

超材料前沿研究一周精选



2025 年 9 月 1 日-2025 年 9 月 7 日

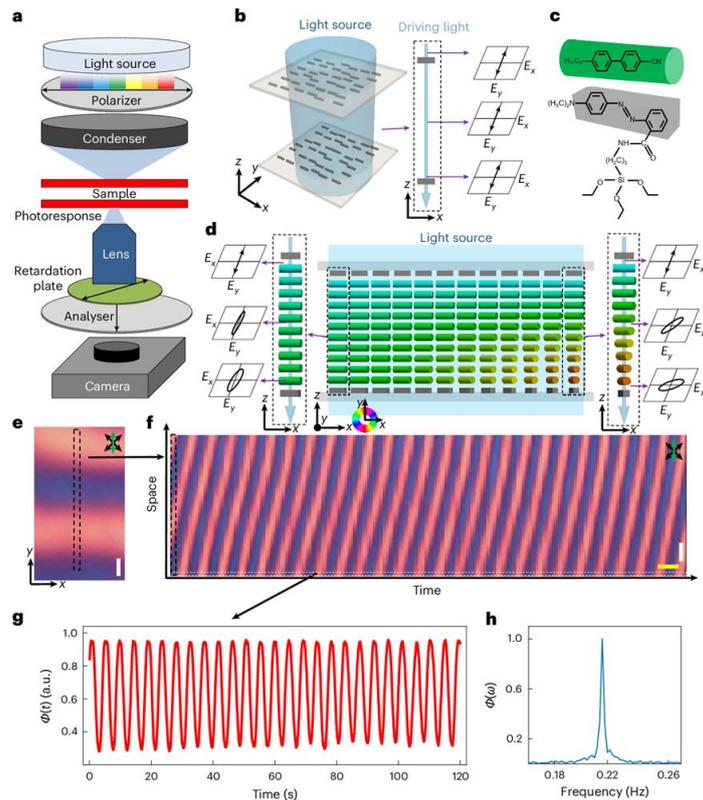
索引:

- 1、拓扑孤子构成的时空晶体
- 2、基于非线性 Pancharatnam - Berry 元件选择性激发的光子太赫兹相控阵
- 3、深度学习驱动的超宽带太赫兹高维光探测器
- 4、一种可重构压电-离子型聚合物膜用于可持续的多共振声学传感
- 5、具有内在应变的褶皱单层 WSe₂ 中异常声子软化现象
- 6、拓扑荷可调的 GHz 声光角动量 MXene
- 7、驱动的太赫兹超材料作为实时生物传感平台用于体内血栓监测
- 8、扩散型热超材料中高衰减率拓扑角态的观测

1、拓扑孤子构成的时空晶体

时间晶体是一类特殊的物质状态，它们能够自发打破时间平移对称性。自 Wilczek 提出这一概念以来，研究者已在核自旋、冷原子等量子体系中观测到离散和连续时间晶体。然而，在中尺度上能够同时打破空间与时间对称性的“时空晶体”迄今尚未被报道。

近日，科罗拉多大学博尔德分校 Ivan I. Smalyukh 教授团队报道了一种基于液晶体系的连续时空晶体。他们在具有光响应染料包覆的向列液晶薄膜中，仅利用常规光照，就观测到由拓扑孤子自发排列形成的时空周期结构。这些孤子具有 ± 1 的拓扑荷，可视为准粒子，在相互作用下构筑出稳定的时空晶格。实验与数值模拟均表明，该体系满足时间晶体的严格判定条件：时间对称性自发破缺、对时空扰动具有鲁棒性，并展现出准长程时间有序。研究进一步揭示了外界光强与温度可对时空晶体的周期性进行调控，同时还能通过叠加形成多种时空点阵。凭借其独特的时空有序性与光学响应特性，该类液晶时空晶体有望应用于光学器件、光子时空晶体产生、通信以及防伪设计等领域。相关研究发表于《Nature Materials》。（刘磊）

