

超材料前沿研究一周精选



2026 年 1 月 1 日-2026 年 1 月 3 日

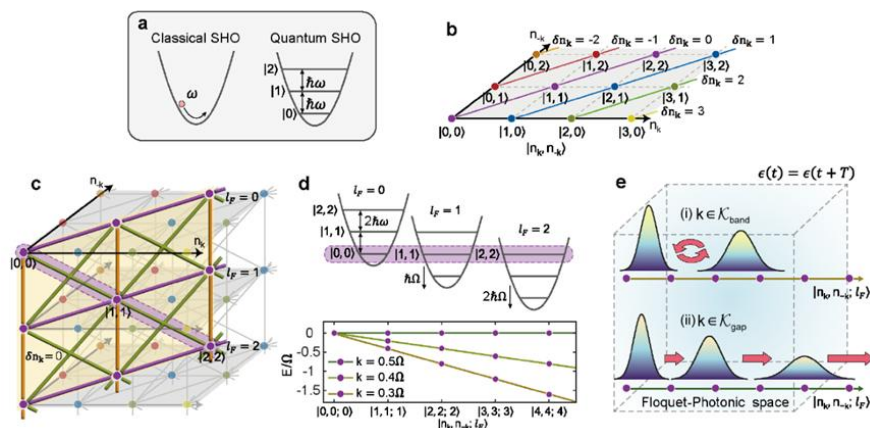
索引:

- 1、光子时间晶体的量子电动力学
- 2、高阶双曲声子极化激元的边界诱导激发
- 3、扭转诱导的全平带高阶声学拓扑绝缘体
- 4、通过构建 Ga₂O₃ 与 SiC 之间的共价键来提升界面热导率
- 5、量子芝诺动力学的实验实现助力鲁棒量子计量
- 6、耗散量子链路模型中具有精确稳态的多体非厄米趋肤效应
- 7、基于无刻蚀超表面的高相干有机激光发射
- 8、共振薄膜超表面中的非常规高次谐波产生

1、光子时间晶体的量子电动力学

光子时间晶体作为一种光学参数随时间周期性调制的动态介质，近年来已成为光子学领域的前沿研究方向。与传统空间周期结构不同，光子时间晶体在时间维度上引入周期性，从而展现出独特的波放大、频率转换及奇异能带结构等经典现象。尽管这些特性已在经典电磁理论框架下得到充分描述，但其在量子电动力学层面的表现仍属未知。经典理论虽能刻画非厄米特征，却难以揭示时间变化环境中特有的量子动力学行为。此外，经典描述中出现的非厄米性与量子化后哈密顿量的厄米性之间存在概念冲突，厘清这一矛盾对于理解光子时间晶体中的量子行为至关重要。因此，建立光子时间晶体的量子电动力学模型，不仅有助于调和经典与量子图像，还将为在时间域中调控光与物质相互作用开辟新途径。

近日，韩国中央大学的 Kun Woo Kim 副教授和韩国科学技术院的 Bumki Min 教授研究团队通过构建光子时间晶体的量子电动力学模型，揭示了经典理论与量子行为之间的深刻联系。研究指出，经典理论中动量间隙的形成对应于 Floquet-光子合成晶格中局域化-退局域化的量子相变。通过引入有效哈密顿量并采用转移矩阵方法，研究精确确定了临界动量位置，并证明经典场指数增长对应于量子合成空间中波包的加速扩散。通过分析能级间距统计、局域化长度以及逆参与率等指标，研究进一步刻画了量子动量间隙附近的相变特征。这些发现不仅为理解经典光子时间晶体中的非厄米物理提供了微观量子基础，也展示了利用时间调制介质控制量子光-物质相互作用的新可能性，为未来在电路量子电动力学平台或快速可调光子腔中实验观测相关量子效应奠定了理论基础。本研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）

