

超材料前沿研究一周精选

2025 年 7 月 1 日-2025 年 7 月 6 日

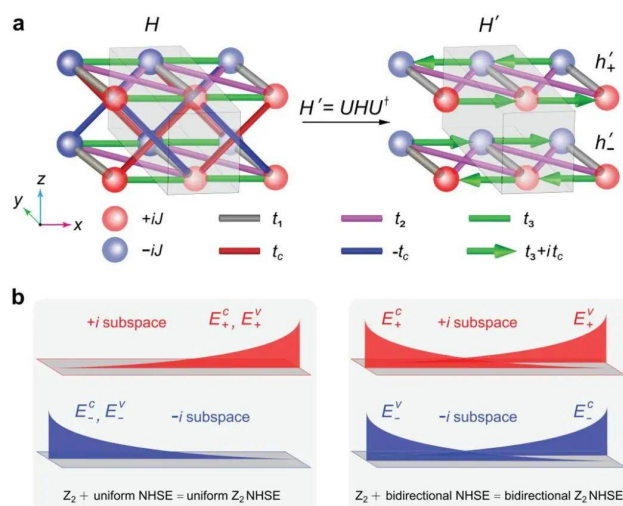
索引:

- 1、投影镜面对称声学超材料中 Z2 非厄米趋肤效应的观察
- 2、长量子比特链中的量子态时间最优传输
- 3、无对称保护一维系统边缘态的拓扑性质
- 4、通过机器学习的超宽带和波段选择性热超发射器
- 5、高稳定光纤集成石墨烯超快电子源
- 6、用于软骨重塑过程中冲击吸收和应变调节的仿生双曲面力学超材料
- 7、用于波长选择性多材料 3D 打印的环氧-丙烯酸酯混合树脂

1、投影镜面对称声学超材料中 Z2 非厄米趋肤效应的观察

近年来，开放与非平衡系统中的非厄米物理因独特拓扑性质引发广泛关注。区别于厄米体系，非厄米系统复能谱诱导的点能隙拓扑催生了非厄米趋肤效应(NHSE)，其核心特征为体态局域于系统边界。传统 NHSE 无需对称性即可存在，但引入对称性可显著拓展其内涵：时间反演对称性保护的 Z2 型 NHSE 以自旋依赖的成对趋肤模为典型，而规范通量作用下的投影对称表示能衍生新奇拓扑态。当前无自旋系统中实现 Z2 型 NHSE 仍具挑战，且受限于非厄米元件的构造难度，对称性调控的非厄米效应实验进展缓慢。

近日，武汉大学的邱春印教授、李昱增博士课题组，设计了一维双层声学超材料模型，通过投影镜面对称在自旋无关系统中实现 Z2NHSE。理论模型经酉变换解耦为两个具有相反规范通量的单层子系统，各子空间承载独立点能隙拓扑。在增益/损耗与通量协同作用下，子系统分别产生空间积累方向相反的趋肤模，形成 Z2 成对效应。实验中采用空腔-管道结构模拟晶格，结合外部反馈电路精准调控非厄米元件，成功观测到两类现象：均匀型表现为相同赝自旋子空间内价带与导带趋肤模同向积累；双向型则呈现同一赝自旋子空间内价带与导带趋肤模反向局域化。通过选择性相位激发与傅里叶谱分析，两类现象均获验证，与无增益系统的对称响应形成鲜明对比。此项工作首次在自旋无关系统中通过投影对称实现赝自旋分辨的 Z2 趋肤效应，突破了传统理论框架限制。实验揭示的参数调控下均匀与双向 NHSE 竞争机制，为非厄米多态操控提供了新范式。所发展的声学实现方案可推广至光子学与冷原子体系，为自旋分辨波导放大、高灵敏传感等应用开辟技术路径，研究成果发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）