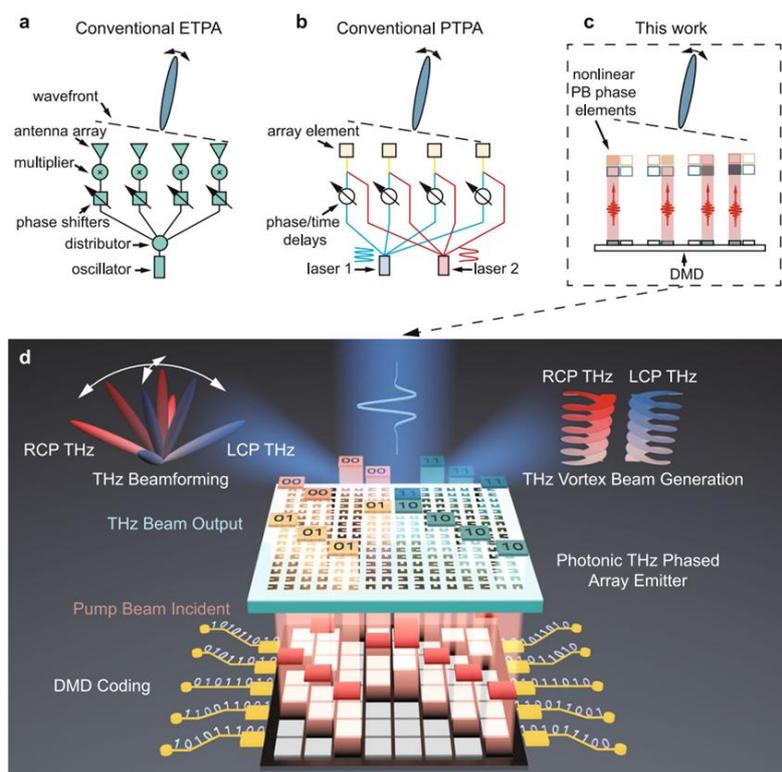


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-025-02344-1>

2、基于非线性 Pancharatnam - Berry 元件选择性激发的光子太赫兹相控阵

相控阵由多个天线组成，可以动态操纵电磁波的辐射方向，通常通过在各个天线信号路径中引入时间变化或相位延迟来实现，从而补偿自由空间中的路径差异。其多样性和高效性使其广泛应用于雷达、通信和天文学等领域。相控阵的研究最早起源于射频技术。随着微波和毫米波的发展，相控阵技术不断演进。近年来，毫米波和太赫兹（THz）频段的通信技术因具备更大的带宽、更好的方向性和更高的分辨率而受到关注。为了在高频段，尤其是 THz 频段提升无线通信性能，更强大的相控阵架构成为关键需求。当前的 THz 相控阵主要有两类：电子型（ETPA）和光子型（PTPA）。ETPA 通常由振荡器、移相器和倍频器构成，能够实现高功率和灵活波束控制，但在频率超过 1 THz 时面临损耗大、干扰强、相位精度不足以及复杂工艺和热管理等问题。PTPA 则利用光学差频实现 THz 产生和调控，支持高频率和可调操作，但其依赖延迟线和移相器，结构复杂、成本高，尤其在二维阵列中更具挑战。另一种思路是将 THz 源与可编程线性超表面结合，通过 VO_2 、石墨烯、液晶等主动相位元件实现波束调控。然而，这类方法往往受限于带宽、相位分辨率和插入损耗，且控制系统复杂。近年来，非线性超表面被证明是控制 THz 波前的有前景方案。它们利用非线性 Pancharatnam - Berry (PB) 相位实现宽带调控，已被应用于全息成像、偏振调控和环状波束产生。但要实现相控阵功能，还需额外的动态相位控制机制。近日，天津大学韩家广、张学迁教授联合纽约城市大学 Andrea Alù 教授、俄克

拉荷马州立大学张伟力教授，提出了一种基于非线性超表面的可编程宽带 PTPA 方法。该方法利用数字微镜器件(DMD)，在二维空间选择性激活特定 PB 元件，从而实现可定制的 THz 波前产生。与传统 ETPA 和 PTPA 不同，这种方法的相位调控在 THz 产生过程中自然发生，无需额外移相器和同步校准，大大简化了设计和控制流程。通过概念验证实验，研究团队展示了带宽达 0.6 THz 的宽带 THz 产生，并实现了单波束、双波束成形、成像和涡旋波束等功能，凸显了该方法在未来 THz 应用中的广阔前景。相关内容发表于《Nature Communications》。(金梦成)

