超材料前沿研究一周精选

2026 年 11 月 16 日-2026 年 11 月 22 日

索引：

1、InGaN 光催化纳米结构中超快载流子分离的光学观测

2、纳米尺度真空间隙中声子隧穿的实验界限

3、二维 $NbOCl_2/MoS_2$ 异质结中的超快界面电荷转移与激子局域化

4、超快 X 射线衍射实现 GaN 薄膜各向异性热输运的时空映射

5、非厄米连续体中在开放边界条件下持续存在的点隙束缚态

6、多状态 pH 响应微结构的 4D 打印

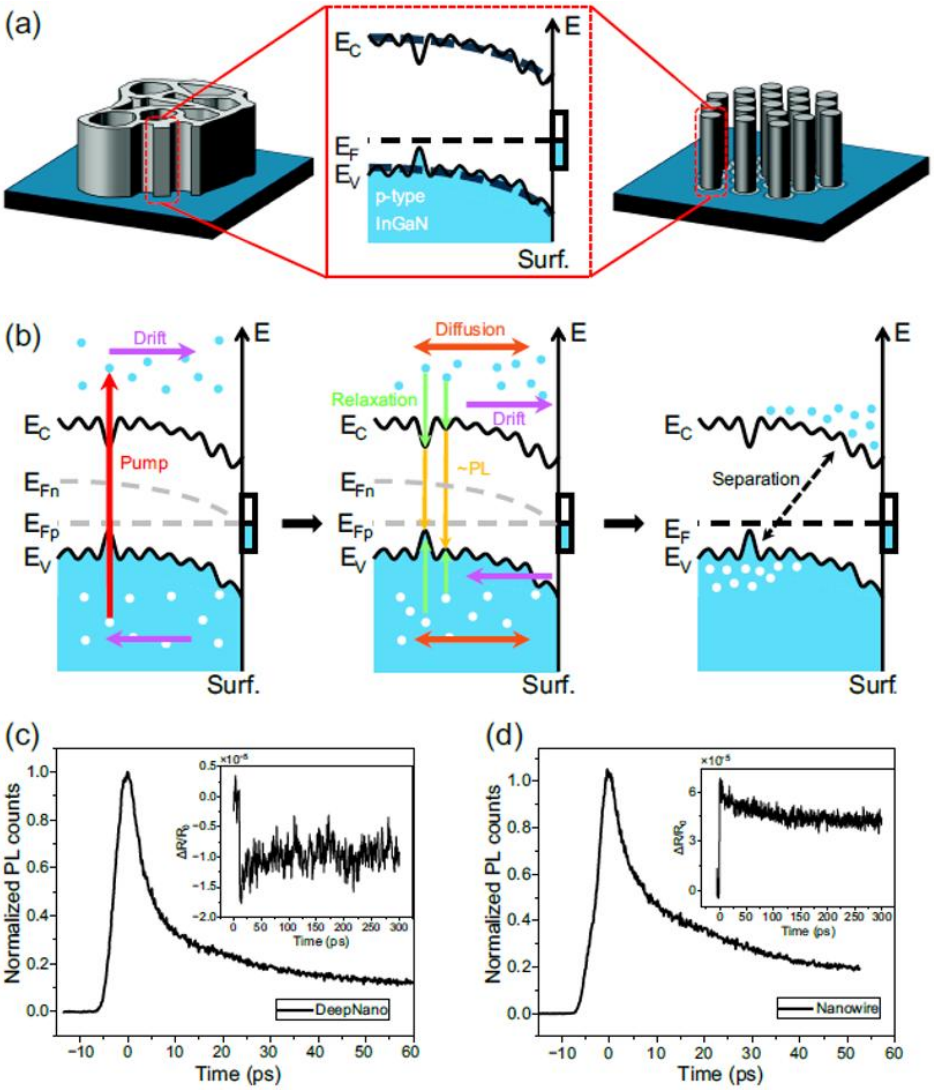
7、基于强化学习的可编程多模态热响应多材料超材料自主发现

8、基于超分子与动态三维拓扑结构的超强韧热-力-光多重响应弹性体

1、InGaN 光催化纳米结构中超快载流子分离的光学观测

1972 年，Fujishima 和 Honda 首次利用 TiO_2 光电极实现了光电化学分解水制氢。此后，研究人员探索了多种高效光催化半导体材料。其中，InGaN/GaN 纳米结构因具有可调节的带隙和较高的比表面积而受到广泛关注。通过调控铟镓组分比例，其光吸收范围可覆盖几乎整个太阳光谱，同时 InGaN 的能带结构满足水分解的氧化还原电位要求，为高效光催化制氢提供了有利条件。在光催化分解水过程中，半导体吸收光子产生电子－空穴对，电子参与还原反应生成氢气，空穴参与氧化反应释放氧气。然而，载流子的辐射与非辐射复合会降低参与催化反应的有效电荷数量，因此，实现电子与空穴的高效空间分离是提升光催化效率的关键。研究表明，半导体表面能带弯曲对载流子寿命及其复合行为具有重要影响，但目前对于光催化纳米结构中光生载流子早期超快动力学过程的实验研究仍然有限。

