

超材料前沿研究一周精选



2026 年 7 月 20 日-2026 年 7 月 26 日

索引:

- 1、高阶光子简并实现连续谱束缚态的拓扑重构
- 2、光子晶体中基于辐射损耗的非厄米点隙观测
- 3、室温声子聚焦
- 4、外尔半金属 NbAs 纳米线的表面主导输运——下一代互连材料
- 5、键序波驱动金属有机框架中的光诱导隐藏态
- 6、拓扑绝缘体中的隐性耗散：局域散粒噪声驱动的近场辐射机制
- 7、受龟壳启发超材料中的拓扑编排多物理能量控制
- 8、拓扑半金属中的可逆层状/非层状相变

1、高阶光子简并实现连续谱束缚态的拓扑重构

在开放式平面光子系统中抑制辐射损耗，是现代纳米光子学实现超高品质因子共振的关键，可显著增强光-物质相互作用，提高光谱选择性，并促进非线性和量子光学过程。近二十年来，连续谱束缚态（BIC）凭借对称性保护或干涉相消机制，有效消除辐射泄漏，推动了超表面、光子晶体和介质谐振器在传感、激光、非线性光学及拓扑光子学中的发展。然而，传统 BIC 的品质因子及其随波矢的标度关系，受限于常规光子能带所允许的拓扑荷结构。对称保护型 BIC 通常携带由点群对称性决定的 ± 1 整数拓扑荷，偶然型 BIC 虽可通过结构调控引入额外拓扑荷，但其构型仍受能带拓扑限制，因此实验中的辐射抑制标度通常仅达

$Q \propto k^{-2}$ 至 k^{-6}
到 k^{-8} ，合并高阶拓扑荷后可提升至

。为突破这一拓扑上限，需要引入高阶光子简并。此类特殊拓扑奇点能够容纳更复杂的拓扑态，并在对称性破缺后释放和重构多个拓扑荷，为进一步增强辐射抑制提供新的自由度。

近日，中国科学院上海技术物理研究所的李冠海研究员团队联合纽约城市大学 Andrea Alù 教授和新加坡国立大学仇成伟教授，发现 Γ 点处的 E2 型二次简并能够为连续谱束缚态提供新的拓扑调控机制。通过有意打破单层全介质超表面的 C6 对称性，系统可实现多个整数及半整数拓扑荷的受控释放、反转与合并，从