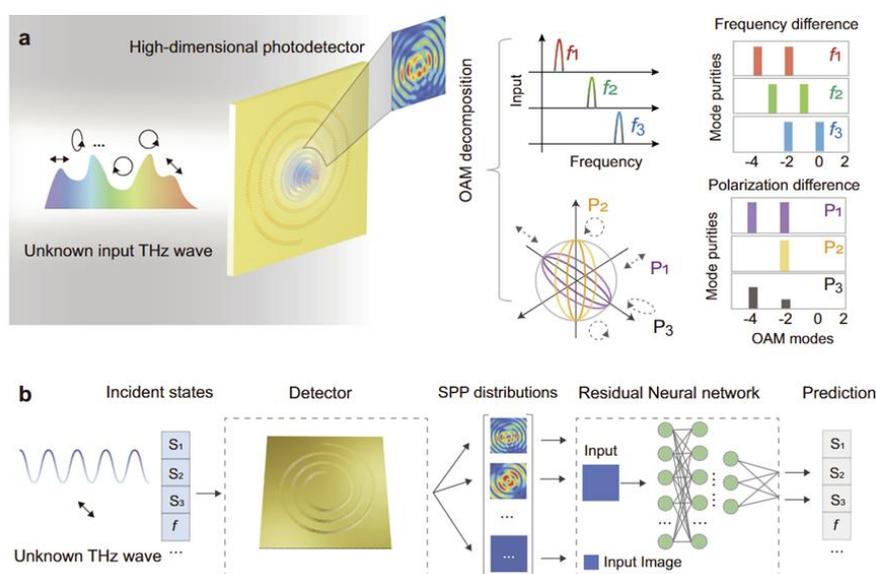


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63127-5>

3、深度学习驱动的超宽带太赫兹高维光探测器

光场的强度、相位、波长与偏振是其固有特征，同时获取这些多维信息对理解信号及推动光学计算、通信、生物医学和遥感等应用至关重要。然而现有光探测器大多局限于二维，要么在固定波长下测量强度与偏振，要么在统一偏振下测量强度与波长，其他维度信息被牺牲。多探测器协作虽可提取更多信息，但体积庞大、效率低，难以实用。在单一微型化器件中实现三维及以上探测仍具挑战。近年来，石墨烯器件实现了在特定波长下的全 Stokes 参数测量或偏振分辨，但受固有色散限制，无法扩展至宽频；其他二维材料平台亦存在类似局限。相比之下，人工超表面因可灵活操控光子属性，展现出独特优势。近期，全硅超表面实现了跨多个波长和偏振的高效探测，显著拓展了高维能力，但仍未覆盖完整的偏振-波长连续体系。现实中光场常携带任意偏振和强度的宽频变化，因此亟需发展一种能够在三维甚至四维参数空间内精确表征任意光场的新型光探测器。近日，上海理工大学的臧小飞教授、北京大学方哲宇教授、夏明耀教授团队，提

出了一种智能超表面辅助的太赫兹光探测器，可同时表征宽带光(0.3 - 1.1 THz)的偏振、强度、相位和频率，其频率预测精度可达 25 GHz 以内。通过合理设计 Pancharatnam - Berry (PB) 相位与传输相位，超表面实现了频率依赖的传输相位响应与自旋依赖的几何相位响应的解耦。这一设计能够产生宽带涡旋，其中轨道角动量 (OAM) 模态的拓扑荷与组成系数分别与频率和偏振呈线性关系，从而实现光谱与偏振信息的唯一映射。进一步地，引入残差神经网络 (ResNet) 以实现高精度、稳健且连续的探测，其平均预测误差仅为偏振 2.8%、频率 4.3%。与现有无法覆盖完整偏振 - 频率空间的光探测器相比，该微型化超表面器件是真正意义上的三维光探测器，能够在 0.3 - 1.1 THz 的连续范围内覆盖整个 Stokes 球，且无需任何机械运动部件或体积庞大的偏振/波长光学器件。该原理还可通过简单的尺寸缩放扩展至从微波到可见光的波段。此外，作者进一步展示了其在信息加密传输方面的应用潜力，为发展超紧凑的多维光探测器与信息处理器提供了新的途径。相关工作发表在《Nature Communications》上。(刘帅)



