

# 超材料前沿研究一周精选



2025 年 12 月 15 日-2025 年 12 月 21 日

索引：

- 1、机器学习中多模波传播的任意控制
- 2、具有强耦合振幅的等离子体 Su-Schrieffer-Heeger 链
- 3、连续谱中的束缚态作为散射矩阵的节点链点
- 4、基于几何 AI 的弯曲机械超材料逆向设计
- 5、扩散体系中的时间反 PT 对称性及其热输运调控
- 6、用于可调彩色材料的纤维素液晶的木材微通道约束组件
- 7、基于界面激光剥离策略的多功能昆虫翅膀可规模化制造

## 1、机器学习中多模波传播的任意控制

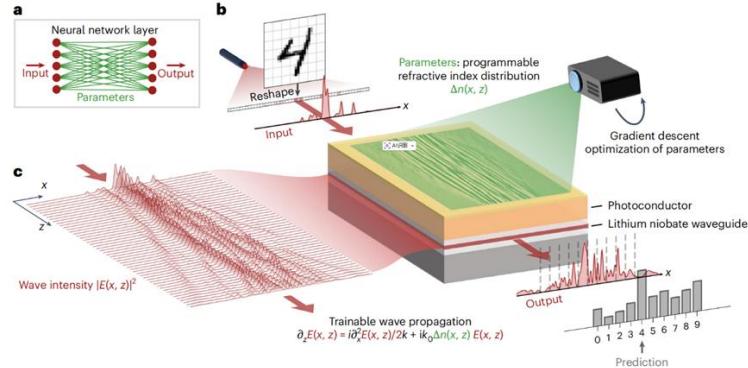
深度神经网络 (DNNs) 已广泛应用于计算机视觉、自然语言处理等诸多领域。随着模型规模的指数级扩张，其运行能耗亦急剧攀升，并逐渐成为限制进一步发展的主要瓶颈。鉴于矩阵-向量乘法 (MVM) 在推理与训练中占据主要计算成本，探索更高能效的计算策略已迫在眉睫。光学神经网络，尤其是能够在芯片上直接以光学方式执行 MVM 的集成光子平台，因其潜在的高速性与超低能耗特性而备受关注。

现有集成光子神经网络通常依赖单模波导互连大量离散可编程光子器件构建线性算符。然而，这种“离散式架构”面临多重限制：其一，实现  $N \times N$  矩阵需要约  $(N^2)$  条电子线路写入芯片，布线密度与外围面积迅速成为瓶颈；其二，光学器件的尺寸受波长及材料特性限制，可扩展性有限；其三，大量芯片面积被复杂的单模互连结构占据，进一步压缩可编程自由度。因此，迄今此类芯片只能支持远低于光学能效优势阈值 ( $N \geq 1,000$ ) 的规模。

相比之下，将整个芯片视为具有连续折射率分布  $n(x, z)$  的“光学计算介质”，并通过直接塑形多模波传播实现线性运算，是一种更具空间效率的策略。但真正实现可重配置的折射率分布并不容易。传统纳米光子器件依赖光刻固定  $n(x, z)$ ，无法重写；光折变晶体虽可编程，但可调折射率仅约  $10^{-4}$ ，难以支持大规模计算；相变材料虽能实现自由形状的折射率分布，但受限于有限的重写寿命和较高光损，目前仅能实现极小规模（如  $3 \times 3$ ）的可编程操作。

近日，康奈尔大学 Martin M. Stein 教授与 Peter L. McMahon 教授团队提出并实验展示了一种全新的二维可编程光波导架构。该器件利用并行电光调制，可在铌酸锂平板波导的约 10,000 个独立区域上精确控制折射率分布  $n(x, z)$ ，从而形成可训练的多模光学结构，用于执行神经网络推理。与逆向设计的固定光子超构

器件类似，该平台同样能在二维平面上对复杂多模波传播进行精细控制；但其关键优势在于完全可重配置性。折射率分布无需通过光刻定义，而是通过光学图案实时写入 $\Delta n(x, z)$ ，使波导本身成为可编程的线性算符。其核心机制基于光电导增益：照射在光敏层上的光图案调制局部电导，改变铌酸锂中的垂直电场分布，并借助其强电光效应实现连续可调的折射率变化。通过优化 $\Delta n(x, z)$ ，即可让复杂的多模干涉演化自然实现所需的计算功能，例如神经网络的前向推理。相关内容发表于《Nature Physics》上。（金梦成）

