

超材料前沿研究一周精选



2025 年 10 月 19 日-2025 年 10 月 26 日

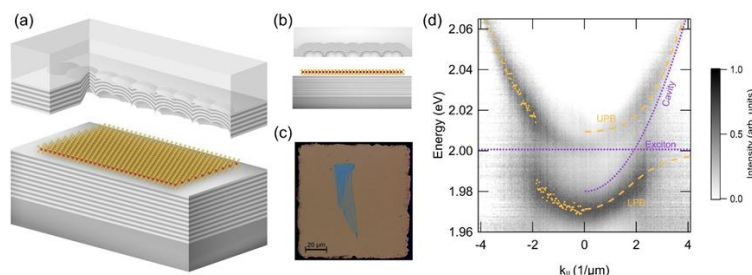
索引:

- 1、光子晶格中基于二维晶体的拓扑可调极化激元
- 2、用于光检测、引导和调制的多功能范德华 PdSe₂
- 3、周期性时空界面中的二维拓扑边缘态
- 4、近场辐射传热向极端近场辐射传热的转变
- 5、基于声学透明可编程超构材料的可重构动态声学全息
- 6、多稳态薄壳超结构用于多响应可重构仿生机器人

1、光子晶格中基于二维晶体的拓扑可调极化激元

近年来，结构化的光学微腔已成为研究晶格哈密顿量，尤其是拓扑现象的重要平台。激子极化激元作为光与物质强耦合作用的准粒子，不仅在基础光物态研究中占据关键地位，更在拓扑光子学领域展现出巨大潜力，例如在拓扑极化激元激光、自旋-动量锁定及光开关等方面取得了显著进展。其中，原子级厚度的过渡金属硫族化合物单层材料因其激子具有巨大的光-物质相互作用强度和较高的结合能，使得在室温下观测激子极化激元成为可能，极大地促进了相关研究。然而，尽管技术在可调谐光学微腔方面取得了显著进步，当前大多数关于拓扑光子或极化激元模式的研究仍基于单片式腔体结构，这使得对拓扑模式的原位重构调控以及对模拟晶格势场的实质性修改，在实验上依然面临巨大挑战。

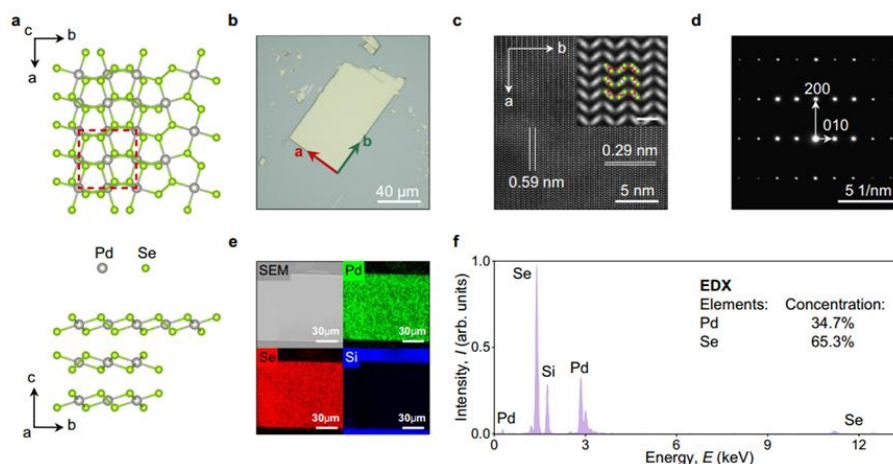
近日，德国奥尔登堡大学的 Christian Schneider 教授研究团队通过构建一个室温工作的极化激元系统，成功克服了上述局限。该系统基于一个高度可调的开放式光学微腔，腔内集成有 WS₂ 单层以提供激子共振。通过聚焦镱离子束在顶部反射镜基板上刻蚀出一维链状球形凹坑阵列，并采用交错排列方式，在光学位势上实现了 SSH 模型。该系统在两个拓扑相之间形成了畴边界，并观测到与之相关的指数局域拓扑缺陷态，该模式的光谱调谐范围超过 80 meV。研究进一步利用腔体的倾斜可调性，将 SSH 晶格转换为 Stark 阶梯，不仅改变了系统对称性，还由此直接实验测得了两个拓扑相之间的 Zak 相位差。这项成果标志着在实现原位可调拓扑晶格方面迈出了关键一步，其展现出的室温大范围光谱调谐能力、拓扑保护特性以及引入额外势场梯度的灵活性，为开发功能增强的新型拓扑器件开辟了新的途径，同时也为在非线性区域进一步研究拓扑系统提供了强有力的实验工具。该研究成果发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/qph1-qd37>