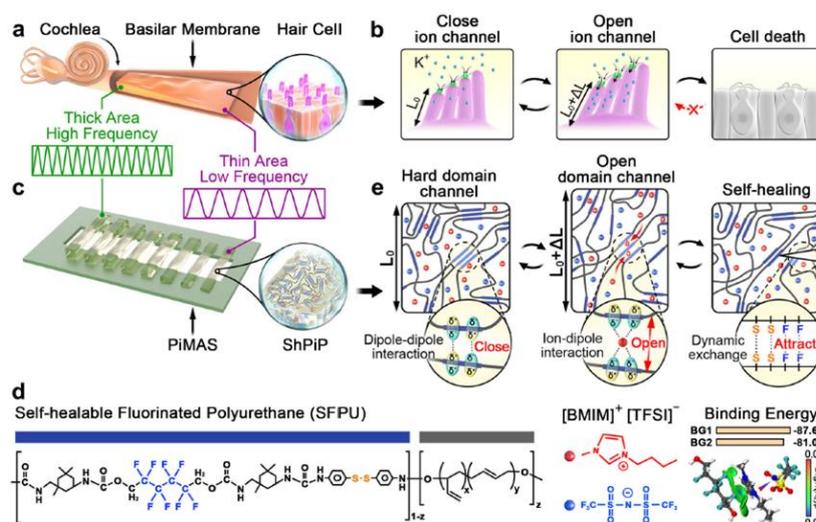
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63364-8>

4、一种可重构压电-离子型聚合物膜用于可持续的多共振声学传感

人体感觉组织暴露于外界环境以获取触觉、听觉、热、光和化学信号，但长期刺激或损伤会导致受体功能丧失。表皮、嗅上皮和味觉细胞具备再生能力，而听觉系统中的毛细胞和基底膜再生极为有限，其复杂结构易受衰老或疾病破坏，进而引发不可逆的感音神经性听力损失 (SNHL)。目前人工耳蜗是主要治疗方式，但其需侵入性手术，存在组织坏死、面瘫及高昂费用等风险。由于 SNHL 主要源自基底膜毛细胞损伤，而其他组织仍完好，人工基底膜的构建有望降低手术复杂度并革新治疗策略。为此，研究者开发了基于压电、摩擦电、电容和电阻材料的多共振声学传感器，但刚性材料易开裂，与软组织存在力学失配，且传统电子传导在湿润环境中易发生电化学腐蚀。理想的人工基底膜应采用全柔性材料，模拟离子型机械转导机制，并具备湿润环境下的自愈能力，从而实现长期、稳定的体内植入应用。

近日，中国科学院宁波材料技术与工程研究所的朱锦研究员与汉阳大学 Do Hwan

Kim 教授合作，受人类听觉系统基底膜的离子型机械转导机制启发，提出了一种可重构的压电-离子聚合物膜（ShPiP），用于仿生、可持续的多共振声学传感。通过在聚氨酯分子链中引入疏水氟基团、高电负性单元和动态共价键，材料具备优异的水下自愈能力；进一步结合离子液体 [BMIM]⁺[TFSI]⁻，构建出压电-离子型多共振声学传感器（PiMAS）。其核心的“离子笼驭效应”可在声压作用下调控离子通量：聚合物链拉伸时形成瞬态通道，阳离子与氟基团发生可逆离子-偶极作用，从而显著增强阻抗响应。实验表明，PiMAS 在 20 - 3200 Hz 范围内实现高灵敏度频率识别，覆盖人类语音主要频段，并对声压与应变均高度敏感。同时，ShPiP 的动态可重构性确保其在空气、水和淋巴液中均保持防水与自愈功能。该成果为构建人工基底膜及预防感音神经性听力损失提供了新途径。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



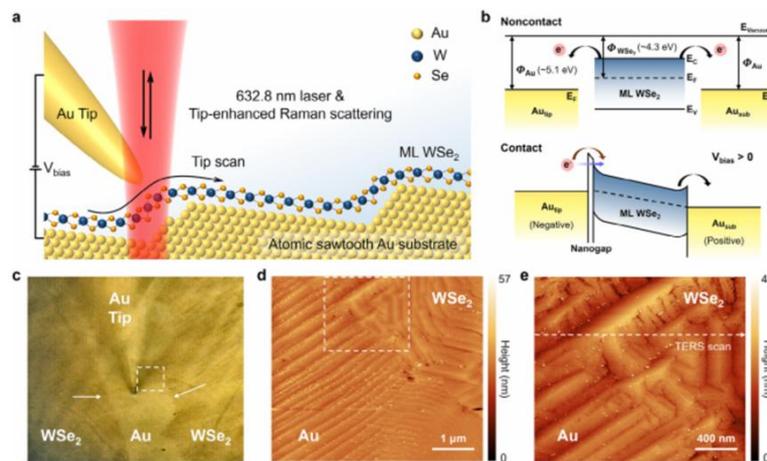
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63643-4>

