

超材料前沿研究一周精选

2024 年 12 月 23 日-2024 年 12 月 29 日

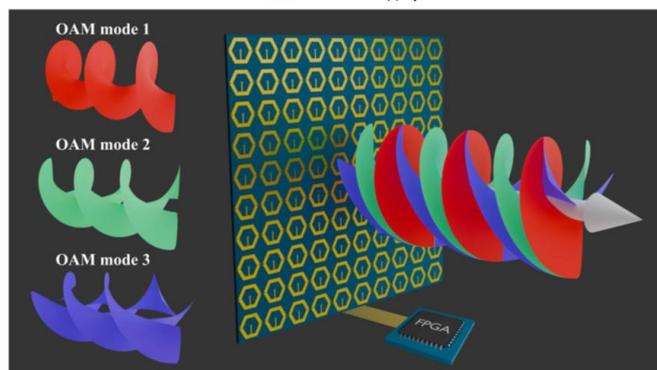
索引:

- 1 通过时空编码超表面动态产生多路复用涡旋光束
- 2 通过柔性超表面实现手势交互动态全息显示
- 3 全平带声子超材料
- 4 通过“2.5D”全碳 sp²/sp³ 混合界面实现超高效热传输
- 5 双相硅纳米线的热导率
- 6 具有可拆卸基元原子的可扩展和高隔离双通道可编程超构表面
- 7 由结构性能关系驱动的按需可编程力学超构材料

1 通过时空编码超表面动态产生多路复用涡旋光束

近年来，具有轨道角动量（OAM）的涡旋光束由于不同 OAM 模式之间的正交性而在通信领域引起了极大的关注。涡旋光束复用是空分复用技术之一，在无线通信系统的信道容量提升方面表现出巨大的应用前景。由于强大的电磁波操控能力，超表面逐渐成为一种流行的产生涡旋光束的方法，与传统方法相比，它具有结构更简单、馈电网络更简单、体积更小、性能更好的优势。作为可重构超表面的一个新分支，时空编码超表面通过引入一个可控的时间维度，表现出对电磁波谐波分量的强大调制能力。与传统的可重构超表面相比，时空编码超表面可以更精确地调控电磁波。通过控制时空编码超表面按照预先设计的时空编码序列周期性地切换，可以实现对谐波所需的复杂幅度调制。

近日，北京理工大学的司黎明副教授团队，提出了一种基于时空编码超表面的复用涡旋光束动态产生新策略，该策略能够对谐波进行准连续复杂幅度调制。作为概念验证，基于现场可编程门阵列控制器调控透射时空编码超原子，建立了一个用于产生具有自定义模式组成和功率分配的复用涡旋光束的超表面原型。由超表面产生的单个 OAM 模式为 1、2、3 的涡旋光束的模式纯度高达 0.93 以上。进一步验证了所生成的复用涡旋光束携带功率比为 1:1:1 的 (1, 2, 3) OAM 模式，功率比为 1:2:3 的 (1, 2, 3) 模式，以及功率比为 1:2:2:1 的 (-2, -1, 1, 2) 模式。所提出的空时编码超表面在 OAM 复用通信系统中具有巨大的潜力。相关工作发表在《Photonics Research》上。（刘帅）