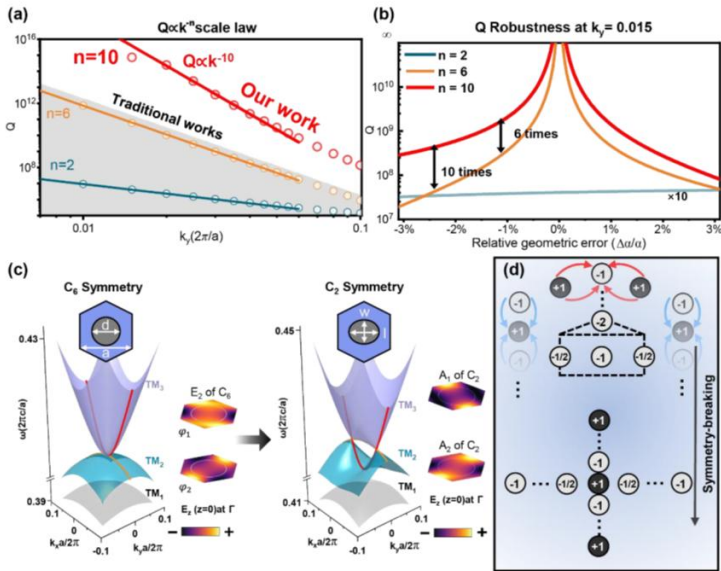
而突破传统合并型 BIC 框架，并引入可协同耦合的新拓扑荷族。随着更多拓扑荷

参与合并，辐射抑制标度由单个 ± 1 拓扑荷对应的 $Q \propto k^{-2}$ 提升至

$$Q \propto k^{-10}$$

，显著增强辐射相消能力和结构鲁棒性。实验上，该机制在自由空间中实现了超过 1.1×10^6 的品质因子，并保持约 3% 的几何尺寸容差。进一步地，研究构建了由 100 个像素组成的超表面阵列，利用超窄共振实现皮米级光谱分辨，并通过标定的 1.1×10^6 吸收谱线加以验证。该工作揭示了高阶简并驱动的新型 BIC 物理，为鲁棒超高 Q 光子器件和高精度自由空间光谱测量提供了通用途径。

相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-75967-w>

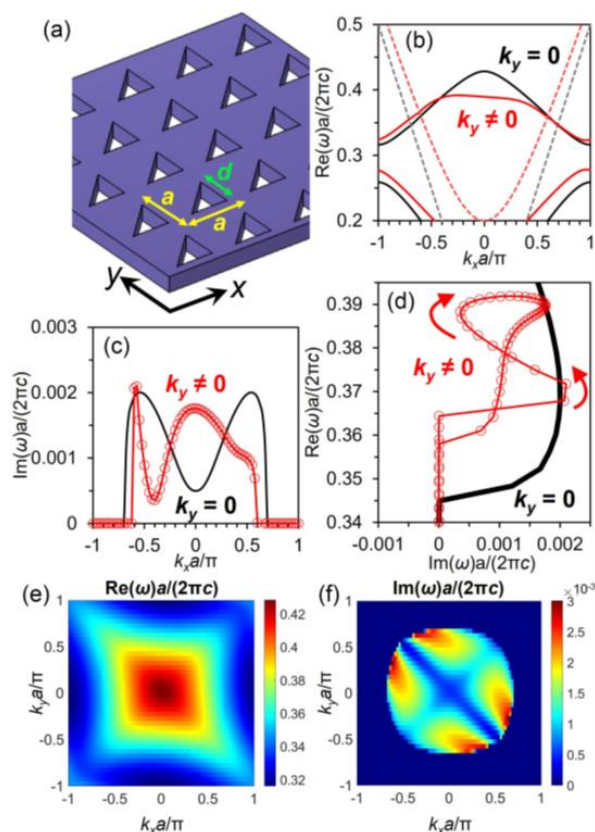
2、光子晶体中基于辐射损耗的非厄米点隙观测

传统凝聚态物理与量子物理主要研究由厄米哈密顿量描述的系统，因为可观测量通常要求具有实数本征值。近年来，能量不守恒的非厄米系统受到广泛关注，尤其是具有宇称-时间对称性的体系。此类系统虽为非厄米，却仍可呈现实本征值，并产生异常点等特征奇点。光子体系可通过增益、材料损耗或辐射损耗灵活构造复势，因此成为研究非厄米物理的重要平台。非厄米点隙是其标志性现象，表现为复本征值在复能量平面绕过某一点形成闭合回路，并由拓扑绕数表征。点隙还与非厄米趋肤效应密切相关，使周期边界下的体态在开放边界下转化为边界局域态。尽管相关现象已在光纤、波导、声子晶体、电路和机械系统中观察到，但直接测量光子晶体中的非厄米点隙仍十分困难，因为这需要精确提取复本征频率，而材料损耗通常导致较低 Q 因子，从而限制了实验观测。

近日，东京科学大学的 Yuto Moritake、Masaya Notomi 团队，利用一种基于辐射损耗的非厄米光子晶体，实现了非厄米点隙（NHPG）的直接实验观测。辐射损

耗可通过结构设计进行调控，从而控制复频率的虚部，并使体系保持相对较高的品质因子。该方法适用于广泛使用的无吸收硅薄膜光子晶体。作者还开发了一套能够沿动量空间中任意路径测量光子能带的实验系统。实验结果揭示了光子晶体中非厄米点隙对应的复频率闭合回路，并通过复平面中回路旋转方向的反转，实现了非厄米拓扑的反转。该研究表明，辐射损耗工程为在无需增益介质和非互易机制的条件下，直接测量和调控纳米光子体系中的复光子能带结构及体态点隙拓扑提供了一条切实可行的途径。