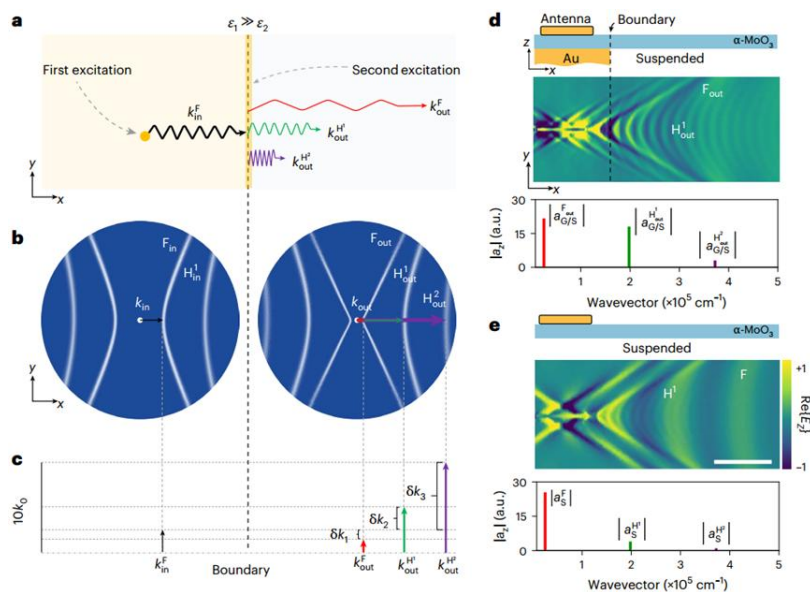


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67572-0>

2、高阶双曲声子极化激元的边界诱导激发

近年来,超小型光电子器件的研究发展已成为纳米光子学领域的热点。光子和声子的耦合产生了极具前景的准粒子——声子极化激元(PhPs),它们能够有效地将自由空间的光束约束到纳米尺度内,为开发超小型的光电器件提供了重要的理论与实验依据。在这类极小尺度的系统中,声子极化激元(PhPs)和高阶超材料声子极化激元(HoHPhPs)由于其更强的场约束力和波矢调节能力,显现出比传统光电器件更强的光物质相互作用,尤其在纳米级传感器、模式选择器以及量子计算等领域具有潜在的应用前景。然而,尽管这些高阶极化激元在理论上具有优越的性能,实际的激发和应用仍然面临巨大挑战。这是因为它们要求更高的波矢匹配,而这一问题传统方法很难克服,导致了HoHPhPs的特性与潜力尚未得到充分的探索与利用。

为了解决这一难题,上海交通大学戴庆教授、国家纳米科学中心胡海副研究员团队联合西班牙CIC nanoGUNE研究中心Rainer Hillenbrand教授通过在高对比度的金-空气混合基底上进行高效的HoHPhP激发实验,成功克服了传统方法中的波矢匹配问题,实现了HoHPhPs的激发效率比常规天线激发方式提高了超过六倍。研究团队设计并制造了 α -MoO₃薄层,通过精确的实验和理论分析,观察到HoHPhPs在 α -MoO₃层中的传播距离可达15.2微米,并且在该过程中,首次实现了伪双折射效应,极大地提升了不同极化模式的分离性,等效双折射范围从17.6到41.8不等。这一成果为纳米电路中的模式分配复用(MDM)技术开辟了新的可能,推动了超小型多模式光子设备的设计与应用。该研究不仅为高阶极化激元的激发提供了一种全新的方法,还为未来的纳米光子学器件、量子计算及热电转换等领域的发展提供了坚实的理论与实验验证,标志着HoHPhPs成为下一代纳米光学器件中不可或缺的重要平台。相关内容发表于《Nature Photonics》上。(张琰炯)



