

超材料前沿研究一周精选



2025 年 12 月 22 日-2025 年 12 月 28 日

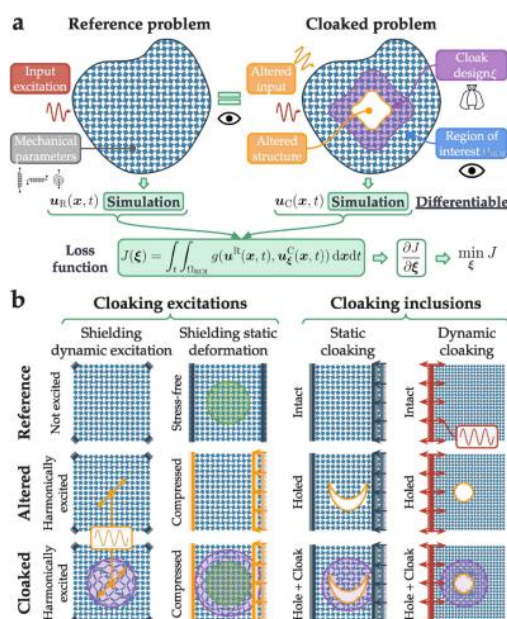
索引:

- 1、非线性机械超材料隐身衣
- 2、受蛾翼启发的多功能超材料
- 3、声子晶体中的卫星狄拉克锥
- 4、外延 DySi₂ 中的声子：从块体到自组织纳米岛和纳米线
- 5、对称性驱动的人工声子介质
- 6、Kagome 超晶格调制的菱形多层石墨烯中的分数拓扑态
- 7、扭转 α -MoO₃ 的中红外手性和手性热辐射

1、非线性机械超材料隐身衣

隐身技术旨在使物体或特征对外部探测不可见，自 Pendry 等在光学领域开创变换光学方法以来，该概念已在多个物理领域成功推广应用。在线性系统中，基于坐标变换、拓扑优化或主动抵消等方法已实现声学、热学、弹性静力学及动力学等方面的隐身效果。然而，将这些进展扩展到非线性机械系统仍面临根本性挑战。非线性弹性本构关系不具备坐标变换下的不变性，主动方法依赖的格林函数在非线性的场中难以获取或求解，而数据驱动策略因响应强烈依赖于载荷路径且样本空间维度过高，计算上不再可行。因此，如何实现非线性力学响应的隐身，成为一个亟待解决的重要课题。

近日，美国哈佛大学的 Katia Bertoldi 教授研究团队提出了一种适用于非线性力学体系的隐身设计新策略，将隐身问题构建为一个行为模仿优化问题，其目标是在特定关注区域内复现目标结构的力学响应。该方法通过可微分仿真框架与基于梯度的优化算法相结合进行求解，无需依赖显式解析解或坐标变换。研究所采用的物理平台为由弹性耦合刚性单元构成的二维机械超材料，该材料能够承受大变形并考虑接触相互作用，其几何可调的非线性行为为隐身功能设计提供了丰富可能性。通过上述框架，研究系统设计了能够屏蔽外部激励、在材料内部创建无应力区域以及隐藏内部缺陷的隐身衣结构。实验与模拟结果高度吻合，验证了设计方法的有效性与可靠性。该研究为在振动隔离、嵌入式精密元件保护、软体机器人可编程变形等领域实现机械解耦与功能集成提供了新的设计范式与实现途径。该研究成果发表于《Advanced Functional Materials》。（刘梦洋）

