超材料前沿研究一周精选

2026 年 10 月 26 日-2026 年 10 月 31 日

索引：

1、光子晶体腔中双曲声子极化激元的动量量子化

2、突破滑移铁电体中振幅饱和极限的相干声子调控

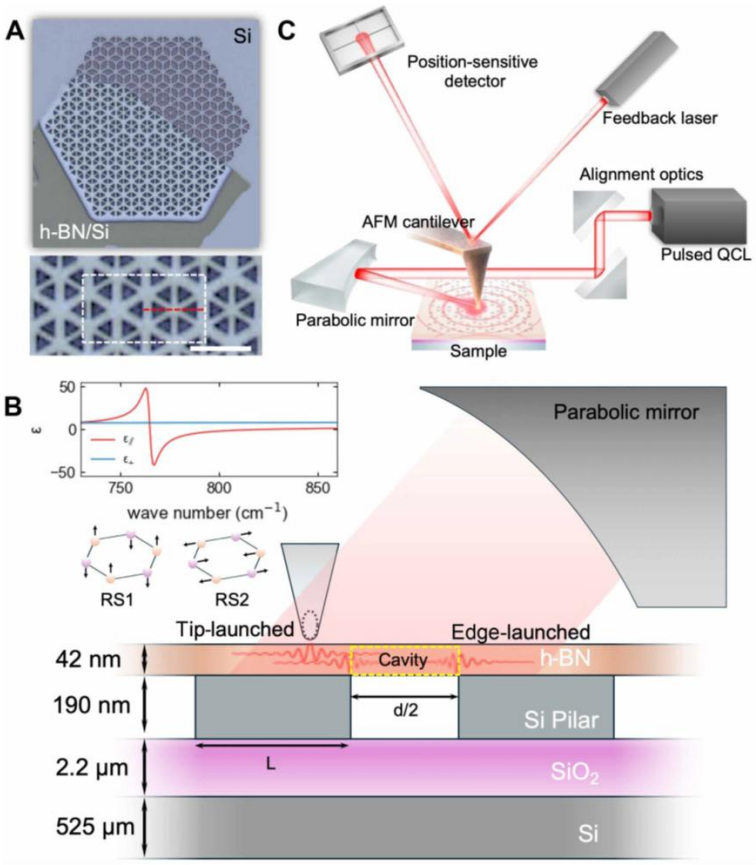
3、液氦温区振动泵浦驱动的非线性声子辅助上转换光致发光

4、迈向超紧凑极限的等离激元涡旋腔

1、光子晶体腔中双曲声子极化激元的动量量子化

范德华晶体中的双曲声子极化激元（HPhPs）具有连续且丰富的动量空间，为突破衍射极限的纳米光子学研究提供了重要平台。由于其场局域主要源于离子晶格振动而非自由载流子响应，HPhPs 能够支持极大的面内波矢，同时保持较低的耗散损耗。其显著的光学各向异性使其具有开放的等频面，可实现准直传输、负折射以及品质因子和珀塞尔效应增强。此外，范德华晶体具有原子级厚度和易于堆叠的特点，可通过调节厚度、介电环境及异质结构实现灵活调控，使 HPhPs 成为中红外纳米光子学的重要研究方向。其中，六方氮化硼（h-BN）低剩余射线带（RS1）中的 HPhPs 兼具低损耗和强体积局域特性，有望实现高品质因子（高 Q 值）与超小模式体积的结合。然而，极化激元的能量泄漏及其与其他传播通道的耦合限制了品质因子的提升。尽管已有研究通过纳米结构设计、波导调控和谐振约束等方法实现了对 HPhPs 的有效操控，但如何同时获得高品质因子和超小模式体积仍是一项重要挑战。