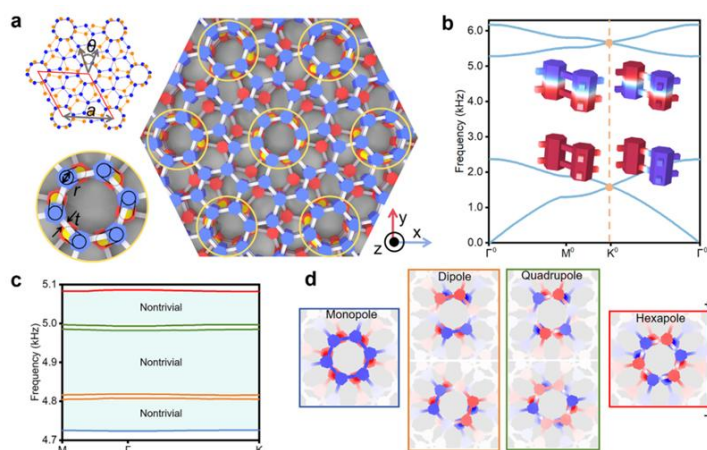
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01755-5>

3、扭转诱导的全平带高阶声学拓扑绝缘体

扭转莫尔超晶格因其独特的几何周期性以及层间布拉格散射效应,在能带工程与拓扑性质调控中展现出巨大潜力,已成为实现新奇物态的重要平台。平带能显著增强电子关联效应,为拓扑超导、关联绝缘体等物态提供了理想载体,因而在电子与玻色子系统(如光子学)中受到广泛关注。在声学系统中,通过散射体或腔体模型可以灵活定制莫尔势,为调控拓扑传输提供了便利。然而,现有研究多侧重于利用整体物理效应构建平带拓扑结构,而基于莫尔周期性本征模式直接实现全平带拓扑的机制尚未被深入探索,尤其是如何从单个腔体共振模式出发,系统性地设计整个晶格的平带拓扑特性,这在声学领域仍是一个挑战。

近日,华中科技大学的祝雪丰教授、彭玉桂副教授研究团队提出了一种通过在扭转莫尔超晶格中引入周期性强局域共振来实现全平带高阶拓扑绝缘体的新机制。研究以 21.78° 扭转角的声学石墨烯双层结构为平台,通过在特定位置引入层间耦合以形成竞争性相互作用,成功获得了具有驻波特性的全平带结构。定量分析表明,强层间耦合是促成平带形成与拓扑相变的关键因素。该声学扭转莫尔超晶格展现出六个平带及三个拓扑非平凡的带隙,其本征模式涵盖了从单极子到六极子的完整米氏共振。实验上通过三维打印样品验证了体态、边态、角态以及三维铰链态的存在,与仿真结果高度一致。该工作不仅为构建声学全平带拓扑系统提供了一条简洁有效的路径,深化了对扭转莫尔超晶格物理的理解,而且所展示的频率选择传输、高 Q 谐振及多维拓扑态控制特性,在声能收集、传感、波束分离及滤波等领域具有潜在的应用前景。本研究成果发表于《Advanced Materials》。

(刘梦洋)



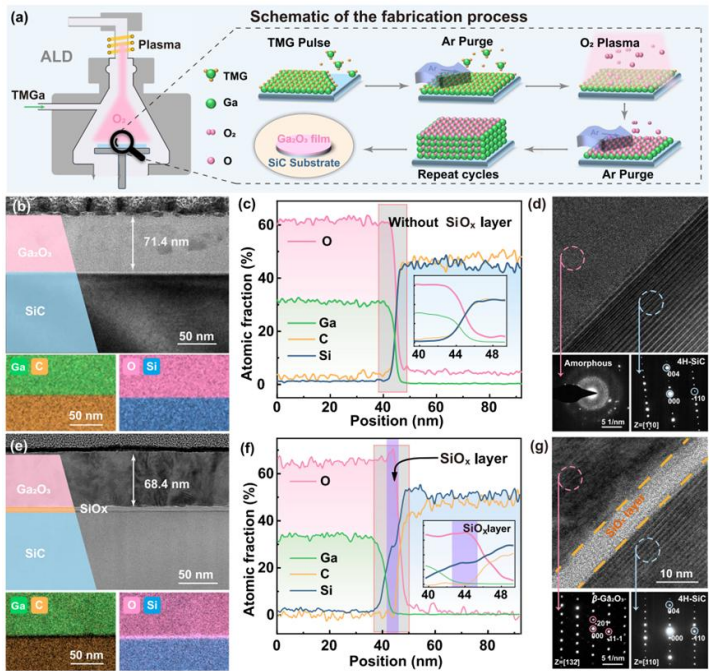
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202519287>