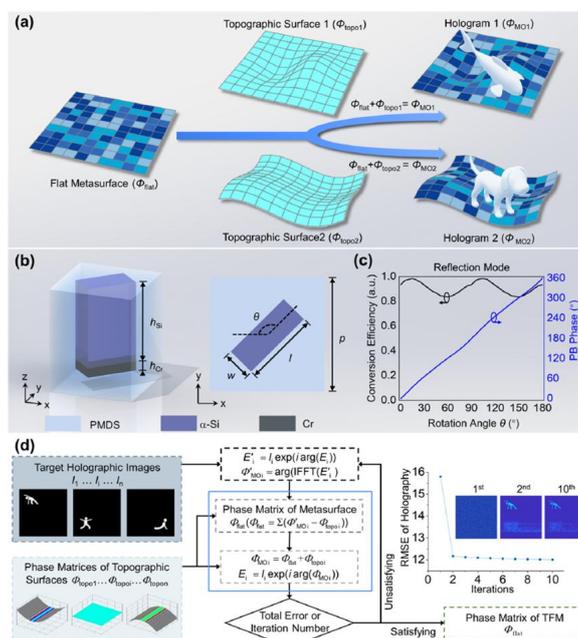


文章链接: <https://doi.org/10.1364/PRJ.543744>

2 通过柔性超表面实现手势交互动态全息显示

平面光学利用超薄超表面为电磁波调控创造了前所未有的可能性，促进了各种有前景的功能和应用的发展，包括紧凑型超透镜、高分辨率结构色、多功能全息术等。除了这些前沿探索之外，非平面和柔性超表面也已出现，具有更强大的光学操控能力和更广泛的应用前景。此外，柔性超表面还通过机械拉伸表现出主动可调性，从而由于周期变化而操纵超器件的光学特性。柔性超表面具有主动可调性和可重构性，在集成光学、自由曲面光学和可穿戴设备等高级应用中具有巨大潜力。然而，尽管有上述有希望的进展，但支持众多动态信息通道的编码自由度 (DoF) 仍然是一个重大限制。通常，以前的动态调谐方法通常显示两个或三个编码通道，而不涉及空间复用或同时编码多个光学参数。然而，不同条件之间有限的折射率偏移阻碍了可调功能和编码容量的扩展。此外，制造限制阻碍了像素级可调超表面在没有空间复用的情况下显示多通道光学图像。因此，当前的动态调谐机制在进一步提高调谐能力的编码自由度方面遇到了瓶颈挑战。

近日，武汉大学的李仲阳教授团队，提出了一种通过柔性超表面实现手势交互的方案，以扩展调谐能力的编码自由度。通过调节不同的表面形貌，充分探索了潜在的调谐自由度，可以动态显示/加密多达 16 个独立的全息图像，超过了最先进的调谐自由度。这种形貌灵活性可以通过手势触发、手动弯曲和其他大面积可重复控制方法进行交互调谐，以提取和显示相应的全息图像。这项研究将促进主动超设备创新，并提出在下一代交互式显示器、信息存储和加密以及可穿戴光学设备中的潜在应用。相关工作发表在《ACS Nano》上。（刘帅）



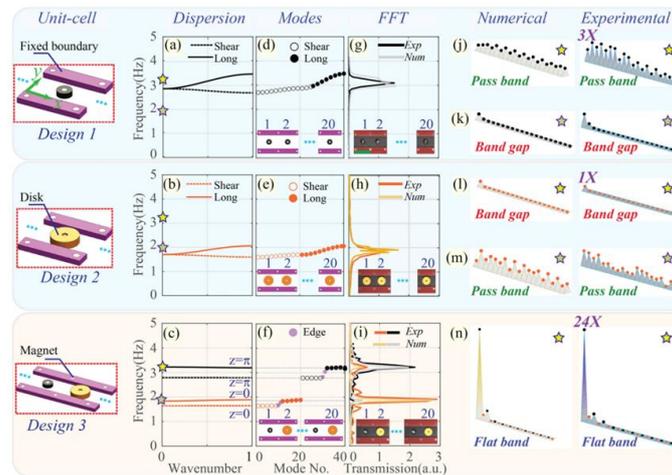
文章链接: <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c1356>

3 全平带声子超材料

能量局域可以通过多种途径实现，例如晶格缺陷、平带以及拓扑保护的界面模式。其中，平带因对应零群速度而独具特色，波能量高度局限在波源附近，不会传播。与缺陷或拓扑界面不同，平带不与有限晶格内的某个特定点、线、面或边界相关

联。最初，平带现象在电子领域被提出，随后扩展至电磁和声学领域。在光学中，平带可应用于增强光与物质的相互作用、光学逻辑运算、慢光传播、模式转换以及光捕捉和无失真成像。声学系统中的平带则具有隐身、透镜设计、波能量局限以及声波重定向等潜在应用价值。现有研究中已有多种声子平带的设计，例如：圆柱阵列、具有空气腔的六边形壳柱、二维弧形声子晶体、惯性放大的局部谐振超材料、耦合旋转子以及刚性框架支持的弹性板谐振器。然而，这些设计仅在部分声子能带中实现了平带，其余仍表现出显著的色散性。尽管光学系统中已通过数值预测和精确控制晶格点耦合实现了全平带结构，但由于刚度比的技术限制，声学系统中的全平声子能带尚未被实验观测到。