2、用于光检测、引导和调制的多功能范德华 PdSe₂

传统的光电系统往往需要将金属、电介质与半导体等多种材料集成于同一芯片中：金属负责电信号传导，半导体实现光电转换，而电介质承担波导传输或绝缘功能。然而，多种材料的复杂整合不仅增加了制造成本与能耗，也限制了器件微缩化与性能提升的潜力。科研界因此长期追求一种“单一材料多功能化（multifunctional material platform）”的突破——理想的材料应能同时兼具导电、导光与光敏等性质，实现从信号传输到光学调制的全谱覆盖。近年来，范德华（van der Waals, vdW）层状材料在这一领域展现出巨大潜力。然而，大多数材料仍然在电子或光学性能上“偏科”：金属性材料光损耗过大，不适合光波导；而半导体材料虽可用于光探测，却难以实现高频电子传导。如何在单一材料体系内兼具金属、电介质与半导体特征，成为当前光电材料研究的前沿挑战。近期，来自阿联酋新兴技术研究中心的 Valentyn Volkov 教授团队，联合英国曼彻斯特大学、诺贝尔物理学奖得主 Kostya S. Novoselov 院士，首次系统揭示了 PdSe₂ 在 250 - 17000 nm 超宽光谱范围内的光电响应，证明其可在不同波段实现光探测、光导与光调制三重功能，为多功能集成光电平台提供了新的材料范式。团队通过偏振拉曼、椭圆偏振和近场光学测量，结合第一性原理计算，全面刻画了 PdSe₂ 的频谱响应特性。结果显示：在紫外至近红外区（< 1.5 μm），PdSe₂ 表现为强吸收型半导体，具有高消光系数；在近红外至中红外区（1.5 - 8 μm），其折射率高而光损低，展现出理想的电介质特征，可实现高效光波导；而在中红外以上波段（> 8 μm），其光学行为转为金属态，由自由载流子主导吸收，可用于热成像和红外探测。理论计算进一步证实，PdSe₂ 为间接半金属，其导带与价带极值错位，使得直接光学跃迁受抑，从而在不同波段呈现出可控的金属-介质-半导体转变。在此基础上，研究团队分别演示了三种 PdSe₂ 器件原型：中红外光探测器：利用 PdSe₂ 的金属性吸收实现波长超 8 μm 的室温红外探测，噪声当量功率（NEP）达 8 nW Hz^{-1/2}，已接近商业无冷却探测器水平；高折射率光波导：基于 255 nm 厚 PdSe₂ 薄膜实现近红外波导传输，模式传播长度达 4 mm，较硅波导具 25% 更高的集成密度；光热转换纳米球：通过飞秒激光烧蚀制备 PdSe₂ 纳米颗粒，其光热转换效率优于传统金纳米颗粒与 MoS₂，在 NIR-I 生物治疗窗口（700 - 980 nm）表现出显著的温升效应，展现出医学光热治疗的应用潜力。这项研究表明，PdSe₂ 能在同一晶体体系中实现金属导电、电介质导光与半导体吸光的跨界功能转换，为光电集成系统提供了“单材料多任务”的解决方案。相关内容发表在《Nature Communications》（张琰炯）。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64247-8>