4、通过构建 Ga₂O₃ 与 SiC 之间的共价键来提升界面热导率

在高功率应用中，碳化硅（SiC）因其宽禁带（3.2 eV）和低导电损耗而被广泛应用。然而，尽管 SiC 在高功率领域表现优异，但其低饱和电子迁移率限制了其在高频领域的应用。与之相对，氮化镓（GaN）在高频条件下表现出显著优势，但由于其无法生产自支撑基板，这使得其在高功率应用中的应用受到限制。与 GaN 和 SiC 不同，氧化镓（Ga₂O₃）由于其超宽的禁带宽度（约 4.8 eV），成为下一代高电压功率器件和高频电子器件的理想候选材料。Ga₂O₃ 具有非常高的临界击穿场强（预计可达到 8 MV/cm）和低的导通电阻，能显著减少功率器件的损耗。除此之外，Ga₂O₃ 还具有较高的饱和电子速度（约 2×10^7 cm/s），并表现出卓越的化学与热稳定性，使其在极端环境下也能保持高效性能。然而，Ga₂O₃ 的固有热导率极低（约 10 - 27 W/m·K），远低于 Si（150 W/m·K）、AlN（180 W/m·K）和 SiC（490 W/m·K），这一缺点导致了严重的自加热效应，限制了其在高功率和高频应用中的可靠性。如何提高 Ga₂O₃ 的热导率，特别是在其与其他高热导率材料如 SiC 的异质结接口处，是当前亟待解决的关键技术问题。

为了有效解决这一瓶颈，复旦大学宁波研究院宽禁带半导体材料与器件研究所副所长马宏平博士团队，提出了一种通过构建 Ga₂O₃ 与 SiC 之间的共价键来提高界面热导率的新策略。研究团队通过精确的界面工程，在 Ga₂O₃ 和 SiC 之间成功构建了强共价键连接，并通过原位热反射实验（TDTR）测量，发现这种共价键连接显著提高了界面热导率（ITC），达到了 162 MW/m²·K，比传统的范德华力连接（17.5 MW/m²·K）提高了九倍。实验结果表明，在高功率密度下，采用这种共价键连接的器件在自加热效应方面实现了显著缓解，器件温度下降最多达 29° C，这为 Ga₂O₃ 电子器件的热管理提供了新的解决方案。该研究还通过 X 射线光电子能谱（XPS）分析和分子动力学（MD）模拟，揭示了 Ga₂O₃ 与 SiC 之间的反应机制。研究表明，在高温下，Ga₂O₃ 与 SiC 发生反应生成 SiO₂ 层，且这一过程中产生的共价键显著增强了界面热导率。通过对不同厚度 SiO₂ 层的测试，研究人员发现，当 SiO₂ 层厚度达到 5.8 nm 时，界面热导率达到最优值，同时有效降低了器件的自加热效应。此外，研究还指出，SiO₂ 层不仅有效传递热量，还通过优化界面微观结构，减少了声子散射，为 Ga₂O₃ 在高频高功率应用中的推广提供了可靠的热管理策略。这一突破性研究为提高 Ga₂O₃ 基电子器

件的热性能和可靠性开辟了新的方向，具有重要的学术意义和实际应用潜力，特别是在高功率和高频率领域的广泛应用。研究成果发表在《Nature Communications》上。(张琰炯)