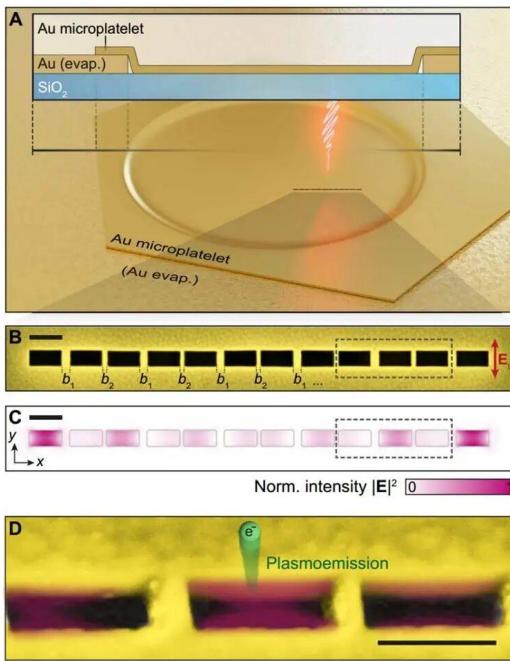


文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41567-025-03094-2>

## 2、具有强耦合振幅的等离子体 Su-Schrieffer-Heeger 链

拓扑光子学作为凝聚态物理概念与纳米光子学交叉的前沿领域，为在亚波长尺度操控光提供了新范式。其中，Su-Schrieffer - Heeger (SSH) 模型作为描述一维拓扑绝缘体的经典模型，因其能够承载受拓扑不变量保护的鲁棒边界态而受到广泛关注。这些边界态在能谱上位于系统的带隙之中，故亦称中隙模式，其强度空间局域于系统两端，对扰动具有免疫力，在稳健光传输与量子信息处理中颇具潜力。等离子体平台能够实现光的深亚波长局域，为在纳米尺度探索拓扑现象以及与量子发射器在常温条件下实现强耦合提供了理想体系。然而，先前研究在实现等离子体 SSH 链及其拓扑模式方面面临挑战。因此，在保持个体谐振器特性前提下，实现强耦合并清晰观测拓扑保护的边界态，成为该领域亟待突破的关键。

近日，德国维尔茨堡大学的 Bert Hecht 教授、Tobias Brixner 教授研究团队成功制备了基于等离子体纳米狭缝谐振器的 SSH 链，并在强耦合条件下实现了拓扑边界态的纳米尺度成像。研究利用氮离子束刻蚀技术在单晶金微片上加工出具有交替亚纳米间距的纳米狭缝链，从而获得了高对比度的耦合强度并进入超强耦合范围。通过光发射电子显微镜实验，直接观测到了非平凡拓扑构型下特有的中隙模式，其光强显著局域于链两端的谐振器。结合模拟与理论分析，该模式与 SSH 量子模型的边界态预测一致。整个链的带隙达 320 meV，有效实现了中隙模式与带边模式的光谱分离。该工作标志着在等离子体系统中对拓扑态实现精确控制和光谱隔离的重要进展，为未来将拓扑保护边界态与单量子发射器强耦合、以及拓展至二维高阶拓扑等离子体系统奠定了基础，对量子光子技术与低损耗拓扑光传输具有重要意义。该研究成果发表于《Science Advances》。（刘梦洋）