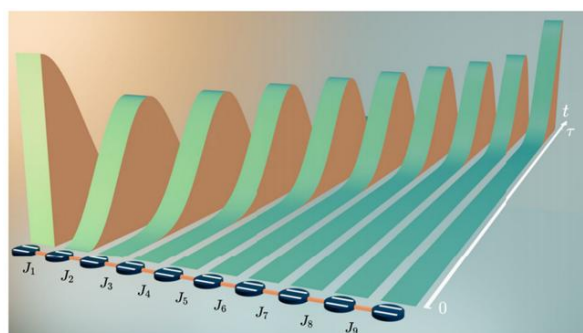


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202506739>

2、长量子比特链中的量子态时间最优传输

随着量子技术的发展,能够执行量子算法和量子模拟的大规模量子系统正逐步成为现实。目前,离子阱、冷原子、光子系统以及超导量子比特阵列等多种实验平台已进入“噪声中等规模量子”阶段,激发了关于“量子优越性”的广泛讨论。要真正发挥这些体系的规模潜力,关键在于对其进行高精度且灵活的量子最优控制。常见方法包括反绝热驱动、绝热捷径和量子 Brachistochrone (QB) 方法,其中 QB 方法通过几何学视角,在给定哈密顿量约束下利用变分原理最小化系统从初态到目标态所需的时间。尽管该方法在小自由度系统中可解析求解,但一旦系统规模扩大,自由度与参数空间急剧膨胀,直接应用便面临巨大挑战。

近日,伦敦数学科学研究所 Andrei A. Stepanenko 教授与圣彼得堡 ITMO 大学 Maxim A. Gorlach 团队研究了一条由 N 个量子比特组成、仅含最近邻耦合的线性链,其中耦合强度 $J_m(t)$ 可实时控制且受到固定的能量预算约束。虽然动态调节耦合在实验上具有挑战性,但在超导量子比特架构中可通过引入失谐辅助比特来实现。团队研究了一个最简单且与量子通信密切相关的任务:将位于最左端的单个激发传输到最右端量子比特。借助对 QB 方法的改进,推导出满足能量约束的最优控制脉冲序列,首次明确给出了最近邻链的量子速度极限。结果表明,最短传输时间与链长 N 呈严格线性标度,不仅与量子自旋链的理论预期相符,也与“高斯波包以最大群速度在链中传播”的直观物理图像相呼应。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(金梦成)

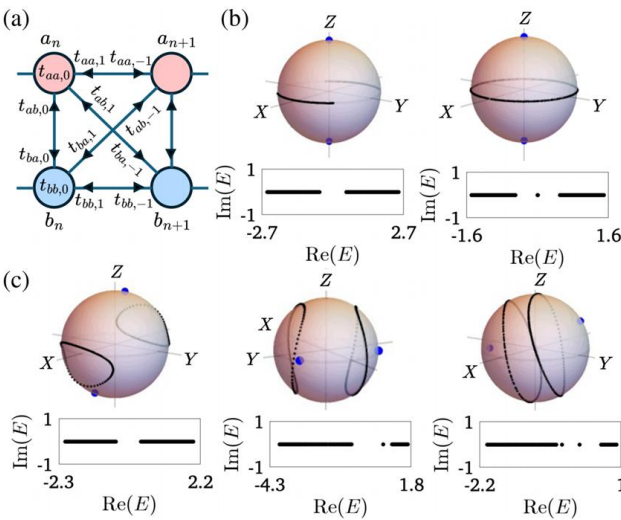


文章链接: <https://doi.org/10.1103/mxrq-7r14>

3、无对称保护一维系统边缘态的拓扑性质

近年来,能带拓扑成为凝聚态物理与光学的研究热点。在 Hermitian 系统中,体-边对应关系揭示了由体态定义的拓扑不变量与边缘态存在性之间的联系。一维情况下,只要系统满足手征、时间反演或粒子-空穴等特定对称,该对应关系即可归入 Altland - Zirnbauer 十重分类框架。对于非 Hermitian 系统,围绕零能量的边缘态也建立了拓扑不变量,但需进一步扩展到 38 重分类。然而,当体系缺乏上述对称时,传统拓扑指标便失去效力——尽管如此,不少非互易一维链依旧展现出在广泛参数区间内存在的边缘态。

