

超材料前沿研究一周精选



2026 年 7 月 6 日-2026 年 7 月 12 日

索引:

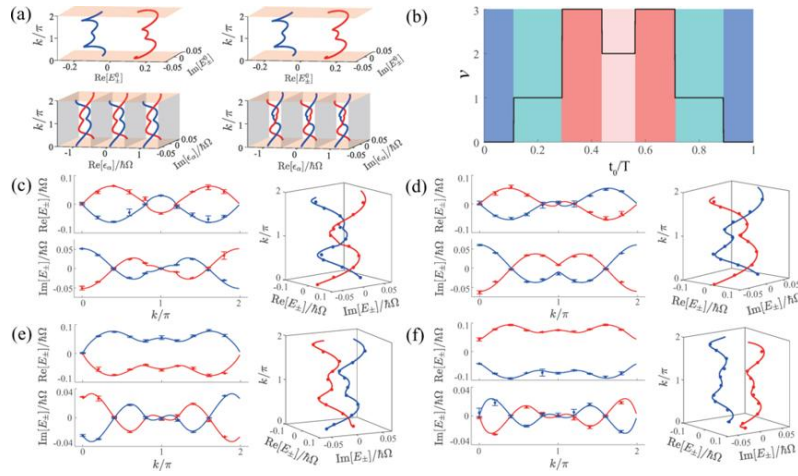
- 1、单光子干涉测量中 Floquet 工程拓扑复杂能带编织的实现
- 2、基于光子时间晶体的微波涡旋束激射
- 3、介电聚合物电击穿与机械韧性关系
- 4、PT 对称磁振子激光与反激光
- 5、BaTiO₃ 晶体临界点附近结构无序的直接观察
- 6、物质波非绝热非阿贝尔编织的实验观测
- 7、面向任意电磁波操控的可重编程双稳态超表面

1、单光子干涉测量中 Floquet 工程拓扑复杂能带编织的实现

拓扑纽结与链环因其与自然科学多个分支之间的深刻联系而长期受到广泛关注。近年来，非厄米物理为拓扑纽结研究提供了新的平台。研究表明，非厄米系统中的复能量能带可以在参数空间中形成辫状结构，其编织拓扑可由辫群 BN 的共轭类刻画，从而在传统基于线隙或点隙的非厄米能带拓扑分类之外，提供了一类新的拓扑分类框架。由不同纽结和链环构成的复能量弦已在多种经典与量子体系中得到观测，包括环形谐振器、腔光力学系统以及声学系统等。与此同时，时周期驱动与非厄米性的结合为人工构造非厄米拓扑相开辟了新的途径。通过弗洛凯工程，人们可以利用周期性驱动调控系统的有效哈密顿量，进而实现静态系统中难以获得甚至不存在的非平衡拓扑现象。近年来，非厄米弗洛凯绝缘体、非厄米弗洛凯高阶拓扑相以及弗洛凯皮肤拓扑效应等相继被提出和实现，显示出弗洛凯调控在非厄米拓扑物理中的独特优势。

近日，西安交通大学刘博教授团队通过理论预测并实验观测了基于单光子干涉网络实现的快速驱动方案下非厄米能带的弗洛凯工程拓扑复杂能量编织现象。通过对弗洛凯哈密顿量本征谱的实验测量，团队发现通过改变时间周期性驱动可调控不同类型的结状本征能量弦；不同的编织拓扑结构可通过本征谱中的特定结点直接观测；同时亦可通过测量 Bloch 球面上本征矢环的交叉模式进行表征。这些方法彼此完全一致，从而为检测不同结拓扑结构提供了两种替代途径。通过测量涌现例外点及其对应的拓扑不变量，团队还实验确定了具有不同结结构的弗洛凯拓扑相之间的转变过程。研究发现，仅统计涌现例外点总数即可作为判定不同结结构间转变的决定性特征指标。本文构建了一个高度可控的光子平台，可精确调控时间周期性驱动参数。该研究首次成功将弗洛凯工程技术与非厄米编织拓扑相结合，并揭示了二者间的本质相互作用机制。

