

# 超材料前沿研究一周精选



2026 年 7 月 27 日-2026 年 7 月 31 日

索引:

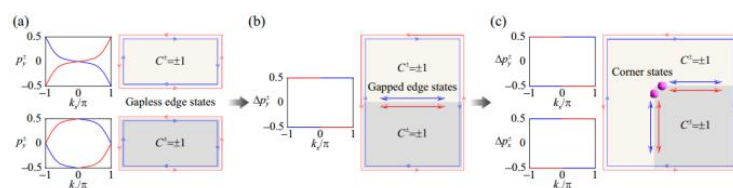
- 1、嵌入于一阶拓扑能带中的高阶拓扑
- 2、基于时间编码的并行非线性神经形态计算
- 3、追踪量子材料中混合激子-声子有序的灾变性坍塌
- 4、面内晶格变形重塑范德华异质结构中的界面热传输和稳定性极限
- 5、范德华异质结中晶格重建驱动的快速层间激子漂移
- 6、磁性杂质中近藤关联的精确量子多体描述
- 7、热学 Haldane 晶格的实现
- 8、用于广义相位调控的机械可编程电磁超材料：零静态功耗

## 1、嵌入于一阶拓扑能带中的高阶拓扑

拓扑绝缘体作为现代凝聚态物理与材料科学中的重要研究方向，揭示了由体态拓扑性质决定边界态的新型物理机制。传统的一阶拓扑绝缘体通过非平庸拓扑不变量实现低维边界态，例如陈绝缘体中的手性边缘态以及自旋陈绝缘体中的螺旋边缘态，体现了一阶体边对应关系。近年来，高阶拓扑理论进一步拓展了这一概念，提出二维系统中可以出现低维度的角态，并推动了声学、光学、弹性和电路等经典波体系中的拓扑态实现。然而，一阶拓扑指标的存在通常会导致传统高阶拓扑指标失去定义，使得一阶与高阶拓扑共存成为一个重要但具有挑战性的研究问题。已有研究表明，高阶拓扑态可以通过边缘能带拓扑或不同能隙中的混合拓扑机制实现，但如何直接在一阶拓扑能带内部构造高阶拓扑态仍缺乏系统探索。

近日，武汉大学的刘正猷院士、邓伟胤教授、浦臻航博士研究团队，提出并实验实现了一种嵌入于一阶拓扑能带中的高阶拓扑机制，利用声学自旋陈绝缘体构建了一种基于相对极化差异的新型拓扑体系。研究通过组装两个具有相同一阶拓扑性质的自旋陈绝缘体结构，在两者界面处引入晶胞的分数平移，从而产生量子化的自旋分辨体极化差异。虽然由于非零自旋陈数，体系本身的绝对极化无法定义，但界面处极化差异仍然保持量子化，并诱导产生具有拓扑保护的能隙边缘态。当进一步构造具有转角结构的异质结时，两个方向上的极化差异共同作用，使得局域于角落的高阶拓扑角态出现，并且这些角态与原有的一阶螺旋边缘态共存于同一能隙范围内。为验证该机制，研究利用三维打印声学晶体实现了双层声子晶体结构，通过实验测量边缘态色散关系以及角态局域声场分布，证明了该高阶拓扑态来源于极化差异而非传统高阶拓扑指标。该工作突破了一阶拓扑与高阶拓扑难

以兼容的限制，为在传统拓扑体系中设计更丰富的边界态提供了新的途径，并可能推动声学、光子学、力学以及电子体系中的拓扑器件发展。  
该文章发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



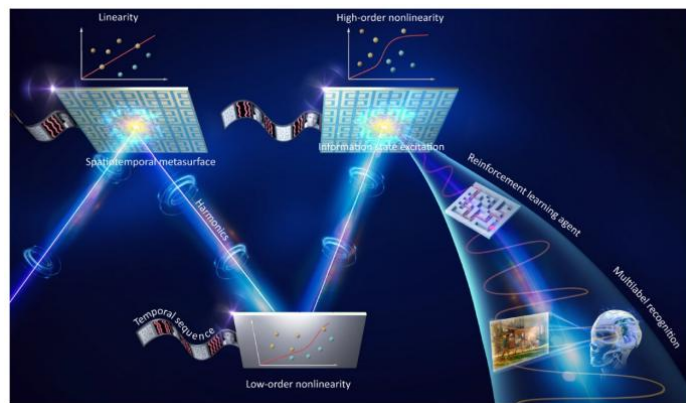
文章链接: <https://doi.org/10.1103/r1k2-psxm>