近日，**密西根大学的 Theodore B. Norris 团队**，结合时间分辨光致发光（TRPL）和时间分辨差分反射（TRDR）光谱技术，研究了两种 InGaN 光催化纳米结构中的超快载流子分离过程。研究发现，尽管光生载流子数量在较长时间内保持稳定，但时间分辨光致发光信号却迅速衰减，表明早期光致发光动力学主要受载流子空间分离而非电子－空穴复合过程主导。进一步结合不同温度、激发功率、探测波长及镁（Mg）掺杂浓度下的实验测量与数值模拟，揭示了局域态和内部电场在载流子空间分离过程中的重要作用。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）

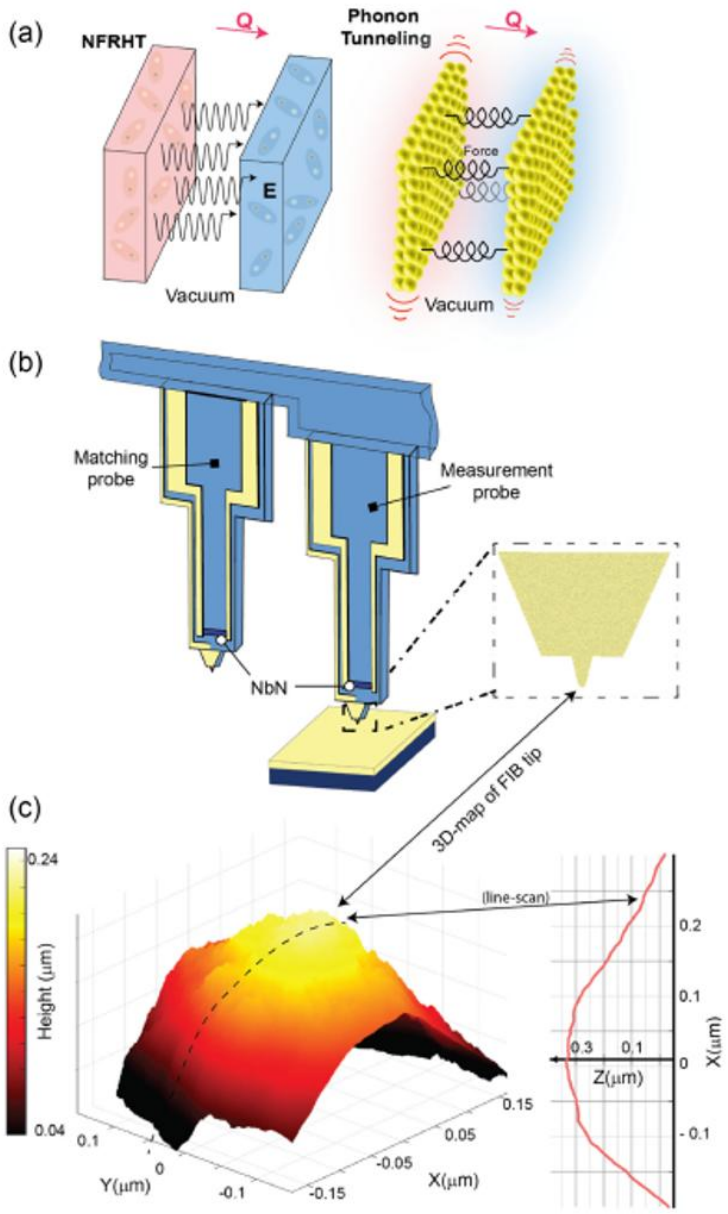


文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-026-79779-w

2、纳米尺度真空间隙中声子隧穿的实验界限

热传导与热辐射是两种基本的热量传递方式，前者依赖材料内部的能量载流子输运，后者则通过电磁场实现能量交换。然而，当两个物体之间的真空间隙缩小至纳米甚至埃尺度时，传统热传递机制之间的界限可能发生变化。一方面，近场辐射能够通过倏逝电磁波的耦合，使热流显著超过经典黑体辐射极限；另一方面，近年来的理论研究提出，范德华力、卡西米尔力及静电相互作用可能在真空间隙两侧建立原子振动耦合，使声子无需直接接触便能够传递能量，即所谓的“声子隧穿”。部分理论预测，这一机制在极小间隙下产生的热导可能比近场辐射高出数个数量级，甚至能够延伸至数纳米距离。然而，已有实验对声子隧穿的观测结果存在明显分歧，尤其在亚纳米尺度下，表面吸附物、污染层及偶然形成的分子热桥均可能引入额外热传导，使实验信号难以与真正的声子隧穿区分。因此，如何在严格控制表面状态和探针几何结构的条件下，定量区分近场辐射、力介导声子耦合及污染物热传导，是理解极端纳米尺度非接触热输运机制的重要科学问题。近日，**美国科罗拉多大学崔龙基教授团队**开发了具有高刚度和高热灵敏度的双探