相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



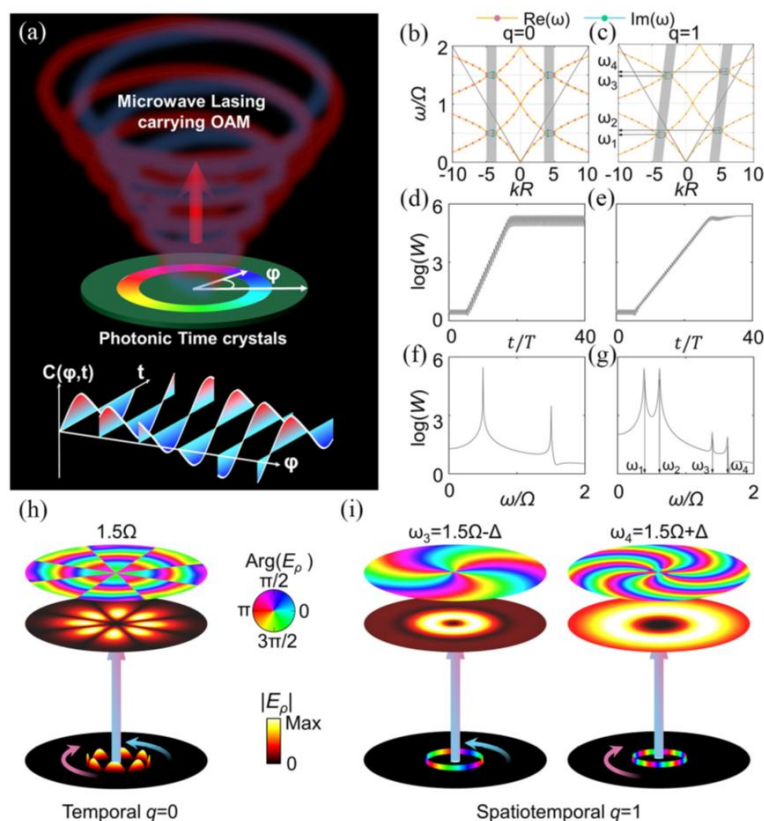
文章链接: <https://doi.org/10.1103/7wtv-p915>

2、基于光子时间晶体的微波涡旋束激射

时变介质通过周期调制材料参数,为波动物理提供了静态体系难以实现的新自由度。光子时间晶体利用电磁参数的周期性时间调制产生动量带隙,可实现动量选择性增益、带隙拓扑相变,以及无需增益介质和高品质因子腔的非共振激射。但该机制对调制速度和幅度要求很高,实验实现仍具挑战。传统微波激射器虽应用于深空通信和量子技术,却依赖高品质因子腔、特定增益介质以及低温、高真空和强磁场,存在调谐范围窄、能效有限等问题,也难以产生携带轨道角动量的结构化微波。已有研究虽在封闭光子时间晶体中观察到由动量带隙驱动的微波振荡和激射转变,但封闭结构无法实现面外辐射;开放结构又受调制深度不足限制。因此,关键是构建开放式光子时间晶体,实现表面发射的轨道角动量微波涡旋激射。

近日,北京理工大学张蔚暄研究员、孙厚军教授、张向东教授研究团队,首次在实验上利用环形光子时间晶体实现了表面发射的微波涡旋束激射,且无需传统增益介质和高品质因子谐振腔。研究人员构建了由乘法器驱动的时变超材料,使等效介电常数调制深度超过 100%,由此形成足够宽的动量带隙,以克服系统固有损耗并产生自持的相干微波放大。进一步地,时空调制打破了环形光子时间晶体中顺时针与逆时针动量带隙模式之间的互易性,从而能够选择性激发携带轨道角动量的微波激射。该工作将光子时间晶体物理与轨道角动量微波辐射相结合,为下一代无线通信、高精度传感及轨道角动量相关技术提供了新的实现平台。

