

超材料前沿研究一周精选



2026 年 8 月 1 日-2026 年 8 月 9 日

索引:

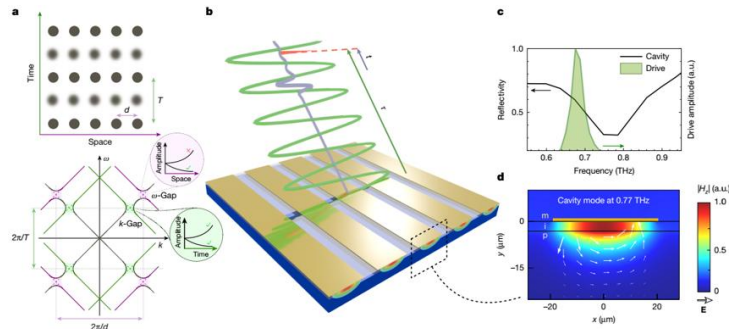
- 1、**等离激元超材料时间晶体**
- 2、强飞秒激光脉冲驱动掺杂半导体光学性质的超快切换
- 3、Hubbard 量子模拟器中的拓扑相变与混合态序
- 4、二维材料中的中红外长程表面极化子
- 5、具有超高导热率和热射流率的热冲击防护复合相变材料

1、等离激元超材料时间晶体

传统光子晶体利用空间周期性调控光的传播行为，通过周期介电结构形成光子能带和带隙，从而实现对光场的局域、传播以及辐射特性的控制。近年来，将周期性从空间拓展到时间维度的光子时间晶体（PTC）逐渐成为动态光子学领域的重要方向。与空间光子晶体通过动量空间中的周期复制形成频率带隙不同，光子时间晶体通过时间周期调制产生频率复制，并在频率交叉处形成动量带隙，使光场能够出现随时间指数增长或衰减的非平衡演化模式，为光放大、非共振增益、激光以及新型光物质相互作用提供新的调控方式。然而，光子时间晶体的实验实现长期受到限制，其核心挑战在于需要材料光学性质在接近光学周期的时间尺度内发生强烈且相干的调制，同时要求调制幅度达到接近单位量级。此前相关实验主要局限于微波电路体系，而在更高频率的全光学体系中实现稳定可控的光子时间晶体仍面临巨大困难。

近日，法国巴黎综合理工学院的 Yannis Laplace 助理教授研究团队提出并实现了一种基于等离激元超材料的全光学光子时间晶体平台。研究人员利用金属/绝缘层/半导体构成的表面等离激元微腔结构，以窄带隙半导体 InSb 作为等离激元材料，通过太赫兹驱动光场诱导载流子有效质量发生快速周期变化，实现了对等离激元共振频率的强相干调制。实验结果表明，该体系能够产生接近完全幅度的参数调制，并实现亚光学周期尺度的动态响应，其中载流子有效质量调制幅度可达到其静态有效质量的约 80%。进一步结合 Floquet 理论分析，该研究揭示了光子时间晶体形成过程中两个受驱动光学模之间的本征态合并过程，即通过 EP 点实现从普通周期驱动状态向光子时间晶体状态的转变。在进入光子时间晶体区域后，系统表现出新的增益机制，使等离激元损耗降低超过 50%，为利用时间维度工程调控光学耗散、实现等离激元激光以及动态光场控制提供了新的路径。该工作不仅解决了高频光子时间晶体实验实现中的关键技术问题，也建立了一套可通过光谱测量识别和研究时间晶体现象的方法体系。

该文章发表于《Nature》。（刘梦洋）



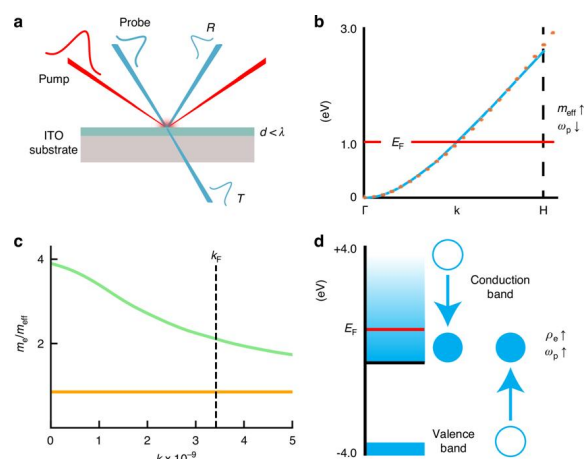
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10825-9>