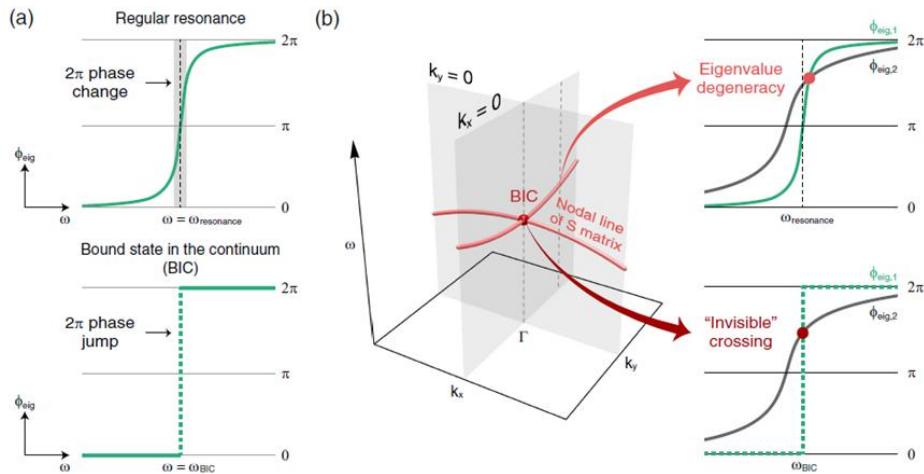


文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aea3844>

### 3、连续谱中的束缚态作为散射矩阵的节点链点

连续谱中的束缚态是一类虽然处在可辐射的连续能带中，却依然不向外泄漏能量的特殊模式，其存在依赖于自身的拓扑特性。这种拓扑保护表现为动量空间中的偏振结构涡旋，束缚态在其中充当涡旋中心并携带拓扑电荷，由此能够产生类似光学涡旋、光束偏移等效应。这些奇异且高度稳健的性质，使其在设计抗缺陷的光子器件时具有重要价值。与此同时，节点线是能带中发生线性交叉形成的连续退化结构，在描述电子与光子体系的理论中具有重要拓扑意义。在具备特定对称性的系统中，节点线还能进一步连接成节点链，展现更复杂的拓扑形态。尽管束缚态与节点线在各自领域都已有深入研究，但二者是否在散射现象中存在内在联系，尚未被系统探索。

近日，复旦大学刘文哲研究员、香港城市大学吴耿波教授、香港科技大学陈子亭教授团队合作，揭示了束缚态与节点线在散射矩阵中的深层联系。散射矩阵是描述光与结构相互作用的重要工具。通过分析其本征值，作者发现束缚态能够将原本独立的节点线钉在一起，使其在频率—动量空间中形成稳健的节点链结构。利用具备相对称性的反射型超表面进行实验测量后，研究首次验证了此前未被认识的拓扑特征。更加引人注目的是，即使破坏了系统的镜像对称性，节点链依旧牢固地固定在束缚态处，并不会像普通节点链那样消失。这说明其稳健性并非依赖简单的对称性保护，而是源于束缚态自身的奇异散射特性。研究结果揭示了束缚态在散射过程中的更深拓扑作用，为利用拓扑特征调控光与物质的相互作用提供了新的思路。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）