5、具有内在应变的褶皱单层 WSe₂ 中异常声子软化现象

单层二硒化钨（WSe₂）因其优异的光电子学性能，已被广泛探索用于单光子发射器、量子光源、能量收集以及纳米光电器件。然而，二维材料在实际应用中往往会面临不可避免的应变（strain），这种由材料自身起伏、外部力学加载或衬底作用引入的晶格畸变，既可能导致性能劣化，也可能成为性能调控的新“旋钮”。如何在原子尺度上准确捕捉并解析应变对声子、激子等准粒子的影响，进而实现对二维材料物性的可控调制，一直是凝聚态物理和材料科学领域的关键问题。过去，研究者们尝试利用共聚焦拉曼光谱、偏振拉曼、光致发光显微技术等手段研究应变对声子行为的影响，但受限于信号截面小和空间分辨率有限，这些传统方法很难在纳米尺度上揭示声子随局域应变变化的本质规律。尤其是在单层 WSe₂ 中，一个理论上“拉曼失活”的振动模式——面外振动的 A₁'₂ (Γ) 模式，一直未能在常规实验中被有效观测与解析，其潜在物理机制更是长期悬而未解。因此，如何突破表征手段的空间与能量分辨瓶颈，揭示二维材料在纳米尺度下声子模式的异常行为，对于推动应变工程在量子光源、能量器件等领域的应用，具有重要的科学意义和工程价值。

近日，韩国汉阳大学 Mun Seok Jeong 教授课题组在纳米尺度上揭示了单层 WSe₂ 因固有应变而产生的“异常声子软化”现象，并成功观测到原本拉曼失活的

$A''_2(\Gamma)$ 声子模式。研究团队采用扫描隧道显微镜结合探针增强拉曼光谱 (STM-TERS)，在原子分辨率下实现了单层 WSe_2 褶皱区域的局域应变与声子行为的关联分析。结果显示，不仅多个主要声子模式在应变作用下呈现频率随应变线性下移的规律， $A''_2(\Gamma)$ 模式也表现出与应变强相关的频率软化和强度增强，且灵敏度甚至超过传统的 $E'(\Gamma)$ 、 $A'_4(\Gamma)$ 模式。进一步的密度泛函微扰理论 (DFPT) 计算表明，应变引起的晶格对称性破缺能够放松拉曼选择定则，使得 $A''_2(\Gamma)$ 模式由“失活”转为“可见”，这一现象在经典电极化率分析与量子力学框架下均得到了验证。研究团队首次从实验与理论两方面给出了 $A''_2(\Gamma)$ 模式的 Grüneisen 参数，为其作为新型应变探针提供了坚实依据。该成果不仅填补了二维材料应变声子研究中的关键空白，也为未来在量子光学、能量转换与应变工程等领域的应用奠定了重要基础。相关内容发表于《Advanced Materials》上。(张琰炯)