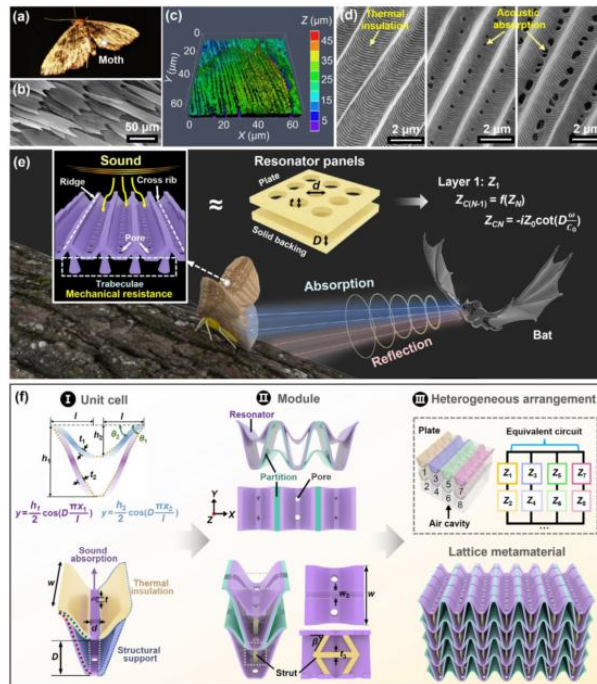


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202522895>

2、受蛾翼启发的多功能超材料

生物启发与仿生设计为构筑型材料提供了应对现代工程挑战的重要思路,增材制造技术的发展进一步推动了多功能仿生结构材料的设计与实现。尽管自然界中的生物材料常通过复杂异质结构实现优异性能,现有仿生结构多仍局限于单一功能,难以同时满足声学、热学和力学等综合需求。与此同时,噪声污染问题日益严峻,传统多孔或纤维吸声材料在中低频吸声能力、力学强度及安全性方面存在不足,促使研究者关注可通过结构设计实现性能调控的超材料。然而,现有超材料在宽频吸声与多功能协同方面仍存在局限。自然界中,夜行性飞蛾为躲避蝙蝠回声定位捕食,进化出具有分级多孔翅鳞结构的翅膀,可通过多重共振和热-黏滞耗散实现高效宽频吸声,同时兼具热绝缘功能。这种集声学、热学与结构性能于一体的生物设计为多功能仿生超材料的研究提供了重要启发。

近日,四川大学的陈英红教授、纽卡斯尔大学的 Xinwei Li 教授、新加坡国立大学 Wei Zhai 教授团队合作,受飞蛾翅膀多功能结构的启发,提出了一种将飞蛾翅鳞结构异质性与遗传算法拓扑优化相结合的仿生混合设计策略。通过三维打印制备的超材料不仅在形态上仿生飞蛾翅鳞的分级结构,而且在声学、力学与热学性能上实现了跨尺度协同,突破了传统周期性晶格结构在多功能集成方面的局限。研究构建了具有异质分布的吸声单元,模拟飞蛾翅鳞的梯度孔结构,从而激发多重共振模式协同作用,实现宽频高效吸声,其在 1000 - 6000 Hz 频段内的平均吸声系数达到 0.742。同时,该结构在大变形条件下表现出负泊松比特性,显著提升了压缩载荷下的能量耗散能力和抗冲击性能。此外,仿生聚合物-空气交替层状构型有效抑制热传导,使材料的有效热导率降低至 $30.2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。该研究在轻质结构中实现了宽频吸声、力学韧性与热隔离的高度集成,为防护与多功能工程材料的设计提供了新的范式。相关工作发表在《Advanced Materials》上。(刘帅)

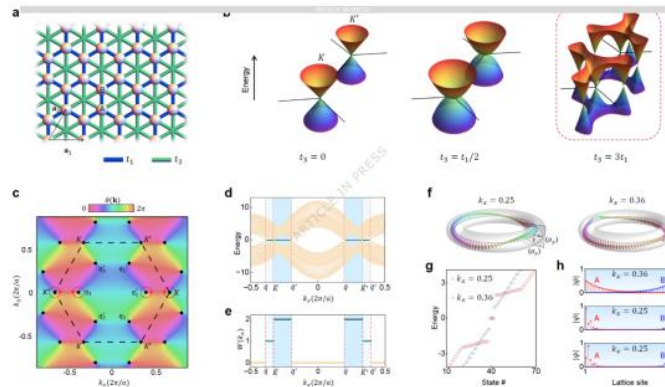


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202515350>

3、声子晶体中的卫星狄拉克锥

在石墨烯研究中，卫星狄拉克锥（satellite Dirac cones）是提出近二十年来一直难以实现直接谱学观测的理论预言。它通常与双层石墨烯中的三角翘曲效应相关。在该效应下，原本的二次狄拉克锥会演化为一个中心线性狄拉克锥，并在其周围产生三个额外的线性“卫星”狄拉克锥。然而，这一精细的谱结构对动量空间分辨率要求极高，长期以来难以实现直接谱学观测，从而限制了对其拓扑性质与输运效应的深入研究。