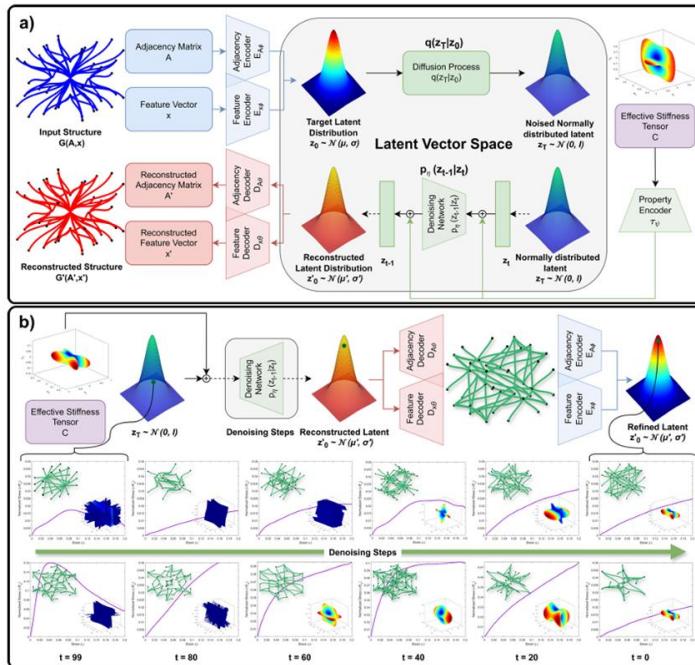


文章链接: <https://doi.org/10.1103/rpb2-ryyk>

#### 4、基于几何 AI 的弯曲机械超材料逆向设计

机械超材料作为一种通过人工设计微观结构来获得超常宏观性能的先进材料，正在不断拓展材料科学的边界。同时，增材制造技术的进步为设计具有复杂拓扑结构的超材料提供了有利条件，如引入弯曲元素（如圆弧、正弦杆等）的曲杆桁架结构。相较于传统的直杆结构，曲杆结构在提升柔顺性、减少应力集中以及增强能量吸收方面展现出巨大潜力。然而，曲杆超材料的设计空间庞大且离散，其结构拓扑与力学性能（线性刚度、非线性力学响应）之间还存在着极度复杂的非线性映射关系。传统的正向设计依赖于实验试错和有限元分析，计算成本高昂且效率低下；而现有的逆向设计方法往往受限于缺乏统一的结构表征，且难以解决“反演模糊性”问题——即多种不同的拓扑结构可能对应相同的力学性能。因此，如何高效、精准地从目标性能反推并生成多样化的三维曲杆结构，是当前该领域面临的一大挑战。

近日，伊利诺伊大学芝加哥分校黄继达教授团队针对三维弯曲桁架超材料的逆向设计，提出了一种结合图结构表征、变分自编码器（Variational Autoencoder）及潜在空间扩散模型（Latent Diffusion Model）的生成式设计框架，成功实现了兼顾线性刚度和非线性力学响应的超材料逆向生成。在数据集层面，研究人员提出了一种基于图的表征方法，将三维桁架结构抽象为节点和边缘的连接网络，同时引入贝塞尔曲线参数来描述杆件的曲率，进而构建了一个涵盖从高刚度直杆结构到高柔顺性曲杆结构的宽泛数据集。其次，为了解决离散设计空间难以优化的问题，研究人员采用了一种嵌入性能预测模块的变分自编码器，将高维、离散的结构信息（拓扑连接和几何特征）映到一个连续、紧凑的低维潜在空间中，不仅能够实现对结构的梯度优化，还能直接根据潜在变量快速预估结构的刚度张量和应力-应变曲线，极大地降低了预测和优化成本。此外，团队还在潜在空间中引入扩散模型，解决了逆向设计中的“一对多”映射难题，在确保生成的结构满足目标刚度的同时，还能保证其在物理上的可行性。实验结果表明，该扩散模型在预测精度和生成效率上均优于传统的潜在空间梯度优化方法，能够帮助设计者发现具有特定非线性行为（如屈曲模式、能量吸收特性）的新型超材料。此工作为柔性机器人、航空航天及防护工程等领域的材料按需设计提供了高效解决方案。相关工作发表于《npj Metamaterials》上。（潘鑫荣）



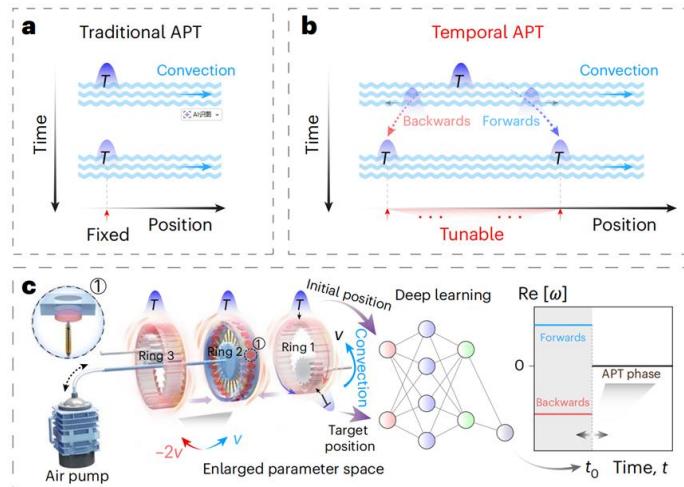
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s44455-025-00005-6>

## 5、扩散体系中的时间反 PT 对称性及其热输运调控

物理对称性决定了自然界中相互作用与演化的基本规律。宇称 - 时间 (PT) 对称性的提出引发了非厄米物理的范式变革, 揭示了增益与损耗平衡的开放系统竟能够拥有完全实数的能谱。其中的关键在于奇异点 (EPs) —— 系统本征值与本征态同时塌缩的特殊退化点。围绕 EP 的研究推动了诸多突破性应用, 如超灵敏传感器和稳健的单模激光器, 并使得对声子激光与增强非线性效应等基础现象的探索成为可能。反宇称 - 时间 (APT) 对称性进一步将哈密顿量映射为其负值, 为操控能量输运提供了新的思路。