近日,斯坦福大学范汕洄教授团队为无任何对称保护的一维非互易体系建立了普适的体一边对应规律。团队提出一种全新的绕数拓扑不变量,无需依赖时间反演、手征或 PT 对称性,便可以精准预测一条最近邻两能带链在开放边界条件下的边缘态。其方法是:将动量延拓至复平面、在里曼曲面上描绘两条能带轨迹,并锁定两处与体态本征向量简并相关的固定点(BED)。体态轨迹绕过这些 BED 点的次数直接对应边缘态条数,从而给出简洁的几何判据。当系统恢复手征或反演等对称时,该不变量自动简化为熟知的 Zak 相或手征绕数。更为关键的是,该工作展示了边缘态的产生或消失并不必依赖能隙闭合,而是由这两处简并点与广义布里渊区之间的拓扑关系决定。新不变量还能给出量化鲁棒性的度量:简并点到曲线的最小距离即对应破坏边缘态所需的最小参数扰动。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(金梦成)



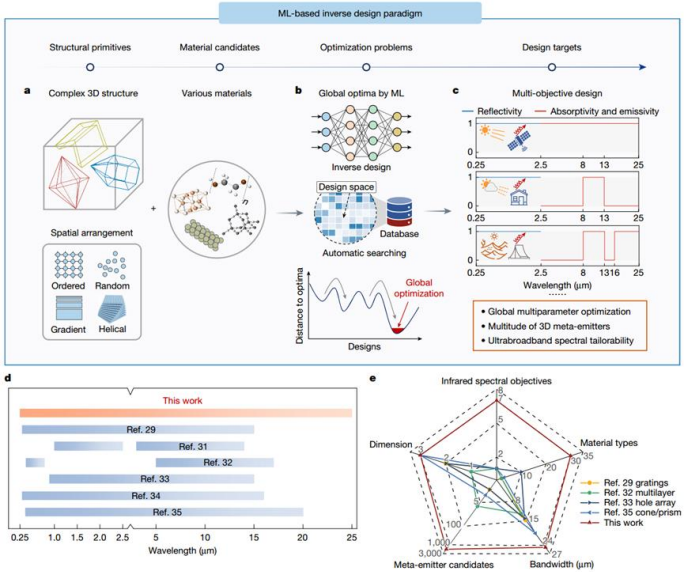
文章链接: <https://doi.org/10.1103/k77w-ft26>

4、通过机器学习的超宽带和波段选择性热超发射器

热辐射调控在能源技术、信息处理和热管理等领域具有重要应用价值。从热辐射器到热光伏系统,再到热伪装技术,精确的光谱工程一直是研究的核心挑战。传统设计方法依赖试错或经验性优化,受限于预定义的几何结构和材料组合,难以实现超宽带或多波段选择性调控。尽管机器学习(ML)在纳米光子学和超材料设计中展现出强大潜力,但如何实现复杂三维结构的高效参数化描述,并突破局部

优化陷阱，仍是亟待解决的难题。此外，现有方法多局限于二维平面结构，难以满足实际应用中多维、多功能集成的需求。因此，开发一种通用的逆设计框架，结合全局优化与材料多样性，成为推动热辐射器性能突破的关键。