2、强飞秒激光脉冲驱动掺杂半导体光学性质的超快切换

强超短激光脉冲可在飞秒尺度改变固体电子态，并迅速改变其对探测光的响应，这对信号处理、光学计算和时变超材料等快速光学切换应用十分重要。介电常数近零（epsilon-near-zero, ENZ）材料因其线性与非线性光学性质而受到关注；氧化铟锡（indium tin oxide, ITO）等透明导电氧化物兼具可见光透明、近红外低损耗、高三阶非线性和较高损伤阈值。目前的研究表明，在较低泵浦强度下，双温模型能够描述泵浦后的反射率、透射率及其恢复动力学；但在高泵浦强度下，调制幅度和光谱位移出现饱和，并伴随尚未阐明机制的复杂弛豫过程。

帝国理工学院的 John B. Pendry 教授课题组利用时间与频率分辨泵浦-探测测量，并结合电子能带计算，考察强光激发下氧化铟锡（indium tin oxide, ITO）薄膜的瞬态光学行为，证明其响应随泵浦强度增加会经历线性增强、饱和以及新弛豫通道出现三个阶段。该研究团队将实验获得的反射和透射信号转化为等离子体频率的动态变化，并从 ITO 非抛物线导带中的电子占据出发解释这一过程：电子吸收泵浦能量后向高能态重新分布，使平均有效质量增大，进而改变等离子体频率。在较低强度范围内，这一能带模型与实验符合良好；随着费米能级以下的电子被大量激发，继续增加泵浦能量已难以进一步改变电子有效质量，因此光学调制逐渐达到饱和。进入更高强度区间后，反射和透射信号出现部分回升及更快的恢复成分，说明仅考虑导带电子与晶格热交换的双温模型不再适用。研究者认为，多光子吸收产生的高能电子可能通过俄歇（Auger）过程激发价带电子，由此改变载流子密度，并引发电子与空穴之间的快速能量重新分配，这一机制尚需更精细的理论和实验验证。该工作拓展了对介电常数近零（epsilon-near-zero, ENZ）材料强场响应区间的认识，表明高强度光驱动下必须同时考虑非抛物线能带、载流子占据变化及价带参与，为建立透明导电氧化物的非平衡输运模型，以及调控快速、大幅度的瞬态折射率变化提供了实验依据。

相关工作发表于《Light: Science & Applications》上。（侯玥盈）



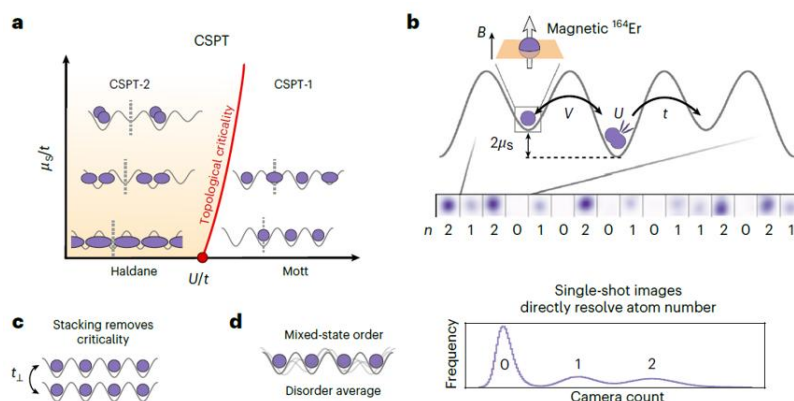
文章链接: <https://www.nature.com/articles/s41377-026-02346-x>

3、Hubbard 量子模拟器中的拓扑相变与混合态序

传统凝聚态物理中，朗道理论通过局域序参量描述相变过程，然而在一维零温量子体系中，存在一类无法由局域观测量区分的拓扑相变。此类相之间虽然具有相同的局域性质，却因非局域量子关联而表现出不同的拓扑结构，其中由对称性保护拓扑（SPT）相之间发生的量子临界现象一直是量子模拟领域的重要挑战。近年来，超冷原子与量子模拟平台的发展使得研究者能够直接探测多体量子态中的拓扑性质，但如何在实验中调控并观测拓扑相变、验证 SPT 相的可逆性以及理解无序环境下拓扑保护机制仍缺乏系统探索。