近年来, 非厄米概念被引入扩散系统, 实现了热局域和拓扑热态等新的调控方式。然而, 这些工作大多仍停留在静态范式: 系统参数随时间保持不变, 只能形成固定的对称或破缺相位。由于难以在实验中实时、精确地调控介质内部的热耦合路径, 使系统经历可编程的时序相变, 传统方法无法主动实现热量的动态牵引或捕获等高级操控。相比波动系统受衍射极限影响, 扩散过程由材料结构和热交换路径决定, 不依赖特征波长, 因此在实现时序调控方面具备独特优势。

近日, 复旦大学黄吉平教授与新加坡国立大学仇成伟教授联合团队提出并实现了“时间反 PT 对称性”这一全新概念, 开启了扩散系统的时间调控维度。不同于通过周期调制构造有效静态相, 他们直接将非厄米相变发生的时间作为可编程自由度, 通过动态调控材料特性与对流条件, 在实验中成功实现对相变时刻的精准控制。基于此机制, 研究团队在一个具有时序可调耦合的三环热系统中展示了前所未有的热能操控能力: 热分布可以沿对流方向前推、逆流回溯, 甚至在任意位置被“捕获”并固定。研究同时构建了理论、深度学习预测与实验验证相结合的完整框架, 首次在扩散系统中实现了对热输运全过程的主动编程。该成果从根本上将非厄米物理扩展到时间域, 为智能化、按需式的波与能量输运开辟了新的研究方向。相关内容已发表于《Nature Physics》。(金梦成)



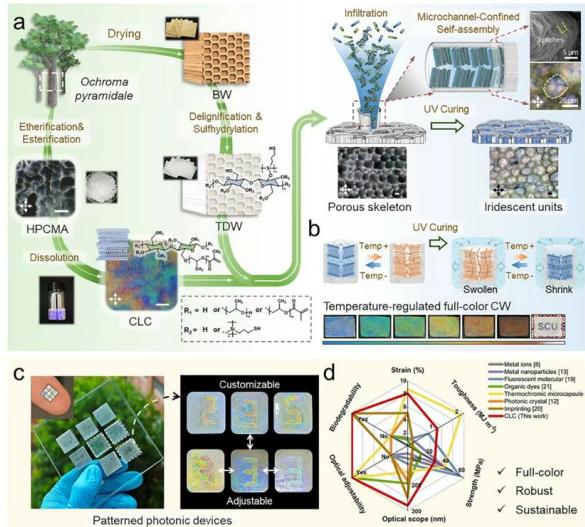
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-03129-8>

## 6、用于可调彩色材料的纤维素液晶的木材微通道约束组件

木材作为一种长期服务于人类社会的天然材料，在循环经济框架和新兴智能技术需求的推动下，正焕发作为可持续信息传递与显示载体的新潜力。特别是在智能色彩显示与光学防伪等实际应用领域，基于木材着色的光谱选择性调控成为关键需求。当前策略通常依赖于在去木质化木材中浸渍可聚合的石油基单体与光学添加剂，或在其表面沉积金属纳米粒子与嵌段共聚物微球以构建光子晶体结构。这些异质添加物的引入存在脱落与迁移风险，严重损害了木材固有的可持续特性，且其光学性能通常表现为不可调节的静态特性。利用木材自身结构引导同源的木材衍生组分形成可调控的有序光子结构，从而释放木材在真正可持续与可调光学性能方面的内在潜力，是一个兼具吸引力与挑战性的前景。