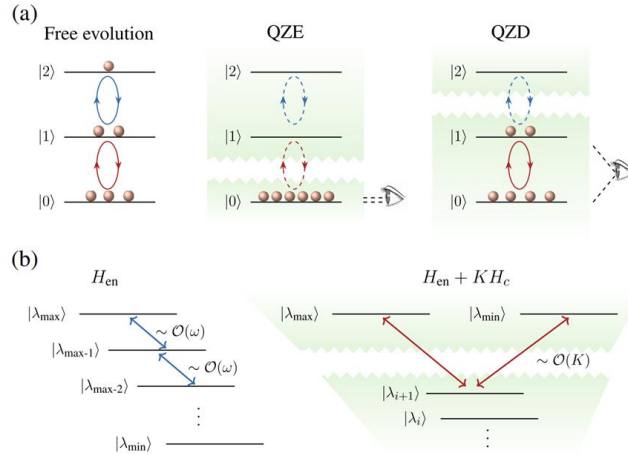


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65750-8>

5、量子芝诺动力学的实验实现助力鲁棒量子计量

量子芝诺效应（QZE）是指通过频繁投影测量抑制量子态演化的基本现象。其最具启示性的拓展是量子芝诺动力学（QZD）：当对多维子空间进行频繁投影时，系统虽然被限制在“芝诺子空间”内，却仍可在其中发生相干演化并远离初态，从而表现出一定的抗噪声能力。除投影测量外，频繁么正脉冲或强连续耦合也可诱导 QZD，拓宽了其物理实现方式，并推动其在多种量子平台上的实验进展。基于其对相干演化的保护作用，QZD 被认为是实现鲁棒量子计量的有力工具。然而，将 QZD 真正用于量子计量仍面临两点关键挑战：其一，量子计量往往依赖多粒子纠缠以提升参数估计精度，但许多 QZD 研究集中在单粒子情形，多体资源的利用与分配仍不直观；其二，实现 QZD 所需的额外测量/控制/耦合可能与参数编码动力学不对易，从而干扰编码过程并降低计量精度。因此，一个核心问题是：能否在保证与计量编码兼容的前提下，利用 QZD 的抗噪声优势提升测量稳健性。近日，深圳大学李俊教授，南方科技大学鲁大为教授，中国计量大学董莹教授联合团队提出了一种基于 QZD 的鲁棒量子计量方案，并在核磁共振平台上进行了实验验证。该方案在参数编码阶段引入量子比特间的强耦合以实现 QZD：这一实现对具有天然相互作用的核磁体系较为直接，在超导等可编程平台中也具备可行性。由于不依赖额外的频繁测量，该策略更适合推广到多量子比特场景。更重要的是，作者证明所构建的 QZD 与编码过程在本质上是兼容的：QZD 在抑制噪声的同时不会破坏信号的相位积累，因此预期的计量精度不会因引入 QZD 而受损。作者以多量子比特拉姆齐干涉这一典型量子传感协议为基准，在核磁平台上开展验证。实验显示，该方案在并行设置下有效恢复了振幅阻尼噪声下的 $1/N$ 精度标度；在顺

序设置中，通过延长相干时间进一步提升了参数估计精度。数值模拟还表明该方案具有良好的可扩展性，并具备与动态解耦技术集成的潜力，凸显了其实用性与推广前景。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）

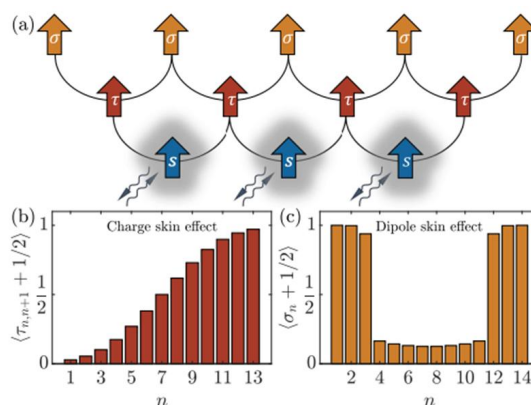


文章链接：<https://doi.org/10.1103/vs19-fwdz>

6、耗散量子链路模型中具有精确稳态的多体非厄米趋肤效应

规范场论是现代物理的基石，其晶格化形式为研究强关联量子体系与新奇量子相提供了通用框架。随着冷原子与超导电路等量子模拟平台的发展，晶格规范理论的非平衡动力学正在走向实验可观测。与此同时，器件与环境的非相干耦合不可避免，既可能引入规范约束的破缺，也可能在耗散与多体动力学的耦合下催生封闭系统中没有的新型非平衡现象。非厄米趋肤效应(non-Hermitian skin effect, NHSE)是指在开放边界条件下，本应呈现体分布的态会整体向边界聚集。围绕多体 NHSE 的研究快速发展，但多体相互作用的复杂性通常使体系难以获得可解析描述。同时，许多方案依赖虚规范场来诱导非互易跃迁，这在多体量子实验中实现更具挑战，也缺乏规范理论视角下的直接物理解释。