针扫描热显微系统，结合聚焦离子束加工、三维探针形貌重构及超高真空测量，将金属表面之间的热传输测量推进至约 3 Å的极小间隙，并通过涨落电动力学和原子格林函数计算分析不同热传递机制。实验发现，在 1–40 nm 范围内，Au–Au 体系的非接触热导与近场辐射理论预测基本一致，未观察到可分辨的额外声子隧穿贡献。在亚纳米间隙下，热导随间隙减小而显著增加，并在 3 Å附近达到约 200 pW K^{-1}，但其距离依赖关系与范德华力及卡西米尔力介导的声子隧穿理论明显不同：实验拟合幂律指数为-0.77 ± 0.38，而相应理论计算分别给出约-7.50 和-2.75。进一步通过外加最高±3 V 电压研究 Au–Au 及 ITO–ITO 间隙中的静电耦合，研究团队在约 0.3 pW K^{-1}的测量分辨率内未发现可检测的静电力介导声子隧穿。考虑到亚纳米间隙中残余污染物形成热传导通道的可能性，研究人员并未将测得的热导直接归因于声子隧穿，而是据此建立了该机制可能贡献的保守实验上限。该研究为检验真空间隙声子隧穿理论提供了严格的定量约束，也为理解热传导与热辐射在原子尺度下的相互关系提供了重要实验依据。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



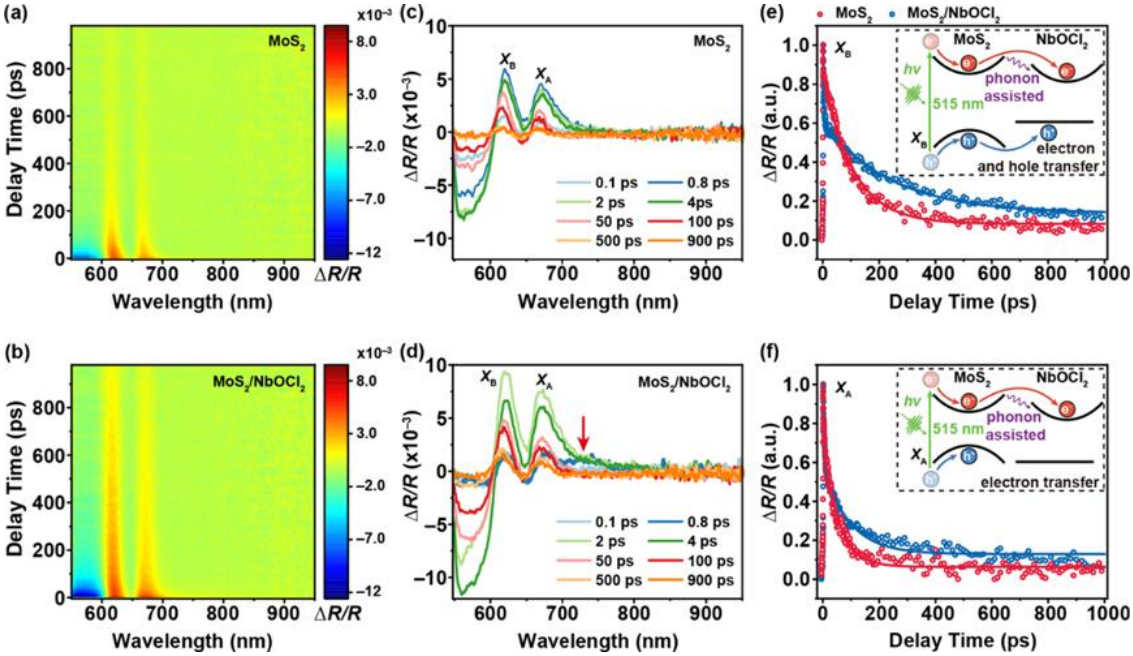
文章链接：https://doi.org/10.1103/yk31-1s6y

3、二维 $NbOCl_2/MoS_2$异质结中的超快界面电荷转移与激子局域化

二维过渡金属硫族化合物具有独特的电子结构和较强的激子效应，在光电子学和谷电子学领域具有广泛的应用前景。通过构筑范德华异质结，可以有效调控二维材料中的界面电荷转移及激子动力学。其中，异质结的能带排列决定了光生载流子在不同材料之间的转移路径，而极性材料的自发极化则能够改变界面局域静电势，为调控激子的空间分布提供新的途径。目前，能带排列与界面极化对激子动力学的影响及其微观物理机制仍有待深入研究。