近日，四川大学张新星教授、电子科技大学附属肿瘤医院的侯令密博士研究团队开发了一种可持续的木材着色策略，即通过木材衍生纤维素液晶在微通道限制下的组装，制备出具有温度调制、全彩光学性能的彩色木材材料。该方法利用去木质化木材骨架提供的微通道边界条件，对具有纳米级胆甾螺旋结构的纤维素液晶组装体进行约束与集成，有效实现了精确有序的结构调控与稳定性提升。由于与水合度相关的可逆温度响应，彩色木材中类似像素化的离散虹彩单元的纳米结构可被主动调控，形成可调节的光子阵列，实现可靠的按需图案化，并覆盖可见光谱的宽范围。此外，材料中生物基衍生物的高比例使用显著降低了潜在的生态毒性并提高了可生物降解性。研究表明，该彩色木材材料在机械性能方面也获得显著增强，并且具备优异的环境耐久性。该策略有望突破传统光学木材在被动传输或静态不可调颜色方面的限制，通过使用生物基替代材料保持木材的可生物降解性，为下一代可持续智能全彩光学设备提供了一种有前景的平台，可广泛应用于数字显示、防伪、生物医学成像等领域。本研究成果发表于《Advanced Materials》。

(刘梦洋)

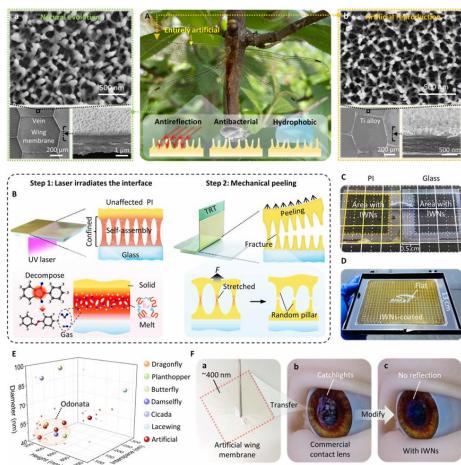


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202518709>

## 7、基于界面激光剥离策略的多功能昆虫翅膀膜可规模化制造

自然界中大量生物展现出源于其独特纳米结构的卓越功能，例如植物的液体调控、昆虫的光学操控与感知、爬行动物的黏附控制以及海洋生物的减阻特性。尤其是昆虫翅表面的不规则纳米柱，可实现全方向减反射、抗菌及自清洁等多重功能。这些昆虫翼纳米结构（IWNs）激发了仿生超功能表面的研究需求。然而，由于其高纵横比、随机分布和复杂截面，现有纳米加工技术难以实现高保真度和大规模复制。模板法受制于脱模困难和模板尺寸成本；刻蚀法虽然能获得高纵横比结构，但工艺复杂、效率低；飞秒激光虽可构建复杂结构，却受限于扫描面积小、能量分布不均，难以实现一致的大面积加工。此外，实现真正的仿生昆虫翅膀膜不仅需复制表面纳米结构，还需具备天然翅膀膜的宏观特征——极轻、极薄（厚度约  $1\text{ }\mu\text{m}$  或更小）、柔性强，并能与多种曲面无胶贴合。因此，开发一种适用于超薄、耐久基底的可规模化仿生制造策略，成为实现昆虫翼超功能表面的关键需求。

近日，华中科技大学黄永安教授团队，提出了一种不同于传统表面处理的新途径，通过界面激光诱导反应在超薄且高耐久基底上大规模制备功能性纳米结构。其核心机制是在聚酰亚胺（PI）与玻璃双层结构的界面处，通过激光受限烧蚀生成并自组装纳米气泡。与以往激光照射后完全界面分离的方式不同，本研究利用“未完全分离”这一曾被视为激光剥离失败的现象，在界面处构建可控的纳米结构。随后，通过机械剥离使这些界面纳米柱发生断裂，从而瞬间在 PI 膜与玻璃表面同时形成不规则纳米柱。气泡的物理聚并与柱体断裂机制极大简化了不规则纳米柱的形成过程，并与亚微米级超薄膜高度兼容。所得人工翅膀膜在厚度、表面纳米形貌及多功能性方面均高度接近天然翅膀。该技术无需洁净室、真空或化学处理，也不依赖光刻掩膜，可通过商用工业激光加工系统轻松扩展到大面积制造。由于人工翅膀膜具有优异的贴合性，能与各种平面或曲面表面无缝结合，该方法在医用器械与植入体、光电器件表面调控、生物集成光学器件以及柔性/可形变电子等领域具有广泛的潜在应用前景。相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aea6934>  
 (来源: 两江科技评论)