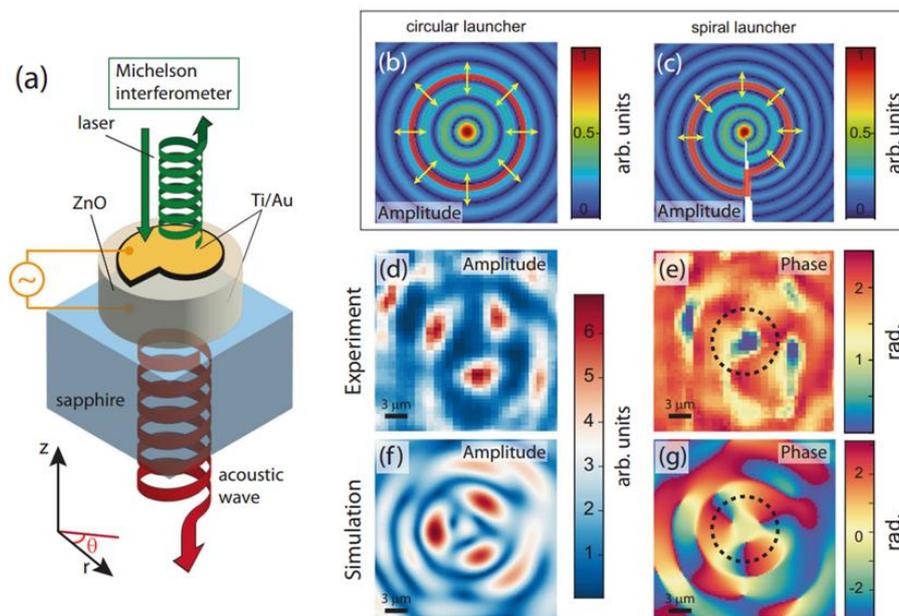


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202419414>

6、拓扑荷可调的 GHz 声光角动量 MXene

光子所携带的轨道角动量 (OAM) 自发现以来，极大地拓展了光场调控的维度和应用潜力。其螺旋型波前结构不仅为光通信、微观粒子操控和量子信息处理提供了新机制，也推动了拓扑光子学等前沿领域的快速发展。与此同时，声波与弹性波中的角动量调控也逐步受到重视，尤其在声镊、声学传感和量子耦合系统等方面展现出广阔前景。然而，现有声涡旋技术多集中于低频段 (Hz 至 MHz)，在高频段 (尤其是 GHz 范围) 实现可调拓扑荷的声涡旋生成仍面临技术挑战。高频声涡旋不仅可提升声学操控的空间分辨率与响应速度，更为声光调制、片上信号处理和混合量子系统提供了新的物理载体与技术路径。因此，发展一种能够在 GHz 频段工作、拓扑荷可灵活调控的声涡旋发生器，具有重要的科学意义与工程价值。近日，德国 PDI 固体电子学研究所的 P. V. Santos 和 A. Pitanti 研究团队提出并实验验证了一种基于压电体声波谐振器 (BAWR) 的可调拓扑荷声涡旋发生器。通过将谐振器上电极设计为阿基米德螺旋形状，能够在 0.5 - 7 GHz 的宽频带内激发具有特定拓扑荷的声涡旋，其拓扑荷可通过调节驱动频率或改变螺旋结构参数实现从拓扑荷 $l = 1$ 到 $l = 13$ 以上的连续调控。实验采用迈克尔逊干涉仪对声场进行相干测量，成功观测到不同拓扑荷下的相位分布，并与三维有限元仿真结果吻合良好。研究还发现，通过引入多臂螺旋结构可在固定频率下进一步扩展拓扑

荷范围。该器件通过移动边界效应实现光场调制，反射光携带随时间变化的轨道角动量，虽非严格意义上的光学涡旋，但仍具有良好的正交性和调制灵活性。该器件具有全电控、易集成、工作频率高等优势，在 OAM 复用通信、粒子操纵、拓扑声学及量子杂化系统等领域展现出广泛应用潜力。相关文章发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）

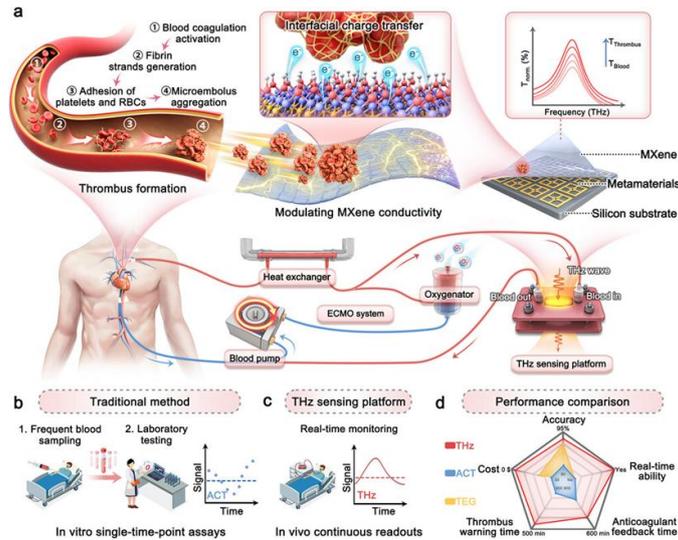


文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41467-025-63362-w>

7、驱动的太赫兹超材料作为实时生物传感平台用于体内血栓监测

精准、及时和个性化的体内血栓监测对于提高心血管疾病（CVDs）治疗效果和临床预后至关重要。太赫兹（THz）光谱技术凭借其快速分析能力、高时间分辨率和无标记检测特性，已成为生物医学工程领域日益重要的新型工具。然而，在真实血液环境中实现高精度血栓传感监测仍存在重大挑战。

