其 3D 打印样品的实测性能

与设计目标吻合良好，证实了该框架在揭示无序性调控规律与实现功能定制方面的有效性。该研究成果发表于《Science Advances》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adx7389>
(来源: 两江科技评论)