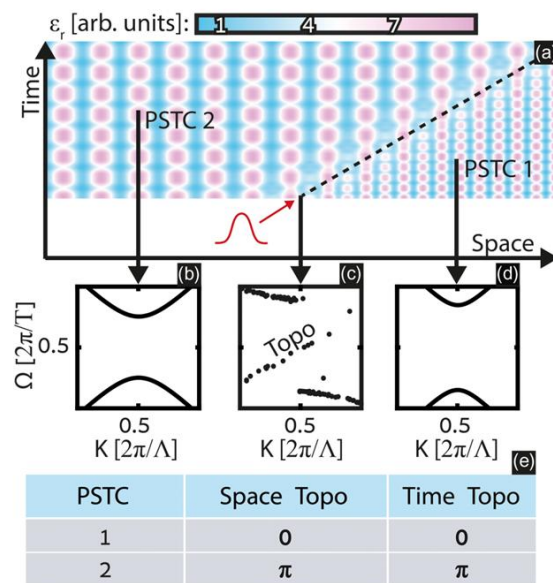
3、周期性时空界面中的二维拓扑边缘态

拓扑保护的边界态能够实现无散射的波动传输，并对缺陷和无序保持稳健性。此类现象通常出现在二维或更高维系统中。在光子体系中，研究者已通过精心设计的结构平台实现了拓扑边界态及其稳健传播，为拓扑绝缘体激光器、拓扑量子光源以及拓扑纠缠保护等应用奠定了基础。近年来，拓扑概念被扩展至时间维度。在一维时间变化系统中，人们发现了光子时间晶体——一种折射率随时间周期性调制的均匀介质。这种强烈的时间调制会引发时间反射与时间折射，两者的干涉在动量空间中形成动量带隙。带隙中的电磁模态可表现为指数增长或衰减，即在传播中从调制中汲取或向调制中释放能量。这一现象已在射频与微波实验中得到验证。由于其非共振放大特性，动量带隙内的模态被认为可用作新型光辐射源或非共振放大机制，无需原子共振或粒子反转。

理论上已在光子时间晶体中预测到拓扑相，并在合成维系统中获得了实验验证。然而，由于时间仅为一维，因此 PTC 中的拓扑边界态在本质上是零维，无法支持沿系统边界的拓扑保护传输。这一限制引出了一个核心问题：能否在系统中引入一个周期性的空间维度，从而构建空间-时间光子晶体，实现一个在二维(1D 空间 + 1D 时间)中展现拓扑保护边缘传输的体系？

近日，以色列理工学院 Mordechai Segev 教授团队首展示了光子时空晶体 (PSTCs) 中的拓扑相与拓扑界面，并发现了能够沿时空界面稳健传播的拓扑边界态。通过在介质中同时引入空间与时间的周期性介电常数调制，设计出具有非平凡拓扑性质的 PSTC 体系。该系统表现出混合的频率-动量带隙结构，其拓扑性质由四个拓扑不变量共同决定。理论与数值模拟均证实了这些不变量预测的时空拓扑边界态的存在。更为重要的是，研究发现了一类独特的时空拓扑边界态：其在沿时空界面传播的过程中振幅会指数增长，可持续从时空调制中汲取能量，展现出“放大型拓扑模式”的特征。这一发现不仅拓展了拓扑光子学的维度边界，也为光的时空操控、能量转换与非共振放大提供了新的物理途径，预计将在未来多个光学与波动学领域产生深远影响。

相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/5hf5-pg3t>

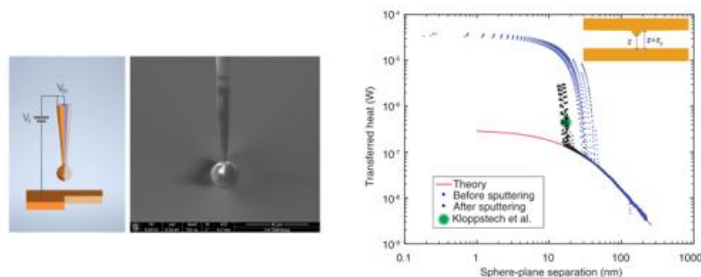
4、近场辐射传热向极端近场辐射传热的转变

在宏观世界中，热的传播主要通过三种途径：传导、对流与辐射。人们熟知的 Stefan-Boltzmann 揭示了黑体辐射功率随温度的四次方增长规律，但这一“普适定律”在纳米尺度上悄然失效。当两个物体的间距缩小至比热辐射波长（约 $10\ \mu\text{m}$ ）更小的尺度时，辐射热流将远超黑体极限，这一现象被称为近场辐射热传递（near-field radiative heat transfer, NFRHT）。其核心机制在于表面电磁波（如表面等离激元与表面声子极化子）的倏逝场耦合，使能量通过真空“隧穿”传播。过去二十年，随着纳米加工与精密测量技术的突破，人们已在数十纳米的距离内多次证实理论预言——热辐射可增强数百至上千倍。然而，当间距进一步缩小至 $10\ \text{nm}$ 以下的极端近场（extreme near-field），经典的涨落电动力学（fluctuational electrodynamics, FED）理论却遭遇挑战：实验结果开始出现显著分歧，有的与理论符合良好，有的却显示出比理论值高出几个数量级的热流。究竟在这一“辐射与导热的交界区”，能量传递机制发生了怎样的演化？电子波函数的重叠、声子隧穿，还是未知的量子耦合过程在起作用？这成为纳米热科学领域最前沿且最具争议的科学问题之一。