近日，武汉大学刘正猷院士、邓伟胤教授、陆久阳教授团队在可设计的声子晶体平台上取得了相关研究进展。研究人员不再将非最近邻耦合视为微小修正，而是通过结构设计显著增强第三近邻耦合，在单层蜂窝声子晶体中实现并直接观测到卫星狄拉克锥。更关键的是，卫星狄拉克锥重塑了动量空间的相位绕行结构，并在特定动量区域出现更高的拓扑绕数。据此，体系出现相较常规情形翻倍的零能边缘态，且这种动量依赖的体-边对应关系在实验中得到了验证。在此基础上，研究人员还通过在子晶格引入交错在位势打开带隙，构建了卫星谷结构，观测到多谷输运，并实现了一种具有“异常前向传播”特性的声学分束器。该工作提供了一种易于实现的拓扑能带工程机制，为探索新型拓扑相与多通道拓扑器件开辟了新路径，也将推动超材料中“超越最近邻”耦合效应的进一步研究。这一设计还有望进一步缩小到片上尺度，在鲁棒信息通信与粒子操控等方向具有应用潜力。相关研究发表于《Nature Communications》。（刘磊）

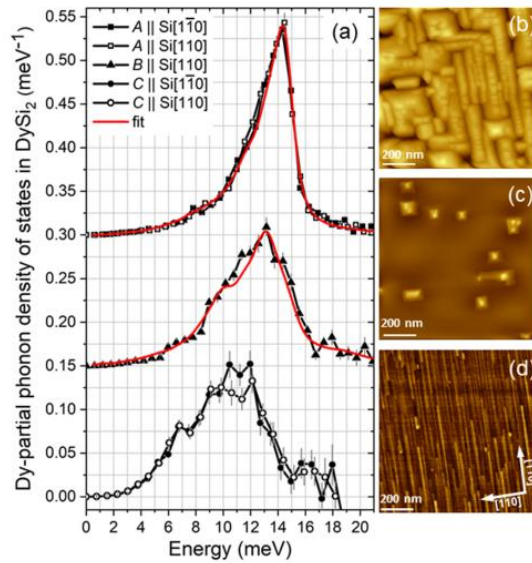


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67305-3>

4、外延 DySi2 中的声子：从块体到自组织纳米岛和纳米线

声子作为描述晶格动力学的核心准粒子，决定了材料的热导率、比热、熵以及声子—电子、声子—自旋等多体相互作用，是热电转换、纳米热管理、自旋电子学乃至量子信息器件中的关键物理基础。随着器件尺寸不断向纳米尺度缩小，表面与界面效应、应变场以及对称性破缺愈发显著，使得传统体材料中的声子色散关系和声子态密度发生明显重构。然而，由于实验手段受限，在真实纳米结构中系统、定量地刻画声子行为仍是一项巨大挑战。特别是在自组织纳米岛和纳米线体系中，晶体结构、表面重构与应变状态高度耦合，其声子特性不仅决定材料的稳定性和弹性响应，也直接影响其在纳米电子学和未来 CMOS 架构中的应用潜力。稀土二硅化物 (RESi2) 因其优异的金属性、良好的化学稳定性以及与硅技术的高度兼容性，长期以来被视为极具前景的纳米线材料体系。然而，尽管其电子结构和生长机制已被广泛研究，这类纳米结构中从体材料到纳米尺度转变过程中晶格动力学如何演化、纳米线真实的生长取向究竟为何，仍缺乏直接而有力的实验与理论证据。

针对这一关键科学问题，德国卡尔斯鲁厄理工学院 Svetoslav Stankov 博士研究团队与波兰克拉科夫波兰科学院核物理研究所 Przemysław Piekarczyk 教授团队合作，系统揭示了外延 DySi2 从体材料到自组织纳米岛与纳米线过程中声子行为的演化规律。该研究首次利用基于 ^{161}Dy 核非弹性散射的同步辐射技术，直接测量并解析了不同尺度下 Dy 原子声子态密度。研究发现，相较于体相 DySi2，自组织纳米岛中晶格明显“软化”，而这一效应在纳米线中被进一步放大，导致其热力学和弹性性质发生显著变化。通过第一性原理计算，团队进一步揭示了这种声子软化的微观起源：位于纳米岛和纳米线表面的 Dy 原子振动，以及纳米线之间 Si(001) 表面形成的 (2×4) 重构，共同主导了低能声子态的增强。尤为重要的是，该研究通过实验与理论的高度一致性，推翻了长期以来被广泛接受的“各向异性晶格失配模型”，明确指出 DySi2 纳米线并非沿传统认为的 $[11\ 20]$ 方向生长，而是沿受应变六方晶格的 $[0001]$ 方向延伸，其面内晶格常数与 Si(001) 表面高度匹配。这一发现不仅澄清了稀土二硅化物纳米线生长取向的长期争议，也为精确调控其声子行为、实现面向热管理、热电与量子器件的性能设计奠定了坚实基础，展示了以声子为核心的纳米结构功能工程的新范式。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰珂)