近日，美国哈佛大学的 Markus Greiner 教授、Lin Su 博士和美国印第安纳大学布卢明顿分校的 Ceren B. Dag 助理教授研究团队，通过调控交错化学势，使体系在两种不同的晶体 SPT 相之间实现可控转换，并利用非局域弦序参量识别拓扑相变临界点。实验结果表明，尽管两种拓扑相在局域密度等观测量上无法明显区分，但其奇偶宇称弦关联具有显著差异，可作为刻画拓扑不变量的有效工具。研究进一步证明，将两个相同的拓扑链进行耦合堆叠能够打开能隙并消除原本存在的量子临界点，这一现象体现了 SPT 相所具有的可逆性以及独特的群结构特征。除此之外，该研究还考察了对称性破缺无序对拓扑相变的影响，发现单个无序实现会破坏晶体对称保护的临界行为，而在未知具体无序信息并进行统计平均后，拓扑转变信号重新出现，揭示了一种依赖平均对称性的混合态拓扑序。通过将晶体 SPT 相与经典 Haldane 绝缘体和 Mott 绝缘体之间的拓扑转变联系起来，该工作展示了量子模拟器在探索复杂量子相结构中的独特优势，并为理解现实量子系统中拓扑保护、无序效应以及混合态量子序提供了新的实验路径。

该文章发表于《Nature Physics》。（刘梦洋）



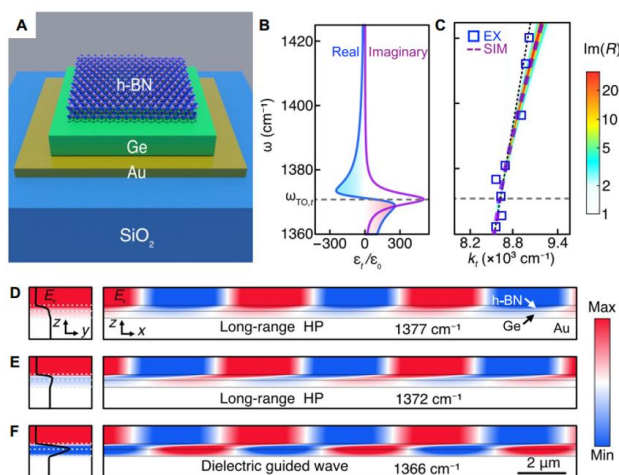
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-026-03381-6>

4、二维材料中的中红外长程表面极化子

中红外光子学在气体传感、生物医学成像、自由空间通信、红外天文学及热成像等领域具有重要应用价值,但自由空间中红外光与分子尺度之间巨大的尺寸差异,限制了光-物质相互作用以及中红外器件的小型化与集成化。近年来,二维范德华材料为这一问题提供了新的解决路径,其中石墨烯等离激元(GPs)和双曲声子极化激元(HPhPs)能够将光压缩至远低于自由空间波长的尺度,显著增强纳米尺度光-物质相互作用。然而,高度局域化也伴随着显著传播损耗:室温下中红外石墨烯等离激元通常只能传播数微米,而二维范德华材料中的HPhPs受材料吸收损耗限制,传播距离通常难以超过 $20\text{ }\mu\text{m}$,同时较大的动量也使其群速度较低。对于需要连接传感、信息处理和计算等不同功能单元的片上中红外光子系统而言,仅仅实现极强的光场局域还远远不够,如何在保持二维材料超薄、易集成优势的同时,实现低损耗、高速度和长距离的极化激元输运,成为构建紧凑型中红外光子芯片面临的重要挑战。

近日,纽约城市大学Andrea Alù教授研究团队提出并实验实现了二维范德华材料中的中红外长程表面极化激元(LRSPs)。不同于依赖强局域化实现光场压缩的传统HPhPs,团队利用h-BN横向光学(TO)声子共振附近面内介电常数“实部为负、虚部很大”的特殊光学响应,构建由h-BN/Ge/Au组成的深亚波长异质结构,并利用高折射率Ge层与Au反射层抑制向下辐射泄漏,在保持超薄结构的同时显著降低传播损耗。通过散射型扫描近场光学显微镜(s-SNOM)结合COMSOL和FDTD模拟,研究人员直接观测到LRSPs的实空间传播,并证明其色散接近光锥,具有较高群速度。进一步优化h-BN和Ge层厚度后,在 119 nm h-BN/ 293 nm Ge/Au结构中,实验观察到LRSPs跨越整个h-BN薄片传播超过 $80\text{ }\mu\text{m}$ 且无明显衰减,其品质因子下限约为138,明显高于已报道的h-BN HPhPs($Q<50$)和石墨烯等离激元($Q<20$);理论计算更预测其传播长度可达到约 $925\text{ }\mu\text{m}$ 。该工作突破了二维材料极化激元长期面临的“强局域-长传播”权衡,为利用长程表面极化激元连接不同二维光子功能单元提供了新方案,有望推动高速、低损耗片上中红外极化激元互连以及超紧凑中红外集成光子器件的发展。