相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/vsx1-17c1>

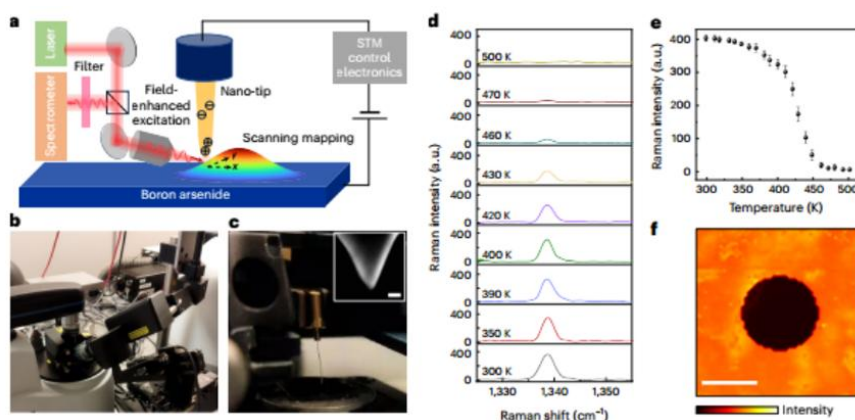
3、室温声子聚焦

在固体中，热量主要由声子——晶格振动的量子化模式——携带。经典热传导理论通常认为，声子经过频繁散射后会向各个方向扩散，使热点周围形成连续、近似圆形的温度场。然而，声子同时具有波动性：当散射足够弱时，不同传播方向上的声子会因晶体色散关系而发生空间汇聚，使热流沿特定晶向集中传播，形成类似光线聚焦的“声子聚焦”现象。由于室温下声子数量增加、声子—声子散射显著增强，这种波动型热输运过去仅在 1.8 – 3.6 K 的极低温环境中被观察到。如何在室温下保持非平衡声子的长距离传播，并直接观测其对温度场的影响，是热输运领域长期存在的挑战。实现室温声子聚焦不仅能够突破傅里叶扩散传热框架，还有望使热流像光一样被定向引导，为芯片热点管理、声子器件及量子信息技术提供新的物理基础。

近日，美国加州大学洛杉矶分校胡永杰教授团队以具有约 $1300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

超高热导率的立方砷化硼（BAs）为研究对象，开发了基于针尖增强拉曼光谱的纳米温度成像方法：利用金纳米针尖在隧穿结处产生局域焦耳热，并通过表面单分子层的热脱附变化，重建纳米热点周围的温度分布。实验首次在室温 BAs 中观察到清晰的射线状温度图案，其中（111）晶面呈六重对称聚焦结构，声子射线在 300 K 下仍可传播约 250 nm；升温至 400 K 后，图案逐渐向经典扩散型温度场过渡。第一性原理和全散射矩阵玻尔兹曼输运模拟表明，BAs 虽具有宏观各向同性热导率，但其倒空间等频面具有显著方向性，大量群速度集中的非平衡声子优先沿高对称晶向传播，从而产生聚焦效应。团队进一步预测并实验验证了晶向依赖的输运对称性：（111）、（100）和（110）表面分别呈现六重、八重和四重聚焦图案。研究还发现，聚焦会重新分配空间热导，使特定方向上的局域热导甚至超过均匀弹道输运极限。该成果首次证明室温下热声子仍可表现出显著的波动性和晶体对称性，为定向调控纳米热流、构筑声子超结构以及操控声子与电子等载流子的耦合提供了新路径。