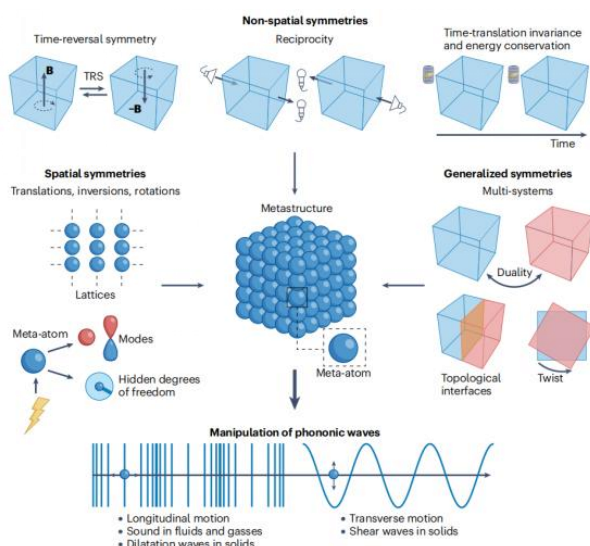
文章链接: <https://doi.org/10.1103/4r3t-tr77>

5、对称性驱动的人工声子介质

声子是材料中机械振动的准粒子，是声波与弹性波传播的基本载体；同时，它也主导着热输运等与能量扩散相关的现象。无论在日常生活还是工程技术中，声子效应都无处不在。对天然与人工介质中声子响应的深入理解与精准调控，在通信与隔离、能量收集与管理、传感与成像等领域具有重要意义。最新研究表明，在人工介质的微观与介观尺度上“工程化”不同类别的对称性（及其破缺），能够成为精确裁剪声学弹性动力学响应、实现高级波调控的强大工具。

正如皮埃尔·居里（Pierre Curie）在十九世纪末所指出的那样，对称性是理解自然现象物理本质的基础概念，尤其在波动与场的研究中更为关键。对称性不仅规定了系统“允许发生什么、禁止发生什么”，也直接约束守恒律与响应形式。因此，物理学家与工程师持续关注系统中对称性的存在与否：一方面用以揭示材料与结构的内在规律，另一方面也将其作为调控波传播的“设计旋钮”。

近日，纽约城市大学 Andrea Alù 教授和德克萨斯大学 Michael R. Haberman 教授联合团队综述了基于对称性原理设计人工声子介质（即声子晶体与超材料）的最新研究进展。从定制化的空间对称性破缺出发，团队探讨了其与时间对称性在非互易与非守恒现象中的相互作用，并阐述了融合多重对称性类别以实现奇异声子波传输的广义概念。最后，团队对基于对称性工程实现声子波高级调控的未来研究方向进行了展望。相关内容发表于《Nature Reviews Materials》上。（金梦成）

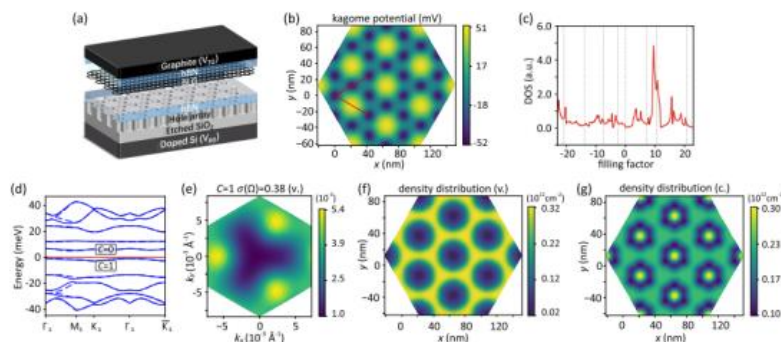


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41578-025-00860-9>

6、Kagome 超晶格调制的菱形多层石墨烯中的分数拓扑态

近年来,在扭曲双层 MoTe₂ 以及基于多层石墨烯的莫尔异质结构中实现的分数量子反常霍尔效应引起了广泛关注。这些在零磁场下出现的分数量子化霍尔平台源于一种被称为分数陈绝缘体的多体拓扑态,其为分数量子霍尔态在晶格体系中的零场类比。莫尔超晶格因能产生具有理想量子几何特性的孤立拓扑平带,已成为实现分数陈绝缘体的重要平台。然而,莫尔体系中平带的实现通常需要精确调控转角,并受到转角不均匀性及晶格弛豫的影响,因此寻找受无序影响更小、同样具备优良拓扑平带的替代平台具有重要意义。近期,通过在预图案化的介电衬底上集成二维材料并施加栅压来引入人工超晶格势的方法,为调控电子能带结构提供了新途径。其中,Kagome 晶格因其紧束缚模型中必然存在的平带而备受关注,但在天然 Kagome 材料中,平带往往远离费米面或与其他色散带共存。将人工 Kagome 超晶格与二维材料结合,有望为研究平带物理及衍生拓扑物态提供一个高度可控的新体系。