相关内容发表于《Science Advance》上。(张琰炯)



文章链接: <https://10.1126/sciadv.aed2198>

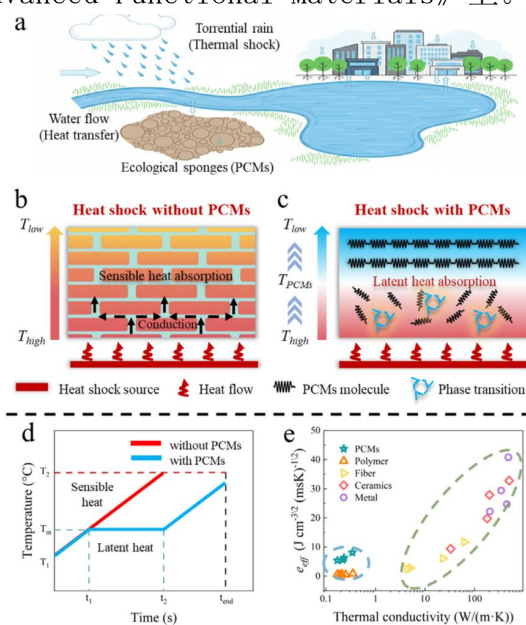
5、具有超高导热率和热射流率的热冲击防护复合相变材料

随着电子器件不断向小型化、高集成度和高功率密度方向发展，局部瞬态热流密度急剧增加，由此产生的热点和热冲击已成为制约高性能电子器件可靠性与寿命的重要因素。传统热管理材料通常强调提高热导率，通过快速扩散热量降低局部温升，但高热导材料本身的储热能力有限，在突发高热流冲击下仍可能出现快速升温。热射流率（thermal effusivity）能够综合反映材料的热传导与热吸收能力，因此成为评价热冲击防护性能的重要指标。碳纳米管、石墨烯和膨胀石墨等碳材料具有优异的导热性能，但往往比热容较低；相比之下，相变材料（PCMs）可以利用固-液相变过程中的潜热吸收大量热量，有效延缓温升，却又普遍面临本征热导率低和液态泄漏等问题。更关键的是，传统复合相变材料通常将导热填料直接分散在相变介质中，增加填料含量虽然能够构建导热网络，却会牺牲相变材料含量和储能密度，并产生大量填料-基体界面热阻。因此，如何突破“快速导热—高容量储热”之间的竞争关系，同时获得高热导率和高热感率，是面向瞬态热冲击防护的新型热管理材料需要解决的核心问题。

近日，四川大学刘正英教授和杨杰教授研究团队受到“海绵城市”中“河道快速疏导洪水+生态海绵吸收雨水”的协同机制启发，提出了一种区别于传统一体化复合方式的导热与储热网络解耦设计策略：利用高度取向的膨胀石墨（EG）薄膜构筑外部热传导层（TCL），负责将局部热量快速横向扩散；内部则采用 EG/石蜡（PW）复合材料形成相变层（PCL），通过相变潜热吸收瞬态热量，从而实现

“先快速扩散、再高效储热”的热流调控。得益于这一多层解耦结构，代表性 PG-20 材料在仅 38.2 wt.% EG 含量下实现了高达 $91.38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的面内热导率，是纯石蜡的约 325 倍，同时保持 $114.5 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 的相变焓；其热感率进一步达到 $108.7 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3/2} \cdot (\text{msK})^{-1/2}$ ，相比具有相近潜热的传统整体压制复合材料提高约 94%。在实际热冲击测试中，该材料虽然热导率仅为 EG 薄膜的 34.8%，但凭借潜热储能作用反而将峰值温度进一步降低 8.0°C ；用于智能手机热管理时，器件表面温度最高可降低约 18.7°C 。此外，材料还兼具优异的防泄漏、循环稳定性以及电磁干扰屏蔽性能，在 X 波段的电磁屏蔽效能达到 99.5 dB。该工作通过空间结构解耦而非单纯增加高导热填料，为同时解决相变材料“导热—储热”性能矛盾提供了新的材料设计范式，也为高功率电子器件、可穿戴设备及航空航天系

统的瞬态热冲击防护与多功能热管理提供了新的技术路径。
相关内容发表于《Advanced Functional Materials》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.76748>
(来源: 两江科技评论)