针对上述挑战，上海交通大学周涵教授、张荻教授联合新加坡国立大学仇成伟教授和德克萨斯大学奥斯汀郑跃兵教授，提出了一种基于机器学习的通用逆设计范式，成功实现了超宽带和波段选择性热超材料辐射器（TMEs）的高效设计与优化。研究团队构建了一个包含 32 种三维结构基元、30 种候选材料的庞大数据库，并创新性地提出“三平面建模法”，将复杂三维结构分解为 11 个关键参数，解决了高维结构描述难题。通过结合条件生成对抗网络（cGAN）和自动编码器，该框架能够在稀疏数据下实现多参数全局优化，每秒生成 2500 种候选设计，远超传统优化方法。实验验证的七种 TMEs 表现出卓越性能：宽带辐射器（TME-1）在 $3 - 25 \mu\text{m}$ 波段发射率达 0.92；双波段选择性辐射器（TME-3）在第一（ $8 - 13 \mu\text{m}$ ）和第二大窗口（ $16 - 25 \mu\text{m}$ ）的发射率分别达 0.95 和 0.90，选择性比高达 5.52，较现有技术提升 2 倍。实际应用中，TME-3 涂层使模型屋顶温度较商用白漆降低 5.6°C ，在热带地区年节能达 75 MJ/m^2 。该工作不仅突破了热辐射器设计的传统瓶颈，还为全球气候变化下的城市热岛缓解、太空设备热管理提供了新材料解决方案，展现了机器学习在跨学科研究中的强大潜力。相关内容发表于《Nature》上。（张琰炯）



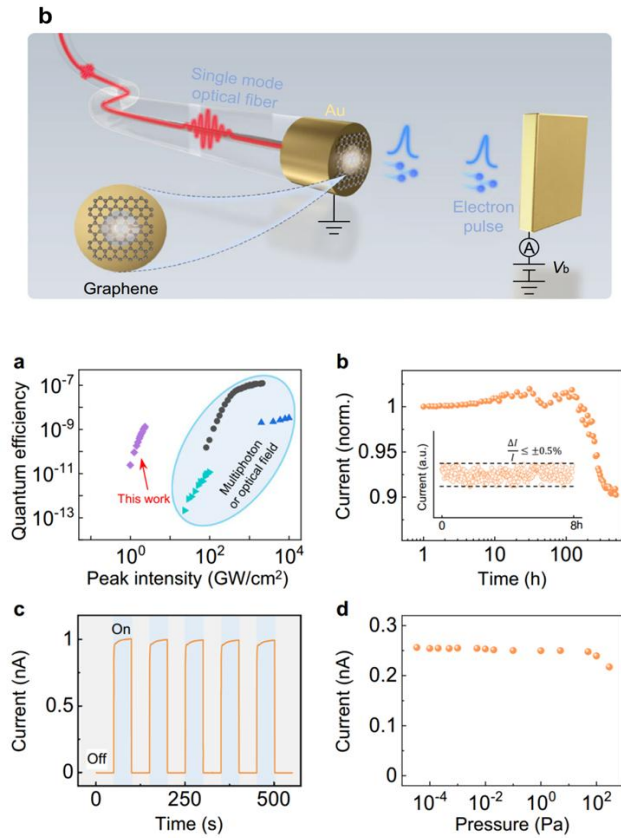
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09102-y>

5、高稳定光纤集成石墨烯超快电子源

近年来，超快电子显微镜因能在纳米尺度实现高时空分辨成像与谱学分析，广泛应用于材料相变、载流子动力学等前沿研究。然而，其性能受制于超快电子源的稳定性和寿命。目前主流的金属或低维材料阴极（金、钨、LaB6 等金属或碳纳米管、富勒烯等低维材料），多依赖强激光驱动的多光子发射或光场发射机制，需要极高功率密度（ $\sim 100 \text{ GW/cm}^2$ ）及超高真空环境（ $\sim 10^{-7} \text{ Pa}$ ）。基于紫外光电效应的方案虽能降低激光强度，但紫外光易引发材料电离和损伤，增加系统复杂性。这些苛刻的条件降低了系统稳定性，还导致设备连续工作时间短、维护成本高。石墨烯因其独特的热载流子动力学，具备超快热化、能量上转换特性，在电