近日,上海科技大学的刘健鹏副教授研究团队提出,菱面体多层石墨烯与人工 Kagome 超晶格势结合可成为实现多种零磁场分数量子拓扑态的新平台。研究以伯纳尔双层石墨烯为例,通过结合现实器件模拟与实验测量,证实系统在超晶格常数与栅压构成的参数空间内能产生近乎理想的拓扑平带。这些平带具有非零陈数与优良的量子几何性质。精确对角化计算表明,当这些平带处于不同分数填充时,系统可涌现出包括分数陈绝缘体与复合费米液体在内的丰富拓扑相。此外,在三层石墨烯体系中还可能存在 Halperin 型分数陈绝缘态。该工作不仅为探索零磁场分数量子相提供了新途径,其理论框架也可推广至其他人工超晶格体系,用于设计具有特定物性的电子系统。该研究成果发表于《Physical Review Letters》。(刘梦洋)

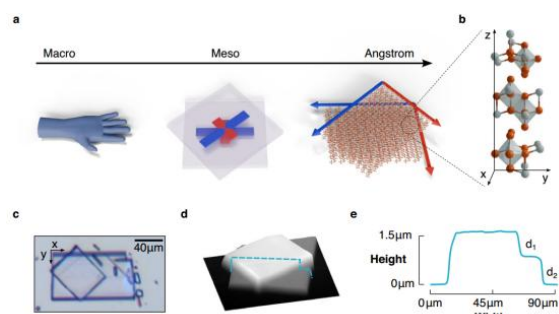


文章链接: <https://doi.org/10.1103/2lvs-prpj>

7、扭转 α -MoO₃ 的中红外手性和手性热辐射

在物理、化学与生命科学等多个领域中,“手性”这一几何属性扮演着至关重要的角色。尤其在中红外波段,光与物质的振动模和声子模发生强烈相互作用,使得中红外手性光成为分子构型识别、药物手性分析、生物传感等前沿研究与应用中的关键工具。然而,长期以来,中红外手性光源的获取一直面临严峻挑战。一方面,自然界中分子体系对圆偏振红外光的手性响应极其微弱,其圆二色性通常比非偏振吸收低数个数量级;另一方面,人工手性光源大多依赖复杂的三维超材料或超表面结构,不仅设计与制备成本高昂,还需要高分辨率光刻等精密加工手段,严重限制了其在大尺度器件和实际应用中的推广。同时,尽管热辐射在室温附近恰好覆盖中红外关键波段,但传统热辐射本质上是无偏振、无手性的,难以满足对偏振态与手性自由度的精确调控需求。如何在避免复杂微纳加工的前提下,实现中红外手性光,尤其是手性热辐射,已成为纳米光子学与红外光学领域亟待突破的重要科学问题。

针对上述瓶颈,ICFO (Institut de Ciències Fotòniques, 西班牙光子科学研究所) 的 Georgia T. Papadakis 教授研究团队近期系统提出并实验证明了一种无需光刻的中红外本征手性光与手性热辐射实现方案。研究团队利用层状范德华晶体 α -MoO₃ 在中红外波段天然存在的强烈面内光学各向异性,通过将两片未加工的 α -MoO₃ 薄片以特定角度进行扭转堆叠,成功打破反演-旋转对称性,从而在材料本身中诱导出稳健的本征手性。实验结果表明,这种扭转双层结构不仅在吸收谱中表现出显著的圆二色性,而且在热激发条件下能够直接发射具有圆偏振特性的手性中红外热辐射,首次在微米尺度的未图案化范德华体系中实现了“手性热辐射”。该研究从物理机制上揭示了:通过合理匹配上下层材料的双折射与吸收特性,并结合层厚与扭转角度的协同调控,可在不依赖极化激元或复杂人工结构的情况下,实现对热辐射偏振态的有效操控。该成果不仅显著简化了中红外手性光源的实现路径,也为未来发展大面积、低成本、可扩展的手性红外滤波器、热辐射源以及手性传感器件提供了全新的材料平台和设计思路。相关内容发表在《Nature communications》(张琰炯)。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66036-9>
 (来源: 两江科技评论)