近日，美国康涅狄格大学的 Mahmoud M. Samak 和 Osama R. Bilal 团队基于基本质量-弹簧系统，推导出实现声子全平能带的必要条件，并利用磁性耦合圆盘作为实验平台，首次实现了全平声子能带结构的直接观测。实验结果表明，在平带频率下，波能量被局限于波源附近，其能量局限效果比边界模式高出数倍。这项研究为设计具有奇异波控制能力的先进超材料提供了全新的理论与实验基础，或将在隐身技术、能量局域化及波动调控等领域带来重要突破。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》。（金梦成）



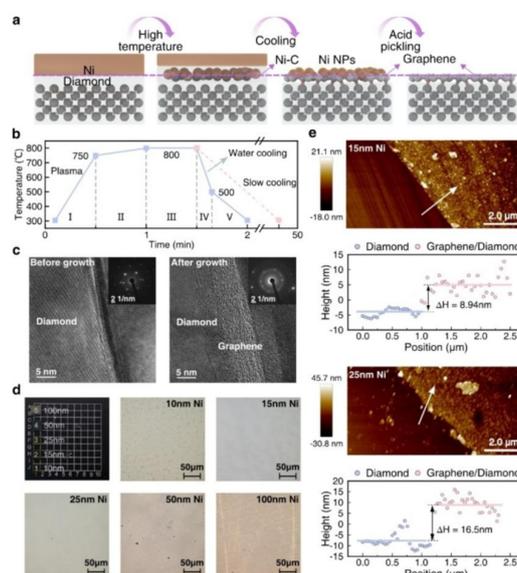
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.266101>

4 通过“2.5D”全碳 sp²/sp³ 混合界面实现超高效热传输

在下一代集成电路的发展过程中，具有卓越导热性能的碳基热界面材料 (Thermal interface materials, TIMs) 扮演着至关重要的角色，尤其是单层和多层石墨烯因其出色的耐高温和散热特性而成为研究的焦点。然而，当碳基 TIMs 被转移到芯片上时，由于其与芯片之间的界面热导 (GI) 极低，其性能会遭受严重损害，从而妨碍了芯片的散热效率。这种界面，由于 TIMs 并非直接在芯片材料上生长获得，因此被称为非原位界面。例如，石墨烯 TIM 一旦转移到 Si/SiO₂ 基底上，由于非共价界面作用，载流子迁移率会大幅下降。因此，通过在芯片上直接生长碳基 TIMs，可以有效避免这一问题。对于集成电路中第四代半导体材料金刚石的广泛应用而言，金刚石上直接生长的碳材料，即全碳界面或 TIMs，无疑是将来最理想的散热解决方案。

北京科技大学能源与环境工程学院的冯妍卉教授领导的研究团队，通过创新实验方法，成功构建了一种 2.5 维 sp²/sp³ 杂化 C-C 键的全碳界面，实现了超高效热

运输。该团队采用等离子体辅助化学气相沉积 (PACVD) 和超快速淬火工艺，在金刚石表面原位生长石墨烯，形成了丰富的 sp^2/sp^3 杂化共价键。这些共价键提供了高速的界面热传递途径，并显著增加了界面两侧低频声子的振动态密度 (VDOS)，从而增加了声子携带的热量。研究团队通过高角环形暗场扫描透射电子显微镜 (HAADF-STEM) 展示了不同退火条件下的 C/C 界面，并利用电子能量损失谱 (EELS) 分析了 C/C 界面的微观结构，证实了 sp^2/sp^3 杂化键的存在。使用 3ω 方法和双色飞秒激光时域热反射法 (TDTR) 技术测量整体材料的面外导热系数和界面热导，实验结果表明，2.5D 界面的界面热导率高达 $110\text{--}117\text{MW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，远超多种金属/金刚石接触界面和现有的全碳接触界面。NEMD 模拟计算设计了三种不同界面相互作用的 C/C 界面模型，进一步揭示了 2.5D C/C 界面的高导热机理，表明共价键界面的热导贡献占比达到 85.7%，由于建立了直接能量传输通道，声子耦合不再是界面热运输的主导因素。该研究为设计和构建 2.5D 全碳结构提供了一种有效的路径，可用于指导开发高性能全碳器件和电路，推动先进热管理材料和系统的广泛应用。研究成果发表在《Angewandte Chemie International Edition》上(张琰炯)。