近日，**北京大学高鹏教授、杜进隆高级工程师及刘秉尧博士组成的研究团队**以 $SrTiO_3$中具有周期性位错阵列的 5° 小角度晶界为研究对象，结合原位扫描透射电子显微镜—电子能量损失谱测温、原子分辨成像、振动光谱及非平衡分子动力学模拟，实现了位错附近热输运行为的纳米尺度解析。实验测得位错阵列两侧存

在约 38.38 K 的温度突变，利用块体参考热导率估算得到有效界面热导约 35.4 MW $m^{-2}K^{-1}$，对应约 339 nm 的 Kapitza 长度。进一步的二维温度成像揭示，热阻并非沿晶界均匀分布，而是主要集中于位错核心：核心区域的热输运过渡长度约为 2.14 – 5.17 nm，而位错核心之间的区域则表现出约 8.34 – 11.57 nm 的较弱、较宽范围的热输运扰动。结合原子结构和振动谱分析，研究发现位错核心附近 Ti—O 键发生明显畸变，Ti 局部价态改变，P4 光学声子特征出现约 10 meV 蓝移，同时局部与块体声子态密度的重叠程度下降至 90%以下。这些结果表明，位错核心的原子重构形成了与周围晶格不同的局域振动环境，增强声子散射并产生显著的局域热阻。该研究实现了从原子结构到纳米温度场的关联表征，为理解位错散射机制及利用晶体缺陷精准调控热输运提供了新的实验依据。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）