近日，清华大学汪忠教授团队与普林斯顿大学廉磊（Biao Lian）助理教授合作，提出并研究了一个耗散量子链路模型，在晶格规范框架下实现多体非厄米趋肤效应。该研究在链路（动力学规范场自由度）上引入可工程化的耗散过程，由此有效诱导物质场的非互易跃迁，从而在开放边界下产生多体趋肤行为。更关键的是，借助局域规范对称性，研究人员构造出了可解析的精确稳态，并提出一种新的多体趋肤形态，即分级趋肤效应(hierarchical skin effect)。在这一机制下，不同子系统自由度在边界聚集，并呈现不同阶次的多极矩累积，相关构造有望推广至任意维度的量子链路模型。此外，该工作也为后续研究提供了若干可能方向，例如将耗散晶格规范理论推广到非阿贝尔情形，并结合 Keldysh 场论与拓扑场论对耗散规范场开展进一步研究。相关研究内容发表于《Physical Review Letters》。（刘磊）

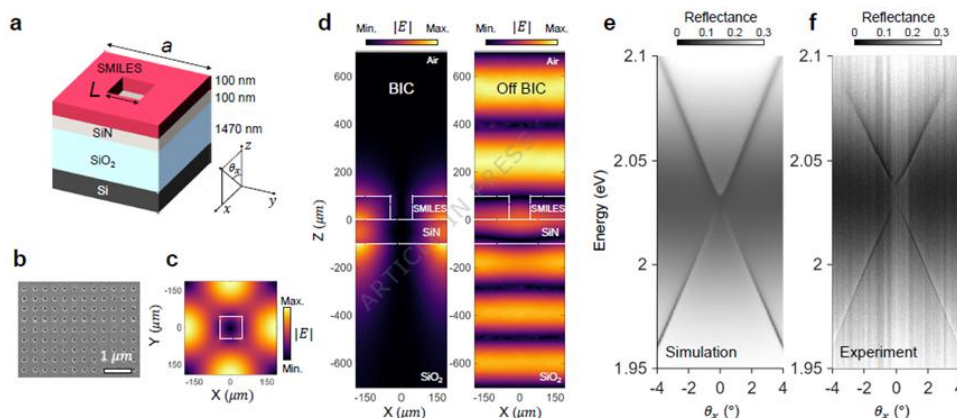


文章链接: <https://doi.org/10.1103/wztw-18wg>

7、基于无刻蚀超表面的高相干有机激光发射

超表面能够在亚波长尺度上灵活调控光的振幅、相位、传播方向和偏振,已广泛应用于平面光学、全息成像、激光与量子通信等领域。基于连续谱束缚态(BIC)的超表面激光器因其结构紧凑、线宽窄、高相干性、强方向性及良好的可调性而备受关注。传统III-V族半导体超表面激光器依托成熟的制备工艺和优异材料特性,实现了超高品质因子与极窄线宽。与此同时,过渡金属硫族化物、钙钛矿、胶体纳米材料及有机材料等新型体系,凭借溶液可加工性、可设计合成和柔性兼容等优势,逐渐成为研究热点。然而,这类低折射率材料通常光场束缚能力弱、衍射效率低,且难以直接纳米加工,多作为高折射率被动结构中的增益介质。尽管近期已有无刻蚀超表面设计在低折射率材料中实现了超高Q因子,有效降低了散射损耗,但相关工作多停留在被动器件层面,仍亟需与有源介质集成以实现高性能发光器件。