## 2、基于时间编码的并行非线性神经形态计算

随着人工智能算法和智能设备的快速发展，对高速、低功耗信息处理硬件的需求不断提升。传统电子计算架构逐渐接近物理极限，推动光学神经网络等新型计算范式的发展。光子计算凭借高速传播和低能耗优势，被认为是实现下一代人工智能硬件的重要方向。其中，线性计算过程已经能够通过衍射、散射等光学过程有效实现，而非线性计算能力仍然是制约光学神经网络进一步发展的关键因素。现有非线性光学计算方案主要依赖光电转换或材料本征非线性，但这些方法通常面临能量消耗高、响应速度受限以及系统调控复杂等问题。近年来，研究人员尝试利用信息编码方式在本征线性光学系统中诱导等效非线性，通过多重散射过程激发高阶信息状态。然而，传统空间编码方法往往将数据直接嵌入结构响应，使系统的线性表达能力受到限制，难以同时兼顾复杂非线性映射和任意线性变换。因此，如何在保持光学系统线性表达能力的同时实现高效非线性计算，成为神经形态光计算领域的重要挑战。

近日，浙江大学的钱超助理教授、陈红胜教授研究团队提出了一种基于时序编码的并行非线性神经形态处理器，通过利用时空超表面的时间调制自由度，在无需依赖复杂非线性材料和高功率激励的情况下，实现由线性散射过程诱导的非线性计算。该方法将输入数据与可训练权重矩阵分别映射到不同时间序列，通过时间维度的信息复用，使光波在多个超表面之间传播和多重散射过程中产生高阶信息耦合，从而实现非线性响应，同时避免传统空间编码对线性变换能力的削弱。基于微波超表面实验平台，该研究构建了由多个分布式时空超表面组成的非线性神经网络，并验证了其在人脸多标签识别、多任务并行计算以及强化学习迷宫求解中的应用能力。其中，通过异步时间调制策略，不同频率通道可承载相互独立的计算任务，实现多维度并行信息处理；在动态迷宫任务中，该系统还展现出基于历史信息的记忆能力和实时决策能力。该研究为利用时间维度扩展光学计算自由度提供了新的途径，有望推动可重构神经形态器件、智能超表面以及高效信息处理系统的发展。

该文章发表于《Science Advances》。（刘梦洋）



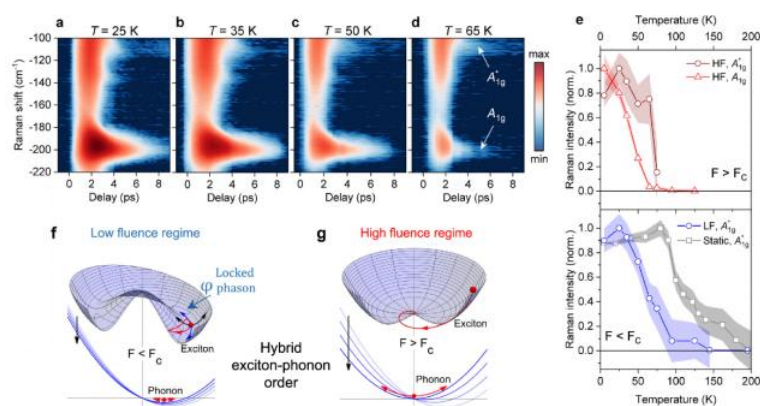
文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aea1114>