相关内容发表于《Nature Physics》上。（张琰炯）



文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41567-026-03335-y>

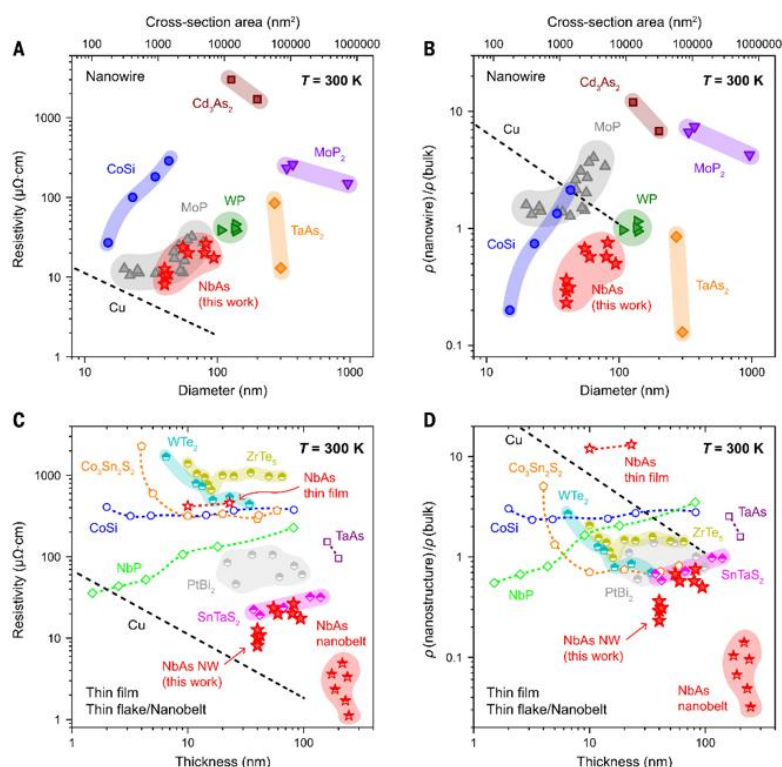
4、外尔半金属 NbAs 纳米线的表面主导输运——下一代互连材料

随着现代集成电路持续微缩，传统铜互连正逼近其物理极限。当互连线尺寸低于电子平均自由程时，铜的电阻率会因表面和晶界散射显著升高，进而带来电阻-电容信号延迟和动态功耗增加，限制芯片性能。相比钴和钌等尺寸效应较弱金属，拓扑半金属因具有受拓扑保护的导电表面态，成为了极具潜力的替代材料。理论研究已预测 Weyl 半金属和多重费米子半金属在纳米尺度具有可观的表面态输运，但在实际互连相关尺寸上，仍缺乏证明其优越电阻率缩放行为的实验证据。砷化铌（NbAs）是一种 I 型 Weyl 半金属，虽然此前已有 CVD、MBE 和 FIB 加工等制备尝试，但这些方法在尺寸控制或晶体质量方面仍受限制。为此，如何制备高质量 NbAs 纳米线，并在互连相关尺度下验证其优越电阻率是其能否走向应用的重要问题。

近日，康奈尔大学的 Judy J. Cha 教授课题组通过热机械纳米压印技术（TMNM）成功制备出了直径最小达到 40 nm 的单晶外尔半金属 NbAs 纳米线。该直径下，其平均室温电阻率为 $10.5 \pm 1.9 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ，较最佳块体单晶降低约 70%，并比其多晶原料低一个数量级。密度泛函理论计算和 Shubnikov-de Haas 振荡分析表明，纳米线与块体单晶的化学势差很小，远不足以通过体载流子变化解释上述电

阻率降低，其输运特征主要来自费米弧表面态，寿命约比体载流子寿命长两个数量级。进一步研究表明，NbAs 纳米线的平均击穿电流密度高达 $46.3 \pm 20.3 \text{ MA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，且具有良好的空气稳定性（自钝化氧化层）和较高热导率（单晶面内约 $110 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）。与电阻率随尺寸减小而升高的铜、钨和钴不同，NbAs 呈现相反的尺寸缩放趋势。该研究表明，拓扑半金属可以在具有表面氧化和粗糙度的实际纳米线中实现，有望超越当前铜基互连所面临的性能极限，成为下一代互连材料。