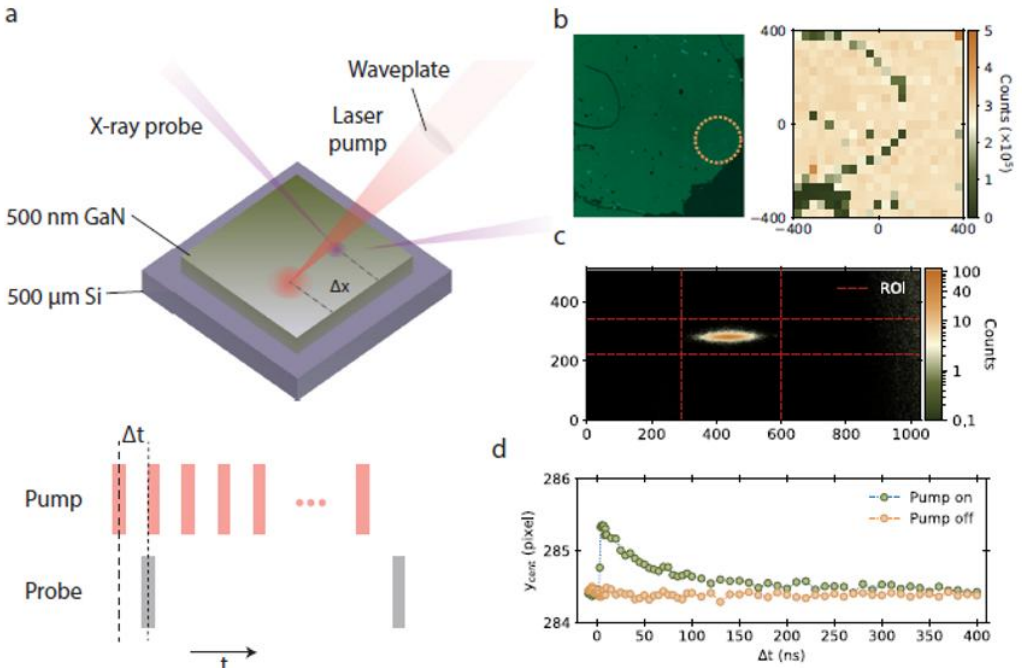


文章链接：https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6c04744

4、超快 X 射线衍射实现 GaN 薄膜各向异性热输运的时空映射

随着高功率电子器件向高集成度和高功率密度方向发展，局部热量积累及界面散热受限逐渐成为影响器件性能与可靠性的关键问题。氮化镓（GaN）凭借宽禁带、高击穿电场和较高的本征热导率，在高电子迁移率晶体管及新一代功率电子器件中展现出重要应用前景。然而，当 GaN 以薄膜形式集成于异质衬底时，其热输运性能不仅受到薄膜厚度和界面热阻的影响，还可能因生长、剥离和转移过程中产生的褶皱、裂纹等局部缺陷而显著下降。传统时域和频域热反射技术能够有效表征材料的热导率及界面热导，但在多层薄膜体系中，针对埋藏层内的横向热扩散及局域缺陷附近的热输运行为，仍存在空间分辨率和层选择性方面的限制。相比之下，超快 X 射线衍射能够利用 X 射线的穿透能力和晶体衍射的结构敏感性，直接探测光激发引起的微小晶格应变，为建立晶格结构演化与瞬态热输运之间的联系提供了新的可能。因此，发展兼具时间分辨、空间分辨和晶体层选择性的非接触热学表征方法，对于揭示薄膜内部局域热阻及优化半导体器件散热具有重要意义。

近日，**美国麻省理工学院李明达副教授 Jeehwan Kim 副教授以及核科学与工程系 Thanh Nguyen 博士**组成的研究团队以转移至硅衬底上的 500 nm 厚 GaN 薄膜为研究对象，利用超快光泵浦—X 射线探测技术，通过改变激光激发位置与 X 射线探测位置之间的横向偏移，记录不同时间和空间位置的晶格应变演化，并结合三维热扩散模型反演材料热输运参数。实验获得 GaN 薄膜面内热导率为 92.8 ± 22.0 $W\ m^{-1}K^{-1}$，GaN/Si 界面热导为（2.8 ± 0.2）× 10^7 $W\ m^{-2}K^{-1}$，结果与独立频域热反射测量及已有文献相符。进一步针对转移过程中形成的微米尺度褶皱开展局域扫描，研究发现褶皱两侧呈现明显不对称的热扩散行为，褶皱附近局域热导率降低约 4 倍，界面热导下降约 25%，揭示了局部结构缺陷对薄膜横向散热及界面热传输的显著影响。该研究将超快 X 射线衍射从晶格动力学探测拓展至定量热学表征，为解析多层薄膜中的埋藏热阻、局域热输运不均匀性及微电子器件热失效机制提供了新的实验方法。研究成果发表在《Nature Communications》上，(张琰炯)。



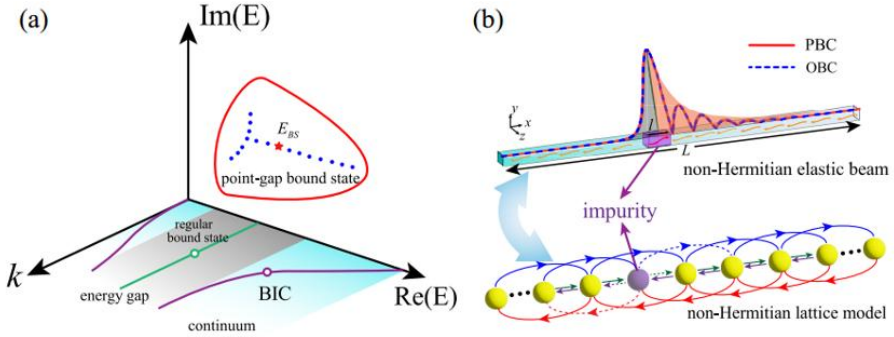
文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-026-75414-w

5、非厄米连续体中在开放边界条件下持续存在的点隙束缚态

非厄米物理系统因其与外部环境的相互作用而呈现出复数能谱，其中，非厄米趋肤效应（NHSE）是其最具代表性的物理现象之一，表现为开放边界条件下大量体态向系统边界发生指数局域化。点隙束缚态是一类由局域杂质诱导、存在于点隙能谱中的特殊束缚态，其波函数在周期边界条件下局域于杂质位置。然而，当边界条件转变为开放边界时，点隙通常发生塌缩，原本局域的束缚态容易与趋肤态发生杂化，从而失去纯粹的杂质局域特征。因此，如何在开放边界条件下维持点隙束缚态的局域性质，成为非厄米物理中值得探索的问题。传统研究主要集中于离散晶格系统，而连续体系具有更加丰富的动量空间结构，为解决这一问题提供了新的可能性。