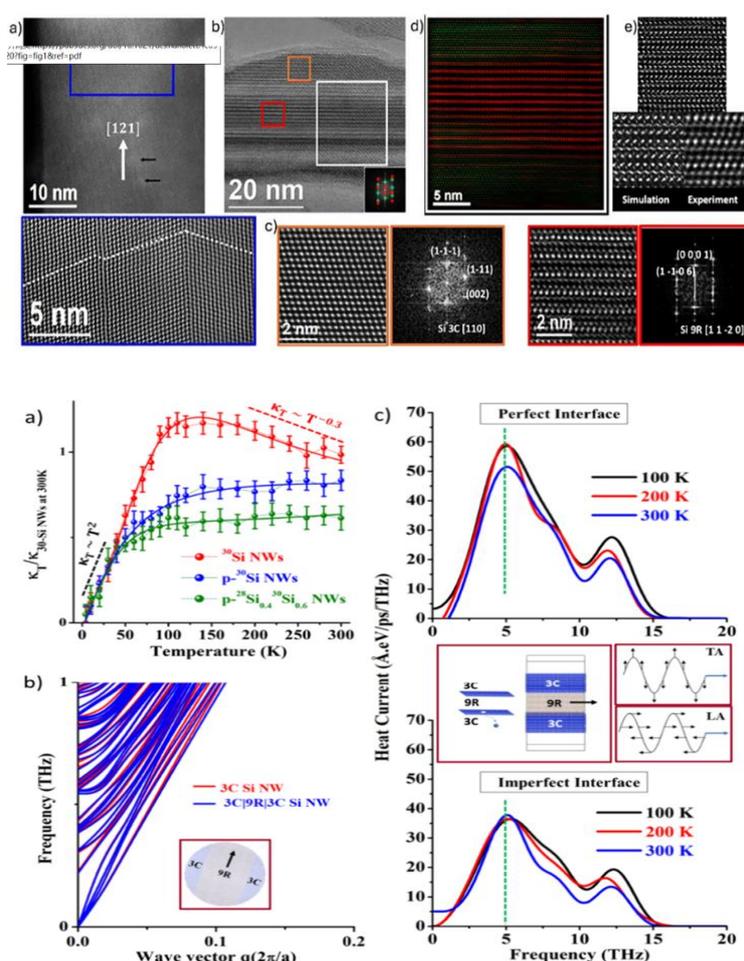
文章链接: <https://doi.org/10.1002/anie.202417902>

5 双相硅纳米线的热导率

随着纳米技术的发展，探索纳米尺度下材料的热传导特性成为基础科学和应用研究的重要方向。在此背景下，半导体纳米线因其在热管理、热电器件和能源应用中的潜力而受到广泛关注。特别是在硅纳米线中，声子是热传导的主要载体，其行为受晶体相结构、界面散射和原子级不规则性的显著影响。传统观点认为，声子的频谱和平均自由程是决定热导率的关键因素，而界面效应通常被视为次要角色。然而，随着晶体工程技术的进步，研究人员逐渐发现，材料内部的晶体相界面可能在塑造热传输行为方面起着比预期更为重要的作用。双相硅纳米线因其同时具有金刚石立方 (3C) 相和斜方晶 (9R) 相，为科学家研究声子在同质异相界面上的相互作用提供一个理想的平台。