近日,纽约市立学院 Daegwang Choi、Vinod M. Menon 团队,报道了一种基于连续谱束缚态(BIC)的高相干激光发射,其来源于直接在有机超分子材料上图案化的无刻蚀超表面结构。该有机超分子材料由小分子离子隔离晶格(SMILES)构成。实验中,研究人员观测到激光发射具有极高的方向性,其发散角仅为 0.2° ; 激射线宽为 0.04 nm (受限于实验系统的光谱分辨率); 同时,其时间相干性可达 $20.4 \pm 2.4 \text{ ps}$ 。上述优异性能源于高品质超表面结构与 SMILES 材料内在的均匀性和结构稳定性之间的协同作用。该研究为实现有源超表面和有机分子激光器提供了一种有效途径,相较于基于溶液可加工材料的传统方案,展现出显著优势。相关工作发表在《Nature Communications》上。(刘帅)

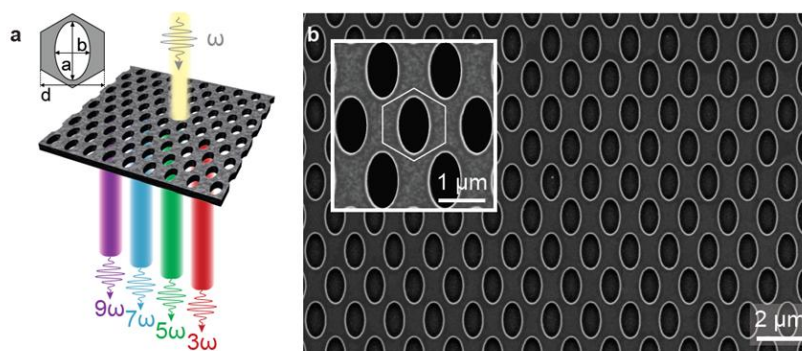


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67628-1>

8、共振薄膜超表面中的非常规高次谐波产生

高次谐波产生 (HHG) 是强场物理与超快非线性光学中的核心现象, 最初在稀有气体中被发现, 并推动了阿秒科学的发展。随后, HHG 被拓展至凝聚态体系, 在体晶体中不仅展现出紧凑型高频光源的潜力, 也成为研究晶体对称性、电子拓扑及超快载流子动力学的重要手段。多种材料体系已实现高阶谐波产生, 谐波阶数可达数十阶。纳米光子学的发展使超表面成为增强 HHG 的重要平台, 其中连续谱束缚态 (BIC) 及准 BIC (q-BIC) 通过抑制辐射损耗实现超高 Q 因子共振, 从而显著增强局域场并提升非线性响应。然而, 基于衬底的纳米结构往往受到衬底效应、热效应及吸收损耗的干扰, 使相关物理机制难以清晰解析。自由悬浮介质薄膜提供了一种无衬底、低损耗的极简体系。近期研究表明, 硅薄膜中 HHG 的功率标度与理论预测一致, 而高 Q 自由悬浮结构兼具优异稳定性, 为研究共振增强条件下的非常规 HHG 行为提供了理想平台。

近日, 澳大利亚国立大学 Yuri Kivshar 教授、瑞士洛桑联邦理工学院 Hatice Altug 教授团队, 研究了支持准连续谱束缚态 (q-BIC) 超高 Q 共振的结构化自由悬浮薄膜超表面中的高次谐波产生行为。该体系在保持无衬底简洁结构的同时, 实现了显著的局域场增强。实验结果表明, 与未结构化薄膜相比, 谐波信号在共振条件下得到大幅提升, 其中第七次谐波的增强幅度超过三个数量级, 并且仅在共振附近观测到第九次谐波产生。更为重要的是, 谐波强度对泵浦功率的依赖关系明显偏离传统微扰理论, 呈现出非整数幂次的非常规标度行为。理论模拟进一步揭示, 该现象源于 q-BIC 共振诱导的强局域场增强, 使不同阶非线性极化项之间产生显著耦合效应, 从而在中等激光注量下即可触发通常仅在更高强度条件下才出现的强场非线性过程。上述结果表明, 自由悬浮共振薄膜为研究和调控极端高次谐波产生机制提供了一种全新的、极具潜力的实验平台。相关工作发表在《Nature Communications》上。(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67871-6>

(来源: 两江科技评论)