近日，**华中科技大学的赵德刚副教授和复旦大学的丁鲲教授研究团队**，提出并实

验实现了一种能够在开放边界条件下持续存在的点隙束缚态，并揭示了其背后的非布洛赫驻波机制。研究以一维非厄米弹性连续梁为载体，通过编程控制压电陶瓷执行器阵列，在弹性梁中构建非互易耦合，实现双极性非厄米趋肤效应，并通过局域调控引入杂质势。理论分析表明，当杂质与远端边界之间满足特定的非布洛赫驻波条件时，杂质能够充当有效反射体，使不同广义动量分量形成驻波干涉，从而抑制趋肤态向边界的累积，使束缚态在点隙塌缩后仍保持原有的杂质局域特征。进一步地，研究建立了驻波条件与束缚态本征值之间的定量关系，并揭示了杂质强度、杂质位置及其与边界距离对局域态稳定性的影响。实验利用压电执行器引入局域扰动，通过扫描加速度计测量弹性梁的振动分布，获得了与理论预测高度吻合的局域束缚态。该研究不仅突破了点隙束缚态在开放边界下容易与趋肤态杂化的传统认识，也为非厄米系统中局域态的稳定调控提供了新的物理机制，并进一步展示了利用远端边界振动响应探测局域扰动的潜在传感应用价值。该文章发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



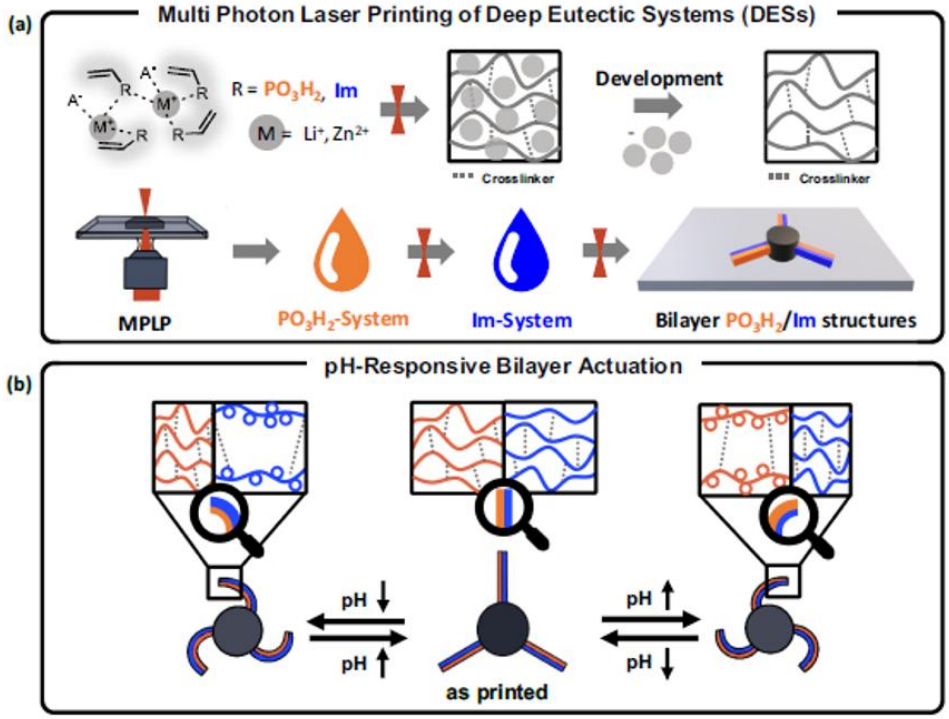
文章链接：https://doi.org/10.1103/qqpd-92fb

6、多状态 pH 响应微结构的 4D 打印

深共熔体系（DESs）因具有低蒸气压、高热稳定性、极性可调及良好的溶解能力等优势，在电化学、催化及软功能材料领域受到广泛关注。近年来，可聚合深共熔体系凭借优异的光反应活性和可调控的物理性质，逐渐成为光固化 3D 打印的理想材料，并在宏观尺度实现了复杂刺激响应结构的制备。多光子激光打印技术具有亚微米级分辨率，为高精度微结构制造提供了重要途径。然而，现有刺激响应微驱动器主要依赖单一材料或主动—被动双层结构，形变模式有限，难以实现复杂的多状态驱动。此外，传统水凝胶打印材料普遍存在加工窗口狭窄、对工艺参数敏感以及交联密度较高等问题，限制了结构的形变能力。因此，开发兼具优异打印性能、多材料兼容性及可编程响应特性的新型材料体系，对于实现复杂、多状态、可逆形变的微驱动器具有重要意义。

近日，**海德堡大学的 Christoph A. Spiegel 和 Eva Blasco 团队**，提出了一种利用可聚合深共熔体系（DESs）制备多状态 pH 响应微驱动器的通用策略。通过采用两种具有主动响应特性的 DES 基材料打印多材料结构，实现了仅由 pH 调控的双向、多状态驱动。为此，研究引入乙烯基膦酸作为酸性组分、乙烯基咪唑作为碱性组分，将二者分别配制成基于可聚合 DES 的多光子激光打印（MPLP）墨水，从而拓展了传统 pH 响应材料体系。这种材料组合不仅保证了优异的微尺度打印性能，还赋予多材料结构多状态驱动能力。研究进一步通过一系列复杂的 4D 微结构展示了上述驱动特性，并利用有限元框架下的超弹性理论计算机模拟，实现