近日，韩国标准与科学研究院 Eun Seong Lee、Junghoon Jahng1 团队与韩巴大学 Chang-Won Lee 团队，针对双曲声子极化激元难以兼顾高品质因子与超小模式体积的问题，提出了一种基于动量量子化的光子晶体纳米腔平台。通过将六方氮化硼（h-BN）薄层与光子晶体纳米腔相结合，构建双曲极化激元腔晶体（HPCC），将连续的双曲色散转化为离散的动量本征态。其中，腔体横向边界提供法布里－珀罗相位匹配，光子带隙抑制面内辐射泄漏，分布式布拉格反射减弱模式混合，从而实现高波矢动量态的选择性稳定。通过调节腔体尺寸，可精确控制允许的动量本征态。研究人员利用光诱导力显微镜（PiFM）直接观测腔内模式，并结合二维傅里叶分析重构量子化色散关系。实验实现了超过 340 的品质因子、低至 $4.3\times10^{-7}(\lambda_0/n)^3$ 的模式体积，以及接近 10^7 的珀塞尔增强，为增强光与物质相互作用、选择性振动光谱及可重构中红外纳米光子器件提供了新途径。（刘帅）相关工作发表在《Science Advances》上。



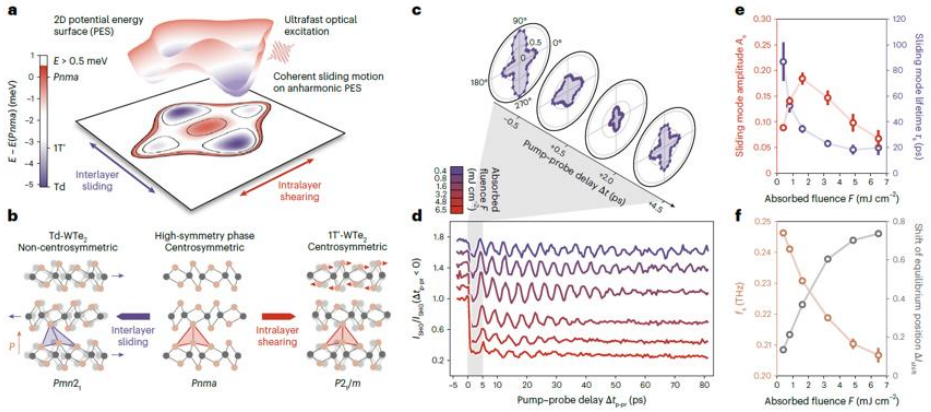
文章链接：https://doi.org/10.1126/sciadv.aej0277

2、突破滑移铁电体中振幅饱和极限的相干声子调控

利用超快激光脉冲激发相干声子，实现对晶格结构及其电子、磁性和铁电性质的动态调控，是凝聚态物理与功能材料研究的重要方向。相干声子能够驱动原子发生周期性集体运动，使材料在皮秒甚至飞秒时间尺度上进入远离平衡态的结构构型，为超快铁电开关和非平衡物态调控提供了新的可能。对于范德华滑移铁电体而言，相邻原子层之间的相对位移直接决定铁电极化，因此层间滑移声子的振动幅度是调控材料功能的关键参数。传统位移型相干声子激发理论通常假设，光激发产生的载流子越多，作用于晶格的驱动力越强，声子振幅也随之增大。然而，在强激光激发条件下，这一线性关系可能失效，声子振幅出现饱和甚至下降，限制了可实现的晶格位移及铁电调控范围。如何在不继续增加激光能量的条件下突破相干声子振幅极限，成为非线性晶格动力学和超快功能调控领域的重要问题。近日，德国维尔茨堡大学 Jan Gerrit Horstmann 等人组成的研究团队以范德华滑移铁电材料 Td-WTe_2 为对象，利用时间分辨二次谐波产生技术，结合第一性原理计算，系统研究了超快光激发下层间滑移声子与铁电极化的耦合机制。实验发现，频率约为 0.24 THz 的层间滑移声子在吸收光通量达到约 1.6 mJ cm^{-2} 时出现明显振幅饱和，进一步提高激发强度反而导致振幅减小。理论分析揭示，这一反常现象源于不同能量电子态对晶格施加方向相反的驱动力：低能电子态促进层间滑移，而高能电子态的激发则部分抵消这一作用。在此基础上，研究团队提出双脉冲相干调控策略，通过精确控制两次激光激发的时间间隔，在总光能量不变的条件下避免过度激发产生抵消作用的电子态，使滑移声子振幅较单脉冲激发