为回答这一关键问题，德国卡尔·冯·奥西茨基大学（Carl-von-Ossietzky University Oldenburg）A. Kittel 教授与 S.-A. Biehs 教授团队首次系统报道了从近场向极近场过渡的辐射热传递实验观测。他们基于近场扫描热显微镜（Near-field Scanning Thermal Microscope, NSThM），在超高真空条件下构建了金镀层球-金平面体系，通过在探针前端粘附直径 $20\ \mu\text{m}$ 的二氧化硅球并整体镀金，有效拓宽了可测量的间距范围（可达 $250\ \text{nm}$ ），同时保持亚纳米级的接触定位精度。研究者通过施加隧穿电压精确定义零距离点，并在逐步接近过程中实时记录热电电压信号，以此推算球-面间的辐射热流。结果显示：当间距大于 $30\ \text{nm}$ 时，实验数据与 FED 理论完全一致；而当间距小于 $18\ \text{nm}$ 时，热流出现急剧上升，最大值比理论预期高出约两个数量级。更为关键的是，即便经过原位氩离子溅射清洁以去除所有可能的分子桥与表面污染，这种增强依然存在，排

除了分子导热或金-金接触传热的可能性。研究团队进一步分析了隧穿电流与热流随距离的同步变化,发现电子导通电流与热传递增强在尺度上并不同步,这暗示传统的电子或声子隧穿模型仍难以解释观测结果。该成果不仅提供了近场与极近场辐射热传递之间“连续跨越”实验证据,也揭示了现有涨落电动力学理论在纳米尺度下的局限性,为未来建立包含量子隧穿、电子波函数重叠以及界面局域模态贡献的统一理论框架提供了重要基准。论文指出,这一研究验证了经典理论在数十纳米尺度的可靠性,同时明确标识出其失效边界——当真空间隙小于约 20 nm 时,能量传递机制显然不再仅由宏观涨落场主导。

相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



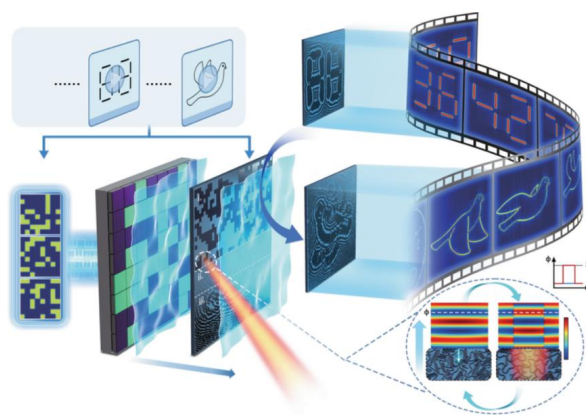
文章链接: <https://doi.org/10.1103/lcz1-f5v9>

5、基于声学透明可编程超构材料的可重构动态声学全息

超声波能够穿透多种材料,实现远程高能量传递,其在声镊、声动力治疗及神经刺激等领域具有广阔应用前景。然而,实现高分辨率、动态可控的声场调制仍面临重大挑战。目前的声学超构材料通常通过结构或复合设计调节介质的有效密度或模量,但动态改变结构或组分难度大,且不同相界面引起的强反射导致能量衰减严重。传统超声相控阵虽可实现动态控制,但设备笨重,空间分辨率不足 10 像素/ cm^2 ;而 3D 打印的声全息虽具高分辨率,却仅能产生静态声场。已有基于机械、磁场或微泡的动态调制方法,但受限于单元尺寸与刷新速率,难以兼顾高分辨与高能传输。相比幅度调制,基于相位调制的声全息具有无能量损耗优势。若能利用可逆调控模量的聚合物实现相位型声全息,并保持高声透过率,将为构建可重构动态声场提供全新思路。

近日,浙江大学的赵骞教授、陈剑研究员、谢涛教授课题组合作,提出一种基于半结晶聚合物的可重构动态声学全息方法。该材料能够通过激光辅助的模量图案化过程,实现任意声学相位分布的可逆编码。与传统复合型超构材料不同,该聚合物在保持无定形与结晶相共存的同时,仍具备超过 83% 的高声学透过率,兼具可编程性与低损耗特性。研究团队将其与分区压电换能器(PZT)集成,构建出一种高分辨率、快速响应的声场调控系统,空间调制分辨率达 10,000 像素/ cm^2 ,刷新速率高达 50,000 帧/秒。该系统可实现对声场的实时动态重构,能够生成“声学电影”等多帧连续声场分布,展现出在声学成像、粒子操控、能量传递与医疗治疗等领域的巨大应用潜力。