子温度高达数千 K、晶格温度依旧较低条件下，可实现高效、低损耗的电子发射，展现出作为新型超快电子源的巨大潜力。

近日，北京大学物理学院凝聚态物理与材料物理研究所俞大鹏院士、刘开辉教授、洪浩特聘副研究员与上海交通大学戴庆教授合作，利用将石墨烯集成于光纤端面的新结构，有效结合了石墨烯的超快热电子发射机制与光纤稳定单模激发优势，成功制备出在常规真空下即可长期稳定运行的超快电子源。该电子源在相对较高的环境压力下（高达 100 Pa），仅用较温和的激发功率（约 1 GW/cm²，红外激光），就可实现超短电子脉冲（脉宽约 80 fs）、高稳定性（8 小时内波动 $\leq \pm 0.5\%$ ）、长寿命（工作 500 小时束流 $\geq 90\%$ ）的超短电子脉冲，核心参数相较传统超快电子源提高 1-2 个量级。该紧凑型电子源已成功集成到商用电子显微镜中，实现了时间分辨成像和光谱学，并表征了 CdSe/ZnS 量子点薄膜的稳态和时间分辨阴极发光谱。这种基于石墨烯-光纤的超快电子源为推动时空分辨真空电子仪器的发展提供了有前景的解决方案。相关内容发表于《Nature Communications》上。（侯玥盈）



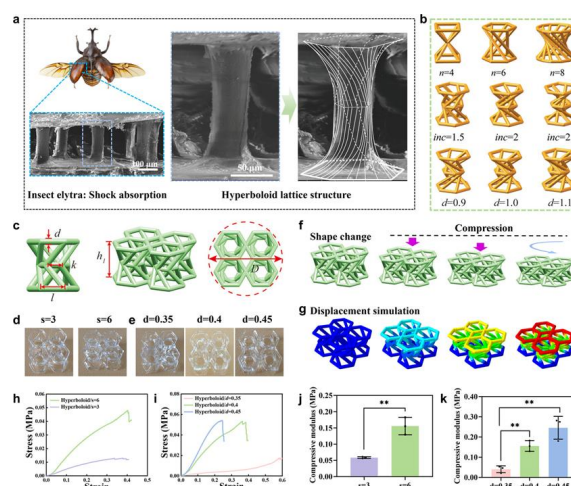
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60915-x>

6、用于软骨重塑过程中冲击吸收和应变调节的仿生双曲面力学超材料

自然界中，微结构的精妙设计赋予了生物材料远超本体材料的优异性能。昆虫鞘翅作为典型代表，其复杂的层级微结构使其在轻质高强的同时，具备出色的减振与缓冲能力，成为开发新型功能材料的重要仿生模板。与此同时，人体关节组织

本身也是一种典型的层级结构，软骨与骨组织协同承受着高强度冲击与复杂变形。然而，受限于缺乏对生物力学微环境的有效适配，目前的组织工程支架普遍存在机械性能单一、结构功能分区不足等问题。因此，开发兼具良好力学性能与微环境调控能力的多功能支架，已成为骨软骨修复领域亟待突破的关键技术瓶颈。近年来，仿生超材料结合 3D 打印技术的发展，为实现结构与功能一体化的组织工程支架提供了新的思路和技术路径。

近日，郑州大学李小盟副教授、日本国立材料科学研究所陈国平教授、华中科技大学王江林教授等团队合作，受昆虫鞘翅微结构启发，创新设计了一种具备“压缩—扭转”耦合效应的双曲面力学超材料。该结构能够高效地将动态载荷转化为应变能，实现高应变弹性变形。进一步地，研究团队将超双曲面晶格结构与经典的网格结构集成，并填充 GelMA 水凝胶，构建出一种力学性能高度匹配关节组织需求的定制化骨软骨支架。在动态机械刺激培养条件下，超双曲面区域通过“压缩—扭转”变形产生高应变，显著促进了干细胞的软骨分化，而下方刚性更强、变形较小的网格区域则有利于干细胞的成骨分化。在兔骨软骨缺损模型中，基于超双曲面结构的减振支架通过调控 NF- κ B 信号通路和钙信号通路，显著提升了软骨与骨组织的整体协同修复效果。这种兼具减振与应变调控功能的超材料设计，在复杂组织再生领域展现出巨大应用潜力。相关工作发表在《Advanced Materials》上。（孙嘉鹏）