近日，来自西南交通大学的杨柯教授团队，电子科技大学的肖旭教授，胡旻教授团队与陆军军医大学的杨翔教授团队合作，开发了一种基于 MXene 增强型太赫兹混合超材料的血栓传感平台，通过利用 MXene 与血栓之间界面电荷转移产生的高灵敏度太赫兹响应，显著提升了早期血栓检测灵敏度与实时传感能力。在应用于接受体外膜肺氧合治疗的患者时，该平台诊断血栓的灵敏度（94.7%）和准确率（92.3%）均超越了当前临床方法（包括血栓弹力图和活化凝血时间法）的检测能力。此外，该平台在体内血栓检测（提前 6 分钟）和抗凝效果反馈（提前 2 分钟）方面比活化凝血时间法提供更快速的检测性能。该平台展现出为个体患者量身定制临床抗凝策略的潜力，可显著降低心血管病患者当前较高的血栓并发症风险。相关工作发表在《Advanced Materials》上。（李治含）



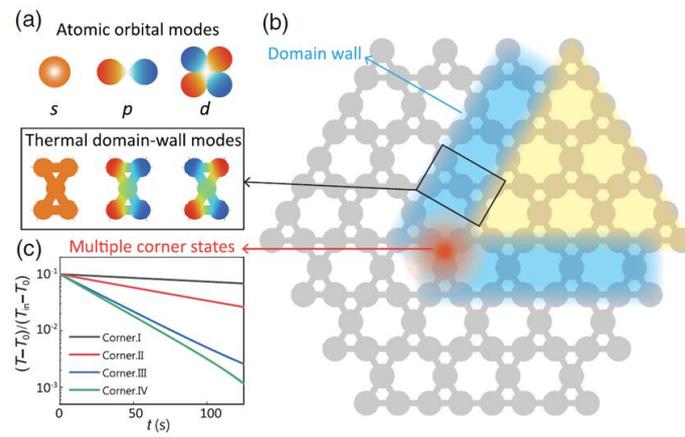
文章链接: K. Yang, H. Huang, X. Zhang, et al. “MXene-Powered Terahertz Metamaterials as a Real-Time Biosensing Platform for In Vivo Thrombus Monitoring.” *Adv. Mater.* (2025): e07063.

<https://doi.org/10.1002/adma.202507063>

8、扩散型热超材料中高衰减率拓扑角态的观测

近年来,随着热管理在电子器件、能源系统和航空航天等领域中的重要性日益凸显,发展高效的热调控技术成为一项关键挑战。拓扑物理的概念自凝聚态物理拓展至经典波系统后,在光子、声学和力学等领域取得了显著进展,而热扩散系统作为一类独特的非厄米体系,其反厄米特性导致本征值为纯虚数,对应着热量的衰减行为,高衰减率直接意味着更高效的散热能力。尽管高阶拓扑绝缘体在波系统中已被广泛研究,但在热扩散体系中的相关探索仍处于起步阶段,尤其是对于具有高衰减率的拓扑角态的构建与调控仍缺乏系统性研究。此外,现有研究多局限于第一带隙内的拓扑态,更高衰减率的拓扑态尚未得到充分发掘,限制了热超材料在热管理中的应用潜力。因此,实现具有高衰减率且可动态调控的拓扑热态对于推动热超材料走向实际应用具有重要意义。

近日,浙江大学的陈红胜教授、李鹰研究员与新加坡国立大学的仇成伟教授研究团队,基于二维热 Kagome 晶格设计并实验实现了一种具有高衰减率拓扑角态的扩散型热超材料。实验中通过构建两种不同拓扑性质的晶格单元并在其之间引入畴壁结构,在畴壁处激发了多极热模式,如偶极子和四极子模式,从而实现了多个角态并存,并显著提高了热衰减率。与研究初期仅局限于第一带隙内的角态不同,该工作发现了位于更高频带的角态,其衰减率远高于传统拓扑边界态。此外,研究还展示了通过简单热脉冲可实现角态之间的动态切换,从而进一步提升了热耗散效率,为热管理中的动态调控提供了新思路。该研究不仅首次在实验中实现了多个高衰减率拓扑角态,还拓展了拓扑热超材料的设计维度,为开发新一代热管理器件、能量回收系统及其他热相关技术奠定了坚实基础。相关成果发表于《Physical Review Letters》。(刘梦洋)



文章链接: <https://doi.org/10.1103/s97b-qcjc>
 (来源: 两江科技评论)