近日，加拿大蒙特利尔高等技术学院的 Oussama Moutanabbir 教授课题组通过拉曼光谱测量技术和第一性计算系统探讨了工程同位素存在下的双相硅纳米线中

声子与晶体同质异相界面的相互作用机制。实验中，团队通过化学气相沉积(CVD)制备了三类硅纳米线样本：单相金刚石立方(3C)纯³⁰Si纳米线，双相金刚石立方-斜方晶(3C-9R)纯³⁰Si纳米线，以及³⁰Si和²⁸Si比例接近混合的双相纳米线。通过高分辨透射电子显微镜(STEM)表征样本的晶体相分布，并结合拉曼光谱分析了这些样本的热导率随温度的变化规律。结果表明，双相硅纳米线的热导率明显低于单相样本，而这种下降无法简单用声子频谱的差异来解释。团队进一步通过第一性原理模拟和声子输运理论模型，量化了界面处的原子级结构不规则性对声子散射的贡献。研究显示，同质异相界面引发的强散射机制是造成热导率显著降低的主要原因，而非声子频谱显著变化。通过这一跨实验和理论的多学科研究，团队首次明确了晶体相界面在塑造热传导行为中的主导作用，为基于晶体相工程设计高性能热电材料提供了重要的理论支持。这一成果不仅深化了对声子散射机制的理解，也为未来的纳米尺度热管理和热电器件优化提供了新的研究思路。研究成果发表在《Nano Letter》上。(张琰炯)



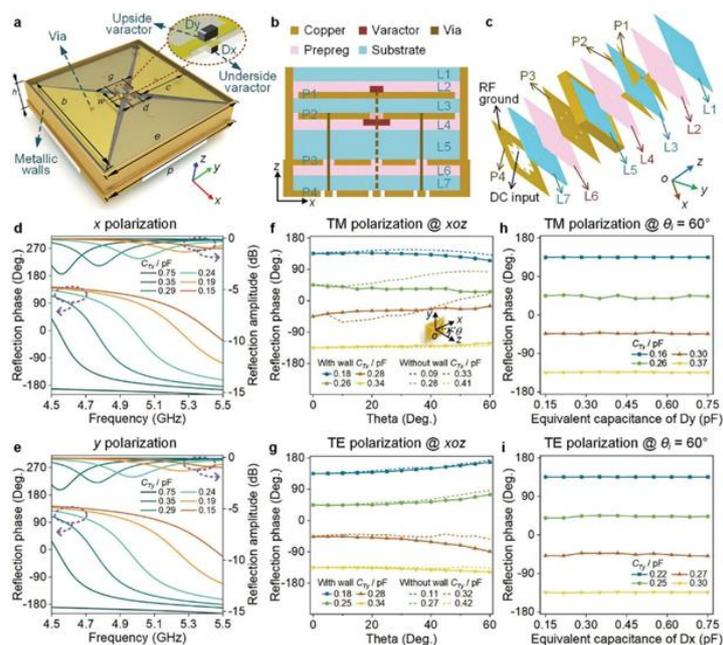
文章链接: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c03720>

6 具有可拆卸基元原子的可扩展和高隔离双通道可编程超构表面

可编程超构表面为实时电磁(EM)操作提供了新的平台，具有巨大的应用潜力。在共享超构表面孔径上实现电磁参数的偏振复用、频率复用等多路操作，对提高电磁参数的控制能力和效率具有重要意义。然而，在常见的设计方案中，将多路

复用结构和可调谐元件放置在介质衬底的同一表面上，不同结构间产生的物理连接会引发额外的串扰，对材料功能的稳定性造成影响。

近日，来自东南大学崔铁军院士，蒋卫祥教授团队提出了一种通过在堆叠层中嵌入两个可变参量来对材料的基元原子进行设计，以控制无串扰的正交极化波的方法。通过将可拆卸的元原子布置在基板上，进一步设计得到了可伸缩、高隔离的双通道可编程超构表面，在 60° 斜入射的条件下也可以独立控制双极化波。通过实验验证，证明可利用可扩展的双通道可编程超表面，在空间和极化信道中进行不同视频的同时和独立传输。该方法为开发低串扰多路可编程元表面提供了思路，可以提高超构表面辅助的信息系统的性能和稳定性。相关研究工作发表在《Advanced Functional Materials》上。（李治含）