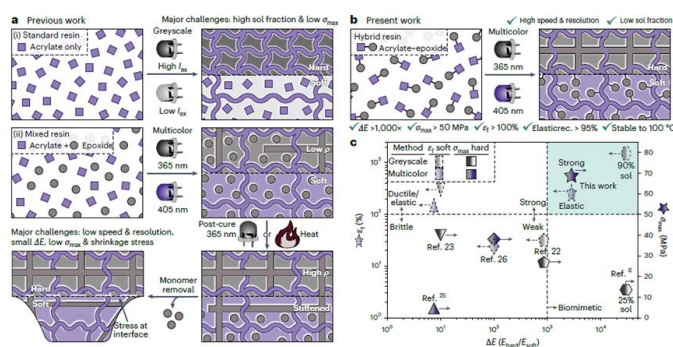
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202503183>

7、用于波长选择性多材料 3D 打印的环氧-丙烯酸酯混合树脂

自然界中的结构往往由硬软材料以精确空间布局组合而成，赋予其优异的力学性能，单一材料难以实现。仿生多材料结构的 3D 打印因此成为研究热点，但当前方法受限于构建速度慢、结构不稳定等问题。实现高性能多材料打印需满足八项关键指标，包括打印速度、低残留、软硬材料间超过 1000 倍的刚度差 (ΔE)、高强度与高弹性、热/光稳定性及高分辨率力学梯度等。现有策略如拓扑优化、多喷嘴挤出、多槽或多光谱立体光刻等，尚未全面满足这些要求。其中，灰度数字光处理(DLP)打印可通过调控光强局部控制交联度，已实现较高 ΔE ，但存在高残留和软区稳定性差的问题。多波长打印通过利用不同波长驱动不同光化学反应，赋予树脂光谱响应性，具备局部调控材料性能的潜力，然而受限于环氧固化效率低、分辨率和速度不足等因素。前人尝试虽提升了构建速度与 ΔE ，但仍需后处

理，且打印结构易脆化。

近日，德克萨斯大学奥斯汀分校的 Zachariah A. Page 团队，通过引入包含丙烯酸-环氧混合单体和紫外吸收型光敏剂的树脂，突破了多波长 DLP 3D 打印中的关键技术瓶颈。该混合单体显著降低了未反应小分子的残留（溶胀组分），同时提升了软硬材料间的刚度差（ ΔE ）；而光敏剂则增强了对不同波长光的选择性响应，并加快了环氧的聚合速率，从而提升了打印速度和多材料的空间分辨能力。在实验中实现了高达 1.5 mm/min 的打印速度，溶胀组分低于 2.5 wt%，软硬材料间刚度差达约 3000 倍（从 0.6 至 1700 MPa），硬材料强度约为 69 MPa，软材料应变 ϵ_f 超过 250%，弹性回复率达到或超过 90%，在 100% 应变下的滞后损耗低于 4%。此外，材料在强紫外照射（360 J/cm²）和高温（超过 100 °C）下表现出优异的稳定性，且机械梯度可分辨至约 200 μm 。作者进一步展示了该策略的实用性与高精度，成功打印了仿生结构，如用于缓冲的硬质螺旋弹簧结构（模拟脊椎）与实现平稳运动的柔性关节（模拟人膝关节），同时构建了可拉伸电子器件，通过大 ΔE 实现局部应变的精准调控。相关工作发表在《Nature Materials》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-025-02249-z>

（来源：两江科技评论）