相关工作发表于《Science》上。（侯玥盈）



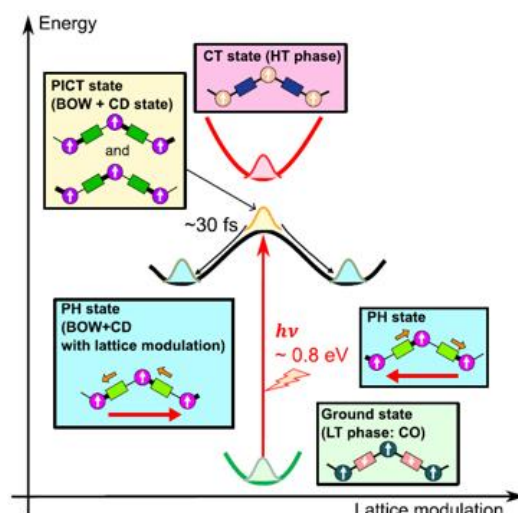
文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adx3027>

5、键序波驱动金属有机框架中的光诱导隐藏态

周期性电子序，例如电荷序（charge order, CO）、电荷密度波（charge-density wave, CDW）和键序波（bond-order wave, BOW）等，是低维量子材料的重要物理现象。理解这些有序态的熔化与恢复动力学，对于揭示伴随反演和移动对称性破缺的相形成机制至关重要。近年来，光激发熔化有序态得到了广泛的研究，但受实验时间分辨率限制，有序态的形成动力学仍不清楚。现有的时间分辨电子衍射技术只能在较慢时间尺度上捕捉 CDW 的建立过程。无法通过热平衡获得的光诱导隐藏态（PH state）是重要的非平衡态，其中反演对称性破缺状态与铁电性、非线性光学和自旋-轨道输运密切相关，尤其受到关注。此前强太赫兹场已在 SrTiO₃ 和有机 CO 系统中诱导出瞬时的隐藏态，其特征时间通常为数百飞秒至皮秒，但纯光激发下的形成过程仍有待研究。金属有机框架（MOF）因具有柔性配位网络和带电荷转移特征的给体-受体（DA）结构，为研究这一问题提供了平台。近日，东京科学大学的 Tadahiko Ishikawa 助理教授课题组、名古屋工业大学的 Akira Takahashi 教授课题组和东北大学的 Shinichiro Iwai 教授课题组合作，

结合飞秒泵浦-探测、时频分析和模型计算，研究了 DA 型 MOF $(\text{NPr}_4)_2[\text{Fe}_2(\text{Cl}_{12}\text{An})_3]$ 中 PH state 的形成过程，发现该 PH 态是在约 30 fs 内由 BOW 驱动的晶格调制稳定下来的亚稳极性态。 $(\text{NPr}_4)_2[\text{Fe}_2(\text{Cl}_{12}\text{An})_3]$ 具有层状结构，低能电荷自由度被有效限制在准一维链中。室温下，约 0.8 eV 光激发首先将具有反演对称性的低温相 CO 态直接驱动至光诱导电荷转移 (PICT) 态。PICT 态由 BOW 和非长程振幅有序的电荷不均匀化组成，但此时尚未发生晶格调制。瞬态反射率光谱随后出现额外吸收带，其零点能量在约 30 fs 内移动，表明 PICT 态经晶格弛豫转变为 PH 态。小波分析结果显示，约 500 cm^{-1} 的成分在早期占主导，随后谱权重转移到约 600 cm^{-1} ，证明 PH state 形成时伴随电子-晶格耦合。模型计算进一步表明，光激发态从键长交替中获得的电子能量增益显著增强，晶格弛豫打破两个简并 BOW 构型之间的平衡，最终形成具有均匀键交替和破缺反演对称性的 PH 态，该状态具有 Rice - Mele 型电子铁电性，其极化、自旋极化电流和晶格调制相互耦合。该工作首次在实验上研究了 PH 态的形成动力学，并证明 DA 型 MOF 为稳定不同的 PH 状态、设计功能量子相以及未来的直接超快结构探针和外场控制提供了路径。