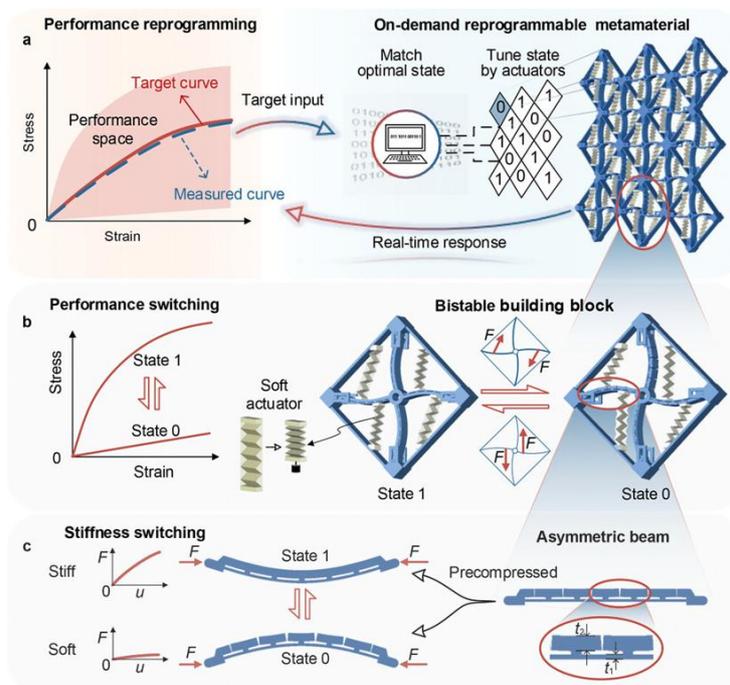


文章链接: L. Xu, X. G. Zhang, Q. Y. Li, D. J. Wang, T. J. Cui, W. X. Jiang, Scalable and High-Isolation Dual-Channel Programmable Metasurface With Demountable Meta-Atom. Adv. Funct. Mater. 2024, 2421498. <https://doi.org/10.1002/adfm.202421498>

7 由结构性能关系驱动的按需可编程力学超构材料

力学可重编程性在多功能自适应材料和结构作为智能系统核心组件中的作用日益凸显，被视为软体机器人、虚拟现实技术及星际探索等前沿领域发展的关键驱动力。为实现材料性能的灵活调控，研究者们追求通过数字接口实现精确且快速的重新编程，以响应外部指令或环境变化，这一愿景对材料设计理念的革新提出了迫切需求。在此背景下，超构材料以其独特的物理可调性为制造后阶段的可重编程性提供了新途径。通过调整结构布局、引入智能材料、调控空腔压力等手段，超构材料能够展现出丰富的力学响应变化。其中，基于空间异质性可调性的可重编程超构材料尤为引人注目，它们不仅具备原位数字可调性和广泛的调节范围，还能保持稳定的整体形态和多功能性。然而，实现这一目标仍面临两大挑战：一是在物理层面实现结构-驱动一体化，以快速且大范围地调整材料性能；二是在数字层面精确把握超构材料的高维结构-性能关系，以指导按需重编程。

近日，北京航空航天大学陈玉丽教授和潘飞副教授团队报道了一种由周期性双稳态构件组成的可实时重新编程力学超构材料，内置软致动器实现状态切换，展现出丰富的空间异质性。通过预先建立的状态序列与应力-应变曲线的映射关系，该材料能在 4 秒内迅速调整其状态，以精确匹配目标应力-应变曲线。该超构材料在 4% 的应变范围内具有良好的弹性拉伸和压缩性能，模量调谐比超过 30 倍，同时展现出高度可调的剪切和弯曲性能。这一研究成果不仅为智能系统的物理性能可重编程提供了新的思路，也为超构材料在更广泛领域的应用开辟了新道路。相关研究发表在《Advanced Materials》上。（徐锐）



文章链接：WEI Y, PAN F, LIN X, ZHANG L, XIANG J, CHEN Y. On-demand Reprogrammable Mechanical Metamaterial Driven by Structure Performance Relations[J]. Adv Mater, 2024: e2410865.

<https://doi.org/10.1002/adma.202410865>

（来源：两江科技评论）