提高最高约 50%。增强的晶格运动进一步揭示了远离平衡态条件下的非谐声子耦合行为。该工作表明，相干晶格调控的关键不仅在于提高激发强度，更在于优化能量注入的时间结构，为突破非线性振幅限制、实现铁电极化的超快精准调控提供了新的研究路径。

相关内容发表于《Nature Physics》上。（张琰炯）



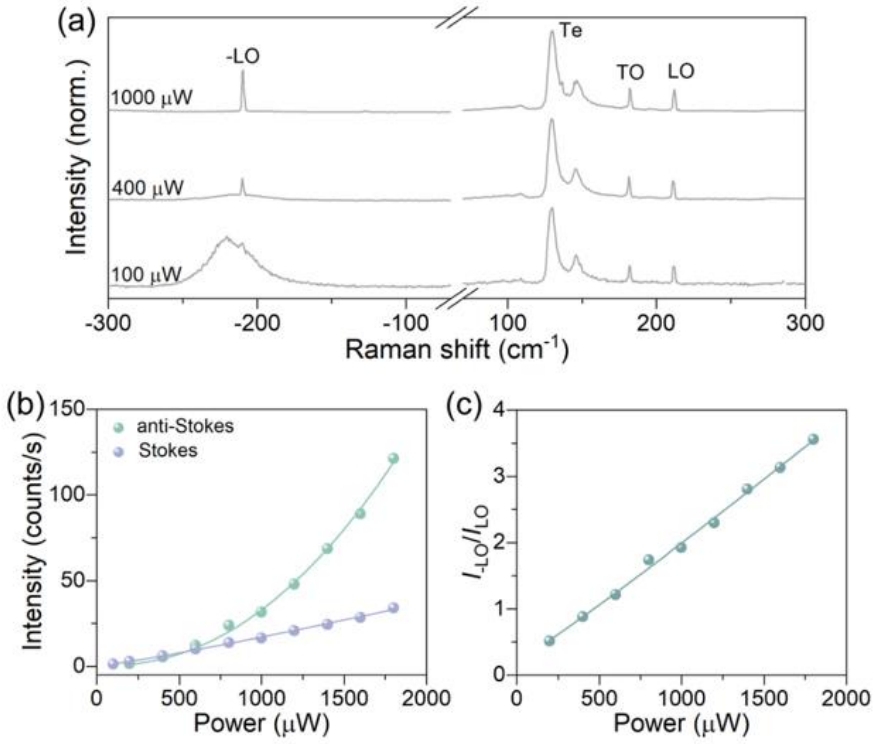
文章链接：https://doi.org/10.1038/s41567-026-03491-1

3、液氦温区振动泵浦驱动的非线性声子辅助上转换光致发光

半导体光学制冷利用反斯托克斯发光将晶格热能转化为高能光子，为实现无机械振动的固态制冷提供了重要途径。其中，声子辅助上转换发光是实现光学制冷的关键物理过程：半导体吸收低能量光子，并借助晶格振动提供的额外能量发射高能量光子，从而带走材料内部的热量。然而，传统理论通常将声子视为处于热平衡状态的被动能量库，认为其布居仅由温度决定，因此上转换发光强度与激发功率近似呈线性关系。这一认识使低温光学制冷面临严峻限制：随着温度降低，光学声子的热布居迅速减少，尤其在约 4 K 的液氦温区，声子辅助上转换过程被认为几乎无法有效进行。与此同时，非线性上转换发光通常被归因于多光子吸收，并被视为可能引入额外热量的不利因素。能否通过主动调控非平衡晶格振动，在极低温下增强声子辅助上转换发光，成为突破传统半导体光学制冷限制的重要科学问题。