### 3、追踪量子材料中混合激子-声子有序的灾变性坍塌

在量子材料中，电荷密度波（CDW）等有序态通常来自电子与晶格自由度的协同作用。利用超快光激发打破这种平衡，可以进一步判断不同自由度在有序态形成和稳定过程中所发挥的作用。层状材料 1T-TiSe<sub>2</sub> 是研究电子-晶格协同有序的经典体系。温度低于约 202 K 时，它进入公度 CDW 相，同时出现  $2 \times 2 \times 2$  周期性晶格畸变（PLD）和间接带隙。目前普遍认为，该 CDW 来自激子与晶格不稳定性的相互增强，但对于二者耦合的直接光谱研究仍然缺乏。已有研究发现，光激发后电子 CDW 能隙可在 100 fs 内坍塌，而 PLD 却能持续数皮秒。这一现象进而引出了一个关键问题：残余 PLD 究竟是独立的晶格有序，还是混合激子-声子有序坍塌后留下的非热残余态？

近日，科隆大学的 Paul H. M. van Loosdrecht 教授课题组利用时间分辨拉曼光谱（TR-Raman）和时间分辨反射率（TRR）研究了 1T-TiSe<sub>2</sub> 在不同光激发通量下的非平衡动力学，发现频率约 0.13 THz 的锁定相位子，并揭示了强光激发下混合激子-声子有序的灾变性坍塌。在低激发通量下，CDW 相中的折叠模式出现约 7.5 ps 的长周期振荡，且随着激发通量增加，该振荡逐渐软化，并在临界激发通量 FC 附近突然消失。研究者将该低频集体激发归因于混合激子-声子有序的锁定相位子，其消失标志着相干激子有序的坍塌，但 PLD 并未同时消失。功率依赖实验显示，超过 FC 后，模式的频率、振幅和声子占据数均趋于饱和，相干振荡明显减弱。进一步建立有效理论模型表明，激子序参量的坍塌会使耦合势能面变平，锁定相位子随之消失，最终留下结构有序但激子成分已耗尽的动态俘获非热 PLD 残余态。该工作证明了光激发后电子有序与晶格畸变的分离，并非简单的晶格响应滞后，而是混合激子-子有序坍塌的结果，为理解和调控协同量子有序的非平衡动力学提供了新的实验依据。

相关工作发表于《Nature Communications》上。（侯玥盈）



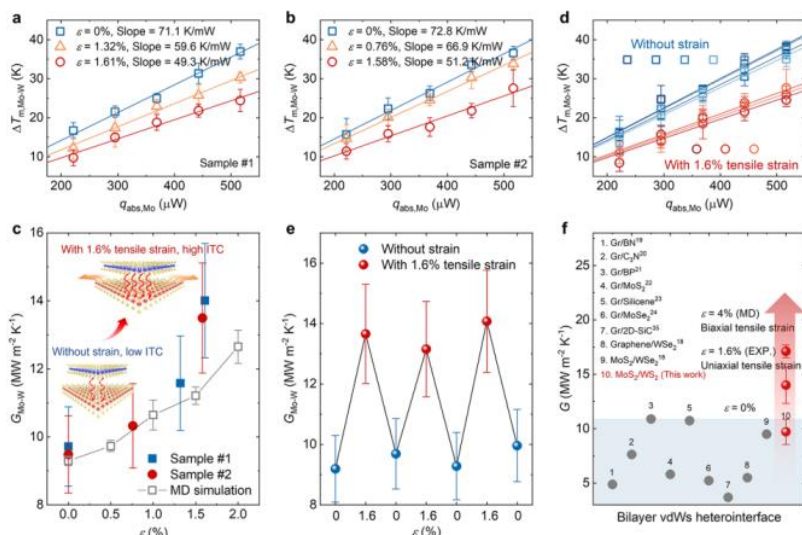
文章链接: <https://www.nature.com/articles/s41467-026-75887-9>