相关工作发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（侯玥盈）



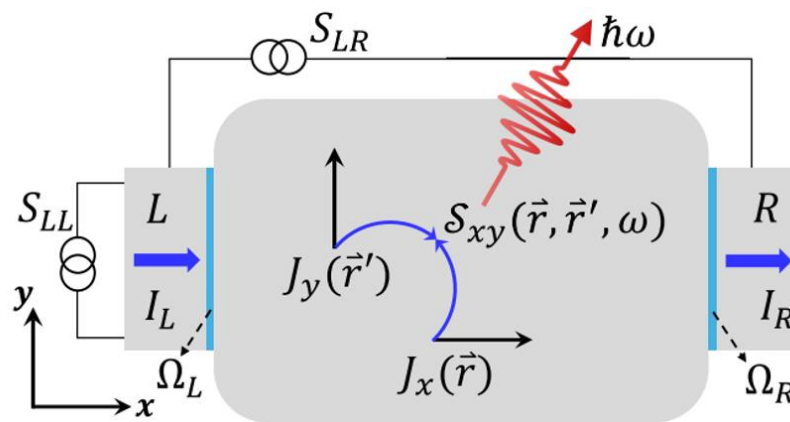
文章链接: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/x43y-61c1>

6、拓扑绝缘体中的隐性耗散：局域散粒噪声驱动的近场辐射机制

拓扑绝缘体因其具有受拓扑保护的边缘态而被认为能够实现低耗散甚至无耗散的电子输运，在自旋电子学、量子信息以及低功耗器件领域具有重要应用价值。传统观点认为，拓扑保护能够抑制背散射，因此量子霍尔态和量子反常霍尔态中的耗散主要来源于外部接触区域，而体系内部应保持理想无损。然而，近年来的实验与理论研究逐渐表明，即使在电导保持量子化、纵向电阻接近于零的情况下，拓扑体系中仍可能存在局域能量耗散现象。这说明仅依靠宏观输运参数无法完整描述拓扑器件中的能量损失过程，需要建立能够揭示空间分布信息的新型耗散机制。由于耗散过程与电流涨落密切相关，量子散粒噪声成为研究微观能量交换的重要工具，但传统测量通常关注引线之间的整体噪声，难以捕捉隐藏于局域区域内的涨落行为。因此，探索局域量子涨落如何诱导非局域耗散，对于理解拓扑电子器件中的真实能量传输机制具有重要意义。

近日，深圳大学的许富明教授、王健教授研究团队，提出了一种基于局域散粒噪声的拓扑体系隐藏耗散机制，揭示了即使不存在背散射和非弹性散射过程，拓扑绝缘体内部仍可通过电磁环境产生能量损失。研究利用非平衡格林函数方法，将空间分辨的局域电流涨落与电磁场中的谱庞廷矢量建立联系，证明有限频率局域散粒噪声能够激发近场电磁辐射，并通过具有耗散性的外部环境转化为不可逆热损失。进一步地，该研究在具有不同陈数区域的量子霍尔和量子反常霍尔结构中验证了这一机制，发现当不同拓扑边缘态发生空间 • • 11 重叠时，即使整体散粒噪声消失，局域噪声仍然存在，并形成可被扫描近场显微技术探测的能量“热点”。此外，该研究提出了一种基于对称性的耗散抑制方案，通过引入守恒的自旋轨道自由度，使不同边缘态保持内部正交，从而避免态间重叠并消除局域噪声来源。该成果不仅完善了拓扑体系中耗散产生机制的理解，也为未来低损耗拓扑电子器件的设计和诊断提供了新的理论依据。