了对其驱动形变模式的预测。研究成果发表在《Nature Communications》上。（刘帅）

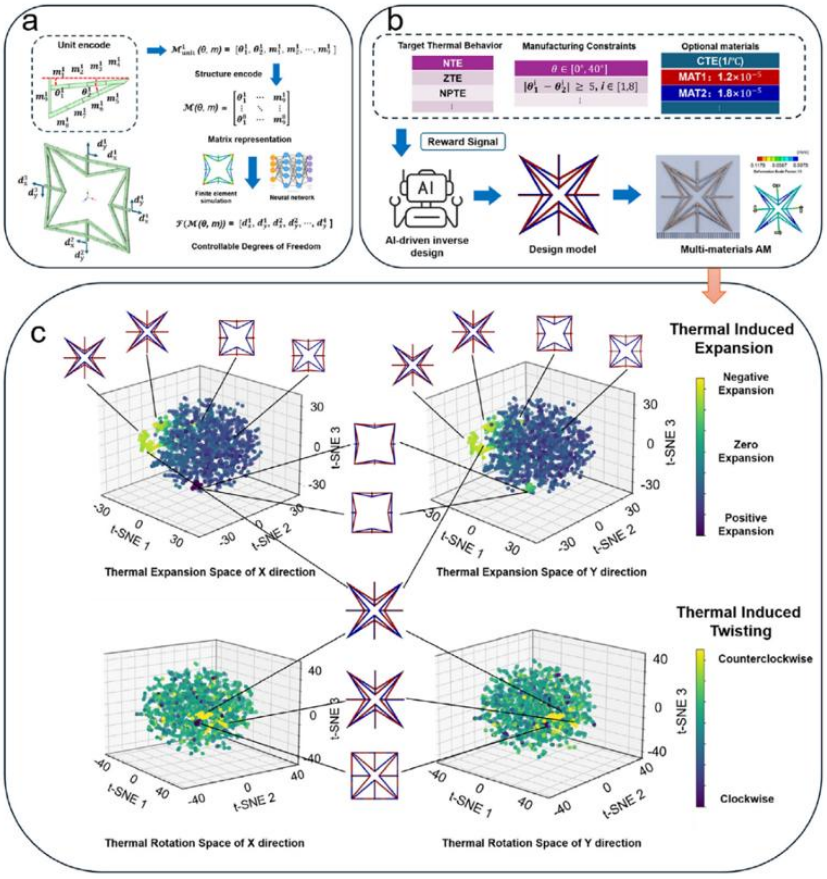


文章链接 https://doi.org/10.1038/s41467-026-79348-1

7、基于强化学习的可编程多模态热响应多材料超材料自主发现

随着增材制造技术的发展，超材料通过微观结构设计突破了传统材料在力学、热学及声学性能方面的限制，展现出负热膨胀和近零热膨胀等特殊功能，在高精度光学系统、卫星结构及微机电系统等领域具有重要应用价值。然而，现有热响应超材料的设计仍主要依赖弯曲、拉伸等经典变形机制，通常需要结合物理直觉与反复试错确定结构构型，难以实现复杂热变形行为的自主编程。多材料增材制造虽然拓展了材料组成与空间分布的设计自由度，但也增加了结构设计的复杂性。与此同时，现有深度学习方法通常依赖大规模训练数据，且主要局限于已有数据分布内的设计，难以探索全新的结构。因此，如何在有限数据条件下实现多材料超材料的自主逆向设计，并兼顾性能与制造可行性，成为该领域亟待解决的问题。近日，**中国科学院宁波材料技术与工程研究所的韦超研究员和日本东北大学的 Muhammad Aziz 教授研究团队**，提出了一种融合 Transformer 编码器与强化学习的多材料超材料逆向设计框架。通过建立包含几何参数、材料分布及制造约束的结构模型，结合有限元仿真与代理预测模型，实现对高维设计空间的自主探索与迭代优化。该方法仅需约 600 组初始仿真数据，便能够探索已有训练数据分布之外的新型结构，并实现负热膨胀、近零热膨胀、各向异性热膨胀等多种热响应。进一步地，通过调节不同目标对应的奖励权重，实现了热诱导扭转与热膨胀等多种变形模式的组合与调控。最终，研究利用多材料增材制造完成结构制备及实验验证，证实了设计方法的有效性。该研究为复杂多材料超材料的自主逆向设计提供了新的思路，也为具有定制化功能的智能超材料开发拓展了新的方向。该研究