#### 4、面内晶格变形重塑范德华异质结构中的界面热传输和稳定性极限

基于二维材料的范德华（van der Waals, vdW）异质结构因其原子级界面、层间自由堆叠以及优异的电学与光学性能,被认为是下一代电子器件的重要候选平台。然而,在垂直堆叠的二维异质结构中,层间范德华界面通常存在弱耦合和纳米尺度间隙,使声子跨界面传输受到显著限制,形成阻碍热流释放的关键热瓶颈。传统观点认为,范德华界面的界面热导主要由界面化学组成、堆垛方式以及声子谱匹配等静态结构因素决定,一旦异质结构形成,其热输运性能便难以动态改变。因此,现有提升界面热传输的方法主要依赖界面改性,包括化学键合、缺陷调控、掺杂以及外部压力等策略,但这些方法往往伴随着不可逆性、材料兼容性不足以及器件集成困难等问题。如何在不直接破坏界面的情况下,实现范德华界面热流的可逆调控,成为纳米热管理领域的重要挑战。

近日,清华大学张兴教授团队联合苏州大学朱俊桐副教授团队提出利用面内晶格变形实现跨维度界面热输运调控的新策略。研究团队以高质量 CVD 生长的  $\text{MoS}_2/\text{WS}_2$  范德华异质双层结构为模型体系,通过柔性基底施加约 1.6% 的面内拉伸应变,在不直接压缩或化学改变界面的情况下,实现了界面热导的显著增强。结合拉曼热测量技术,研究发现,  $\text{MoS}_2/\text{WS}_2$  界面的界面热导 (interfacial thermal conductance, ITC) 由无应变状态下约  $9.7 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  提升至  $14.1 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 增强幅度约 50%, 并且在多次加载—释放循环中保持良好的可逆性和稳定性。进一步的分子动力学模拟揭示了这一现象背后的微观机制: 面内拉伸诱导范德华间隙收缩,提高层间有效力常数,使界面由传统意义上的“被动热阻单元”转变为可机械调控的弹性热结点,从而增强声子跨界面传输。研究团队进一步扩展模拟体系发现,在  $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$  异质结构中也存在类似的应变增强效应,表明该机制可能具有普适性。更重要的是,该机械调控策略不仅改善界面热传输,还显著提升二维异质结构的热稳定能力。在高功率激光加热实验中,施加 1.6% 拉伸应变后,器件可承受的临界吸收功率密度由  $3.05 \text{ GW} \cdot \text{m}^{-2}$  提高至  $4.89 \text{ GW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 提升约 60%, 说明机械变形能够通过优化散热路径有效延缓热失效过程。该工作为未来柔性电子器件、自适应热管理以及二维材料集成系统中的主动热调控提供了新的设计理念。

相关内容发表于《ACS Nano》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1021/acsnano.6c04113>

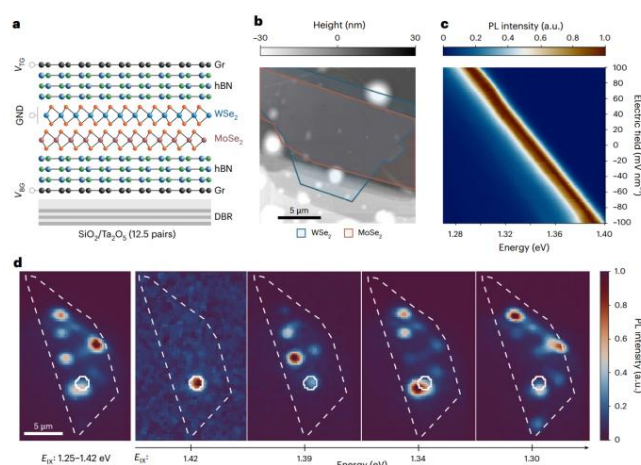
## 5、范德华异质结中晶格重建驱动的快速层间激子漂移

在半导体器件和数据中心中，电子在传输过程中不可避免地受到缺陷、声子等散射作用，导致显著的焦耳热损耗。因此，利用新型准粒子替代传统电子作为信息载体，发展低能耗的信息传输与处理技术，成为凝聚态物理和纳米电子学领域的重要研究方向。其中，激子（exciton）作为由电子与空穴束缚形成的电中性准粒子，具有长寿命、无电荷损耗以及可通过外场调控等优势，被认为是实现未来激子互连（excitonic interconnects）和新型光电器件的重要候选。在二维范德华异质结构中，由于不同二维半导体层之间通过范德华作用结合，电子和空穴可以分别局域于不同材料层中，形成层间激子（interlayer excitons, IXs）。相比传统电子输运，层间激子不仅避免了电荷传输带来的功耗问题，还具备优异的电场调控能力。然而，目前二维异质结构中的激子输运通常受到莫尔超晶格势垒、界面无序以及声子散射等因素限制，其传播距离和速度仍难以满足高速信息传输需求。