该文章发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



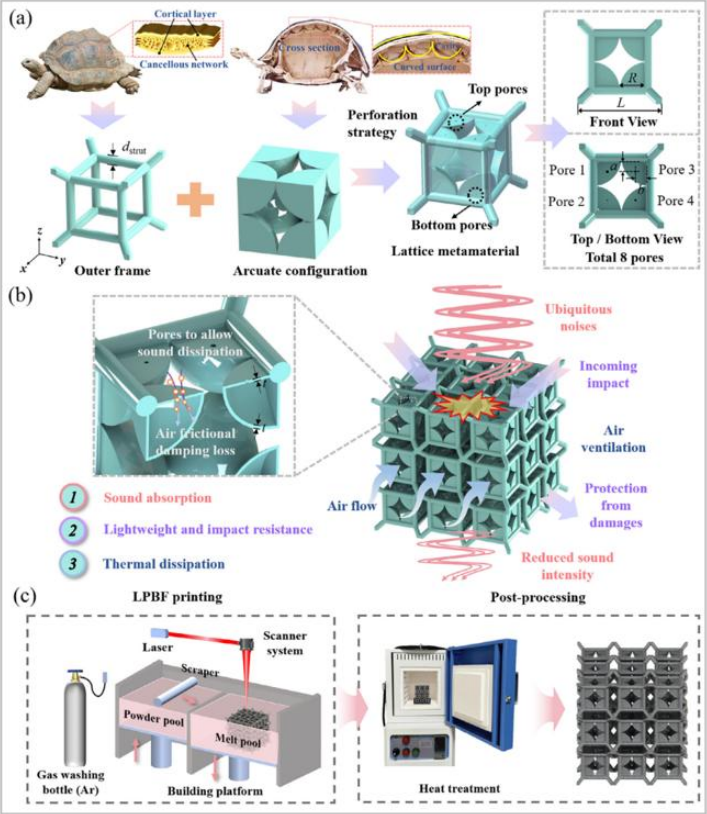
文章链接: <https://doi.org/10.1103/drhy-gkr1>

7、受龟壳启发超材料中的拓扑编排多物理能量控制

随着先进制造技术和增材制造的发展，仿生结构设计逐渐成为构筑高性能人工材料的重要策略。自然界中的生物结构经过长期演化，往往能够在复杂环境下实现多种功能的协同。然而，现有仿生超材料大多集中于单一性能优化，难以同时满足现代工程领域对于力学承载、声学调控以及热管理等多物理功能的综合需求。传统结构设计中，承载结构通常依赖高强度致密材料，而吸声结构则主要依靠多孔材料，两者之间存在明显的性能矛盾。近年来，金属泡沫、夹芯结构以及梯度阻抗结构等方法尝试融合力学与声学性能，但仍受到吸声频带窄、结构调控机制不足以及多功能协同设计困难等限制。因此，如何通过拓扑设计实现不同物理过程之间的有效耦合，构建兼具高强度、宽频吸声和热传输能力的新型超材料，成为当前结构功能一体化设计的重要挑战。

近日，大连交通大学的陈秉智教授和英国纽卡斯尔大学新加坡分校的 Li Xinwei 助理教授研究团队，提出了一种龟壳仿生多功能晶格超材料，通过拓扑驱动的混合耦合设计，将机械能吸收、声波衰减以及热传输路径集成于同一结构框架中。该结构利用弧形板条结构模拟龟壳外部承载骨架，通过曲面几何实现应力重新分布，降低局部应力集中，从而提升抗冲击性能；同时，通过引入分级孔隙结构和微孔谐振单元，使内部空间形成多尺度声学耗散网络，实现宽频范围内的高效吸

声。实验结果表明，该结构具有优异的综合性能，其单位质量压缩吸能能力达到较高水平，并能够在较宽频段保持接近完全吸声状态，即使经历较大压缩变形后仍能维持稳定的声学性能。该研究进一步提出了弱耦合、强耦合以及混合耦合的多功能超材料设计框架，揭示了拓扑结构在协调不同物理过程中的关键作用，为未来轻量化、防护、降噪以及热管理一体化工程结构的发展提供了新的设计范式。该文章发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）