近日，中国科学院半导体研究所张俊研究员团队以具有强 Fröhlich 相互作用的 ZnTe 纳米带为研究对象，结合 4 K 温度下的功率依赖拉曼光谱与上转换光致发光测量，揭示了光激发驱动非平衡纵向光学声子积累的物理机制。实验发现，纵向光学声子的斯托克斯拉曼信号随激发功率近似线性增长，而反斯托克斯信号呈接近二次方的非线性增长，表明光激发能够将声子系统驱动至偏离热平衡的振动泵浦状态。进一步研究表明，非平衡声子通过 Fröhlich 耦合增强材料内部电场，进而指数式提高载流子的场辅助隧穿概率，实现无需依赖多光子吸收的非线性上转换发光。理论计算进一步预测，在特定量子效率与背景吸收条件下，该机制可拓宽净制冷窗口，并显著提升制冷功率。该研究突破了声子仅作为被动热库的传统认识，为利用非平衡声子调控光与物质相互作用及发展低温半导体光学制冷技术提供了新的物理思路。

相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



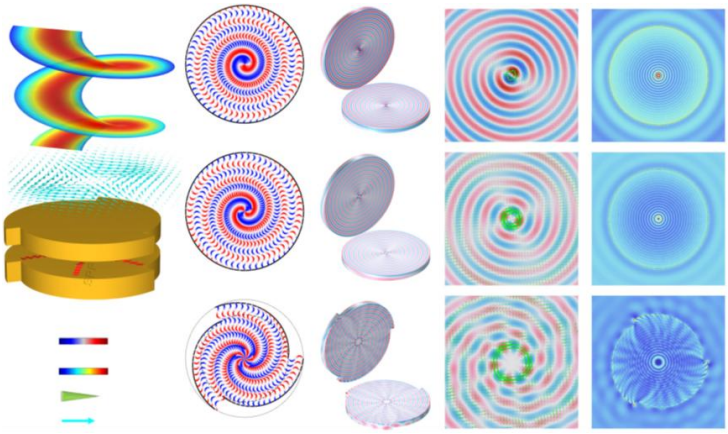
文章链接：https://doi.org/10.1103/51xg-rsrb

4、迈向超紧凑极限的等离激元涡旋腔

近年来，携带轨道角动量（OAM）的光学涡旋因其独特的相位结构和光场调控能力受到广泛关注，在信息复用、手性光学、光学操控及量子信息编码等领域展现出重要应用潜力。当光学涡旋与金属界面上的表面等离激元极化激元（SPPs）耦合时，可形成具有更强局域约束和光物质相互作用的等离激元涡旋（PVs）。目前，等离激元涡旋主要依靠金属表面的螺旋沟槽或散射结构产生，但受到 SPP 波长、结构几何畸变及能量损耗等因素限制，仍面临涡旋尺寸较大、模式纯度下降和近场增强不足等问题，制约了其高密度片上集成。此外，现有研究缺乏基于光物质相互作用的统一激发理论。近年来，金属－绝缘体－金属（MIM）纳米间隙结构的发展为突破上述限制提供了新途径。通过调节纳米间隙宽度，可有效改变 SPP 色散关系并压缩其波长，为实现深亚波长尺度的超紧凑等离激元涡旋提供了可能。

近日，华北电力大学田永辉教授和电子科技大学杨元杰教授团队合作，提出了一种基于间隙等离激元的涡旋谐振腔新方案，推动等离激元涡旋向超紧凑尺度发展。该方案采用金属－绝缘体－金属（MIM）纳米腔结构，通过调节绝缘层厚度改变表面等离激元的色散关系，实现 SPP 波长的显著压缩，从而有效减小涡旋尺寸。同时，利用腔体边界的固有反射形成类似法布里－珀罗腔的共振增强效应，无需额外反射结构即可显著提高局域电磁场强度。研究团队进一步建立了统一的物理理论框架，结合色散调控、边界反射及微扰激发模型，揭示了涡旋尺寸压缩、谐振增强与拓扑荷选择的物理机制。全波数值模拟验证了该方案能够产生具有清晰相位奇点、密集强度环及离散谐振模式的超紧凑涡旋场。此外，通过协同调控几何相位与动力学相位，实现了涡旋拓扑荷的灵活编程。该研究为片上手性光子学

与纳米尺度信息处理提供了新的技术途径。
相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-026-78518-5
（来源：两江科技评论）