近日，瑞士洛桑联邦理工学院 Andras Kis 教授团队联合德国马尔堡大学 Ermin Malic 教授团队揭示了范德华异质双层结构中由晶格重构诱导的势能梯度驱动层间激子高速漂移输运机制，实现了超过 10  $\mu\text{m}$  尺度的长距离激子传播。研究团队构筑了全六方氮化硼（hBN）封装的  $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$  范德华异质双层器件，通过空间分辨光致发光（PL）成像、电调制光谱以及时间分辨光致发光（TRPL）技术，系统研究了层间激子的动态输运过程。实验发现，由于 R 型堆垛异质结构中的晶格重构，在材料内部形成了显著的激子势能梯度，使初始激发区域产生的高能层间激子能够沿势能斜坡快速向低能复合区域迁移。研究测得层间激子的漂移速度达到约  $2.66 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，对应场效应迁移率约  $1320 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，远高于传统扩散输运水平。进一步研究表明，该高速输运机制并非依赖单纯的激子-激子相互作用，而主要来源于晶格重构产生的空间非均匀激子势能景观。在温度调控实验中，研究团队发现该漂移机制可稳定维持至约 150 K，超过该温度后，声子作用增强，输运逐渐转变为热激活跳跃过程。此外，研究还揭示了激子密度对输运行为的重要影响：随着激发功率增加，偶极排斥作用和激子-激子相互作用进一

步促进激子从激发区域快速逃逸。该工作突破了传统认为二维异质结构中激子输运主要受扩散和外场控制的认识，证明晶格重构能够作为一种内禀结构调控手段，主动塑造激子运动路径和输运效率。

相关内容发表于《Nature Materials》上。（张琰炯）



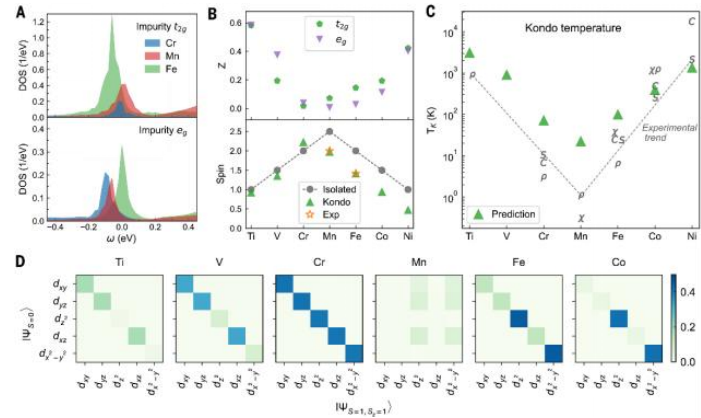
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-026-02688-2>

## 6、磁性杂质中近藤关联的精确量子多体描述

近藤效应（Kondo effect）是量子多体物理中最经典的材料问题之一，其源于磁性杂质中的局域电子与金属基体中的巡游电子之间相互作用。温度降低到特征 Kondo 温度  $T_K$  以下时，杂质磁矩会被传导电子屏蔽，二者共同形成多电子单重态，并在局域态密度中产生尖锐的 Kondo 共振。目前，研究人员主要借助 Anderson 杂质模型和 Kondo 自旋模型理解这一现象，这些模型成功揭示了 Kondo 效应的基本物理图像，但由于模型参数需要人为确定，同时忽略了部分高能电子自由度，其对具体材料的定量预测仍存在较大不确定性，准确计算 Kondo 效应尤其困难。传统低能模型通常只保留少数杂质 d 或 f 轨道，但关联轨道的选择、有效相互作用的推导及双重计数校正都会引入误差，使得不同磁性杂质和不同结构中的 Kondo 温度难以在不依赖实验数据的情况下被准确预测。