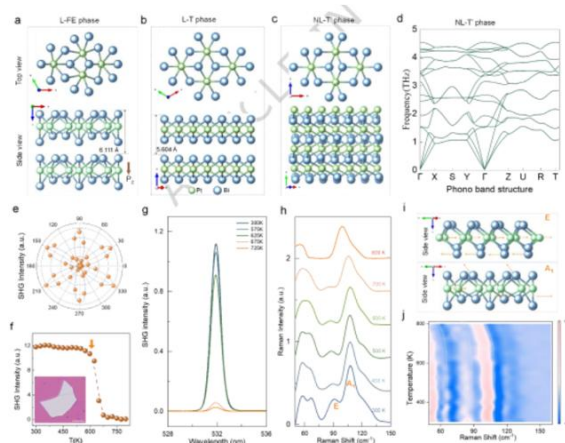


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.74125>

8、拓扑半金属中的可逆层状/非层状相变

从 Landau 对称性破缺理论到现代拓扑物态理论，人们认识到，材料在不同相之间的转变不仅能够改变晶体结构，还会重塑电子结构、磁性、光学和输运等一系列物理性质。近年来，以二维范德华材料为代表的层状材料因具有强面内共价键和弱层间范德华作用，成为相变研究的热点。例如，MoTe₂ 等材料能够在不同层状晶相之间实现电学或光学性质调控，但这类相变通常发生在相同层状键合网络内部，并不会改变材料层间相互作用方式。相比之下，在保持化学组成不变的条件下，实现层状结构与非层状结构之间的可逆转变，不仅需要突破层间键合重构带来的巨大能垒，还涉及晶体对称性、化学键类型以及拓扑电子态的协同演化，因此长期以来被认为极具挑战。一旦能够实现这种层状/非层状可逆相变，就意味着材料的维度特征、层间耦合方式以及拓扑性质都能够通过外场进行动态调控，从而为新型相变存储器件、拓扑电子器件以及多功能量子器件提供全新的设计思路。因此，探索层状与非层状材料之间的可逆相变机制，并揭示结构演化与拓扑量子态之间的内在联系，已经成为当前低维量子材料领域的重要研究方向。近日，北京理工大学周家东教授、郑守君副教授、蒋伟教授与三峡大学杨柳博士等人合

作,在拓扑半金属 PtBi_2 中首次实现了层状铁电相 (L-FE) 与非层状相 (NL-T') 之间的可逆相变,突破了传统层状材料相变局限于相同键合网络的限制。研究人员通过温度依赖二次谐波 (SHG)、拉曼光谱、电输运测试以及高角环形暗场扫描透射电子显微镜 (HAADF-STEM) 等实验,发现外加电场产生的焦耳热能够诱导 PtBi_2 发生层状/非层状相变,并在器件中形成稳定可逆的电阻迟滞回线。原子分辨 STEM 进一步揭示了这一特殊相变的微观机制:部分 Pt 原子从原有层内迁移至层间范德华间隙,与相邻 Bi 层重新形成共价键,实现了“层内分裂—层间重构 (intralayer splitting and interlayer reconstruction)”的全新结构演化模式,使材料由 Bi-Pt-Bi 三层结构重构为 Bi-Pt-Bi-Pt 四层结构,同时保持化学组成完全不变。第一性原理计算进一步证明,两种结构具有接近的自由能,仅相差约 3 meV/化学式单元,因此能够稳定共存并实现可逆切换;与此同时,层状/非层状相变还伴随着拓扑性质的重构,使材料由具有层状边界态的自旋霍尔绝缘体演化为强拓扑绝缘体,实现了拓扑不变量和表面态的同步切换。研究团队据此提出了基于层状/非层状拓扑异质结构的拓扑态开关新概念,为利用结构对称性和层间键合调控拓扑量子态提供了全新的物理机制。研究成果发表在《Nature Communications》上,(张琰炯)。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-75893-x>
(来源: 两江科技评论)