相关工作发表在《Nature Communications》上。(刘帅)



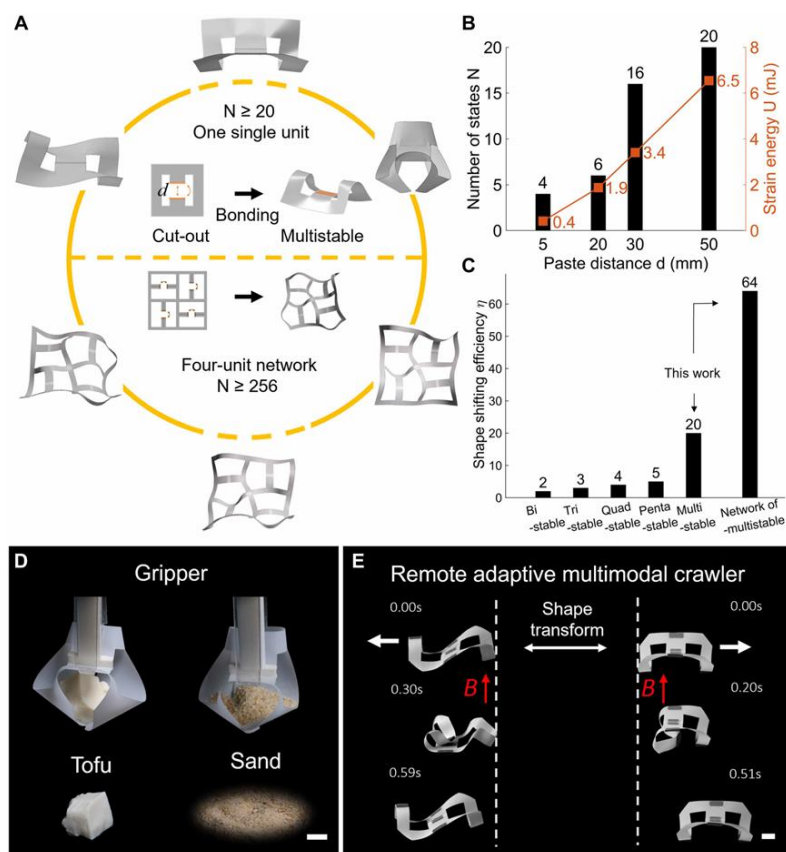
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64154-y>

6、多稳态薄壳超结构用于多响应可重构仿生机器人

可响应外界刺激并实现形状变换的材料具备高度环境适应性,在柔性力学超材料、可重构软体机器人、自适应医疗装置及空间探索等领域具有广泛应用。实现形变的策略主要包括基于刚性旋转的机械机构和基于柔性结构的弹性变形。相比刚性系统,柔性结构可实现连续可控的弯曲、拉伸与扭转形态,并利用软性活性材料实现自适应形变。双稳态与多稳态结构(如捕蝇草与折纸结构)因能在多个稳定状态间快速、可逆切换而被广泛研究,其通过储存弹性能在无持续驱动下保持形态。当前多稳态超结构已应用于高效抓取、跳跃与游动等,但其在多模式、地形自适应运动方面的潜力尚未充分挖掘。受限于结构复杂度与驱动控制难度,形变效率普遍较低。理想策略是提升单元结构的稳定状态数量,以提高形变效率并简化驱动,实现高适应性、多功能的可重构软体机器人平台。

近日,北卡罗来纳州州立大学的尹杰课题组,提出了一类具有高形变效率的可展多稳态薄壳超构结构,并实现其向自适应多响应软体机器人的转化。该结构通过在平面薄膜上切割“H”形开口并粘合端部,预存可编程弹性应变能,从而在单元层面实现多达 20 个稳定状态,在四单元网络中可形成 256 种构型。为揭示其形态转变机理,提出了基于离散可展面理论的“动态虚折线”概念,用以描述由局部弯曲主曲率驱动的形态演化。薄壳设计便于与有线(如压电)或无线(如磁致)多响应驱动方式集成,从而实现柔性、可编程的形态变换。该结构凭借丰富的稳定状态与高形变效率,大幅简化了驱动与控制,实现多样化的形态调制。依托远程可控的形态转换,本研究进一步展示了其在多模态运动及非结构化环境下自适应导航中的潜在应用,为构建高性能、可重构的软体机器人平台提供了新途径。

相关工作发表在《Science Advances》上。(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adx4359>
 (来源: 两江科技评论)