近日，加州理工学院的陈建历院士课题组通过构建全轨道量子嵌入框架，提出了一种从头算方法，研究了体相铜中的 Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co 和 Ni 七种 3d 过渡金属磁性杂质，获得了可系统收敛且能再现实验 Kondo 温度趋势的精确电子态求解。该方法从包含杂质及其邻近铜原子电子自由度的母基组出发，通过不断增大活性空间，检查轨道占据数和准粒子重整化权重的收敛。以 Fe 杂质为例，其 t2g 和 eg 轨道均在费米能级附近呈现尖锐 Kondo 共振，同时在较高能量处出现 Hubbard 肩峰。计算得到的  $T_K$  跨越三个数量级，重现了实验中从 Ti 到 Mn 降低，随后向 Ni 升高的趋势。进一步分析表明，电荷转移会改变杂质的有效自旋，较高有效自旋通常对应较低  $T_K$ 。对于 Mn，最低三重态还包含电子从 t2g 轨道向浴的部分转移及自旋翻转，说明轨道自由度和电荷涨落也是决定 Kondo 温度系统趋势的重要因素。相比之下，标准五轨道下折叠模型明显高估准粒子重整化权重和  $T_K$ ，且无法再现实验中的趋势，定量误差最高可达两个数量级。该工作由此证明，全轨道从头算量子多体模拟能够趋近 Kondo 问题的精确零温电子描述，并从可信计算结果中重新提取传统低能物理图像。这一框架为关联电子研究从定性解释迈

向可系统改进、可直接预测实验观测量的模拟提供了新途径。  
相关工作发表于《Science》上。（侯玥盈）



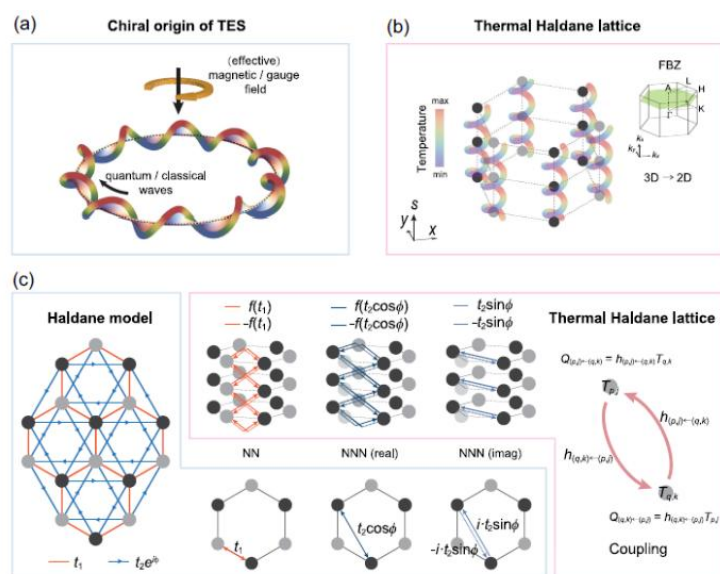
文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adq7402>

## 7、热学 Haldane 晶格的实现

拓扑物理的发展揭示了量子 and 经典体系中的丰富拓扑现象，其中量子霍尔效应、量子反常霍尔效应和量子自旋霍尔效应推动了 Chern 绝缘体与拓扑绝缘体的发展。此类体系通过体态拓扑性质在边界产生单向传播的拓扑边缘态，并具有抵抗缺陷和扰动的鲁棒性。实现拓扑态通常依赖两个核心条件：一是具有包含振幅和相位信息的复波函数，二是能够破坏时间反演对称性并产生手性的机制，如磁场、人工规范场或非对称耦合等。然而，传统拓扑物理主要建立在波动体系之上，对于扩散体系仍存在根本限制。以热扩散为例，温度场是无相位、无自旋的标量场，遵循傅里叶定律，不具备波函数自由度，因此难以构建类似 Chern 绝缘体的拓扑结构。这一限制使得拓扑研究长期集中于量子、电磁和机械波体系，而扩散体系中的拓扑现象仍鲜有探索。