发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）

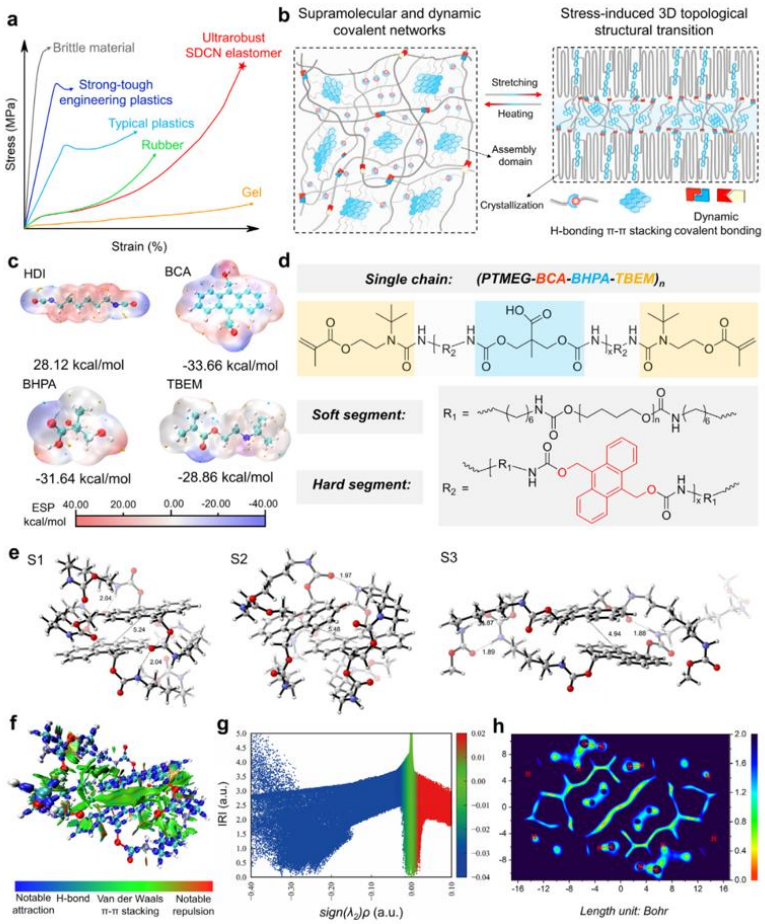


文章链接：https://doi.org/10.1002/adma.75546

8、基于超分子与动态三维拓扑结构的超强韧热-力-光多重响应弹性体

弹性体凭借良好的柔韧性和可变形能力，在软体机器人、生物医学器件、柔性电子及极端环境装备等领域具有重要应用价值。然而，传统弹性体的机械性能提升通常依赖增加交联密度、优化结晶结构或引入填料，往往难以同时兼顾机械强度、韧性与可回收性。近年来，动态共价键和超分子相互作用为聚合物网络的结构调控提供了新的思路，但动态交联网络在获得可逆性和可重加工能力的同时，通常面临机械性能不足及环境适应性有限的问题。此外，传统光刻材料在机械可编程性和化学可逆性方面也存在一定局限。因此，如何通过分子结构设计实现机械增强、动态响应与光学功能的协同集成，成为高性能智能弹性体研究的重要方向。近日，**上海交通大学的陈玉洁研究员、吴量助理研究员和刘河洲研究员研究团队**，提出了一种基于聚氨酯-脲-酰胺（PUUA）的超分子动态共价网络，通过引入蒽基团、分子间氢键及动态受阻脲键，构建具有多尺度组装特征的三维拓扑结构。其中，蒽基团之间的π－π堆积与氢键共同形成超分子硬域，并通过动态共价键与柔性聚合物链段连接，实现材料内部的微相分离与结构调控。在外部刺激下，该体系表现出三种动态响应机制：热刺激诱导动态键及超分子相互作用的解离与重组，实现网络结构的重新组织；机械拉伸促使超分子硬域解组装，并与应力诱

导结晶协同作用，形成新的取向三维拓扑结构，从而实现强度与韧性的同步提升；紫外光则通过蒽基团的光二聚反应调控分子构型，实现荧光响应及光学信息加密。最终，该弹性体实现了 100.17 MPa 的拉伸强度、1286.79%的断裂伸长率以及 498.15 MJ·m⁻³的韧性，在-40 ℃下仍保持优异的力学性能，同时具有 92.4%的溶剂辅助重加工回收率。该研究为兼具超高机械性能、可持续加工能力和多重刺激响应功能的智能弹性体提供了新的分子设计思路，并展现出其在极端环境装备、信息存储和柔性电子制造等领域的应用潜力。该研究发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）



文章链接：https://doi.org/10.1002/adma.75763
（来源：两江科技评论）