近日，新加坡国立大学仇成伟教授和哈尔滨工业大学李天龙教授研究团队合作，通过引入额外的实空间维度并结合主动热控制，实现了有效的复数耦合，从而将拓扑能带理论拓展到热扩散体系。作者提出了热学 Haldane 晶格，该体系作为 Chern 绝缘体的热学模拟，实现了无需 Landau 能级量子化而由能带拓扑性质产生的量子霍尔效应。额外周期维度的引入不仅赋予温度场类似波函数的相位自由度，还通过层内与层间耦合的协同设计，实现了 Haldane 模型中的复数跃迁项。实验上，作者利用可编程热源对热耦合关系进行数字化调控，为温度场引入人工合成相位，并克服传统被动热扩散体系中固有耗散带来的限制。最终，作者在热学 Haldane 晶格中实验观测到了具有鲁棒性的手性边缘态动态演化，证明了拓扑物理可以从传统波动体系拓展至扩散体系。

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

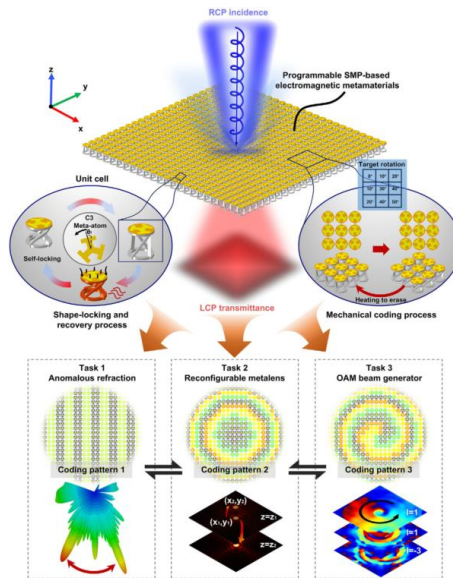


文章链接: <https://doi.org/10.1103/qjq1-4k8c>

## 8、用于广义相位调控的机械可编程电磁超材料：零静态功耗

可重构电磁超材料为动态电磁波调控提供了重要平台。传统可重构智能表面通过集成电子元件实现单元级控制，能够完成快速、精准的波前调控，但其依赖复杂电路制造和外部控制系统。机械重构方法因结构简单、低功耗和设计灵活等优势成为重要替代方案，研究者利用热、磁、气动和机械刺激改变超材料单元排列，实现电磁性能调节。然而，现有机械可重构超材料通常存在单元难以独立编程、功能受限等问题。虽然压缩-扭转耦合和稳定结构已实现幅度编码，但实现具有完整  $0^\circ$ – $360^\circ$  相位覆盖的广义相位调控仍然困难。同时，传统机械重构方案往往需要持续外力维持变形状态，导致系统复杂度和能耗增加。因此，发展无需持续供能且具备单元级相位编程能力的新型机械可重构超材料具有重要意义。

近日，浙江大学王成军研究员、宋吉舟教授研究团队，提出了一种基于形状记忆聚合物（SMP）的机械可编程电磁超材料，通过结合压缩-扭转耦合结构和 C3 几何相位超构单元，实现了单元级独立机械编程和广义相位调控。压缩-扭转结构能够将垂直压缩转换为超构单元的面内旋转，而 C3 超构单元利用高阶几何相位增强机制，使超材料在仅  $0^\circ$ – $60^\circ$  的机械旋转范围内实现完整  $0^\circ$ – $360^\circ$  相位覆盖。利用 SMP 的形状记忆特性，编码后的结构状态能够被稳定锁定，无需持续外部驱动，从而实现零静态功耗运行，并支持热恢复后的重复编程。实验和仿真结果表明，该平台可实现异常折射、可重构金属透镜以及 OAM 波生成等多种波前调控功能，为低功耗、高可编程性的智能电磁超材料提供了一种新的设计方案。相关工作发表在《Advanced Materials》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.74397>  
 (来源: 两江科技评论)