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



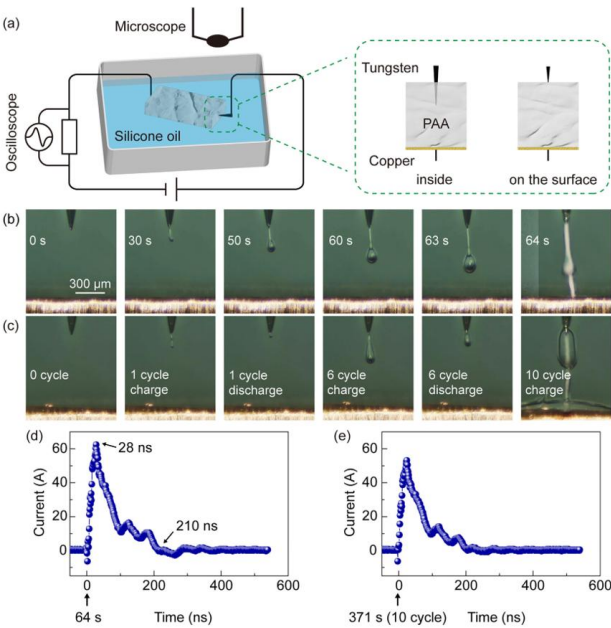
文章链接: <https://doi.org/10.1103/6gn2-2v9b>

3、介电聚合物电击穿与机械韧性关系

介电聚合物具有充放电速度快、功率密度高和易加工等优势，是脉冲功率系统、电动汽车、电磁成形、医疗除颤及先进电容器中的关键绝缘与储能材料。其储能密度与击穿强度的平方成正比，因此，如何延缓电击穿、提升耐压能力，直接决定器件的安全性和性能上限。长期以来，介电击穿通常被视为纯电学失效过程，相关理论主要从本征电子跃迁、局部导电、Maxwell 应力或杨氏模量等角度加以解释。然而，真实聚合物中普遍存在结构缺陷，其实际击穿场强远低于理想晶体的理论极限，而且不同模型往往只适用于特定材料，难以统一解释软、硬聚合物的失效行为。更关键的是，击穿过程中是否伴随真实的裂纹萌生和扩展，以及材料抵抗机械破坏的能力能否用于预测电学失效，一直缺乏直接证据。厘清电击穿与机械断裂之间的关系，将为聚合物电介质从“提高极化”转向“兼顾储能与抗失效”提供新的设计思路。

针对这一问题，南方科技大学李江宇教授研究团队通过原位光学观测、力学测试、介电击穿实验及相场模拟，揭示了介电聚合物电击穿与机械韧性之间的普适联系。原位实验显示，聚丙烯酸在高电压下并非直接发生瞬时导通，而是先在电极尖端形成裂纹通道，随后逐步向对电极扩展；当通道贯穿样品后，电流在约 28 ns 内迅速升至约 60 A 并造成永久击穿，证明裂纹萌生和生长是失效的关键前驱过程。团队进一步对 BOPP、PET 及多种无定形和半结晶聚合物进行测试，发现预拉伸降低拉伸韧性的同时，也会同步降低击穿强度；不同厚度 PET 的击穿变化同样跟随其力学韧性变化。综合 9 类聚合物及文献数据后，研究者建立了“电韧性—拉伸韧性”的线性关系，并可据此准确预测介电常数和杨氏模量跨越多个数量级

材料的击穿强度。相比之下，传统杨氏模量关联和电机机械失稳模型并不能普遍适用。相场模拟进一步表明，裂纹先于电树形成，提升断裂能够提高裂纹起始电压，并再现电韧性与机械韧性的线性关系。该工作将长期被割裂讨论的电学失效与机械断裂统一起来，提出通过增韧策略提升介电强度的新范式，为高能量密度、高可靠性聚合物电容器和绝缘材料设计提供了直接理论依据相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）



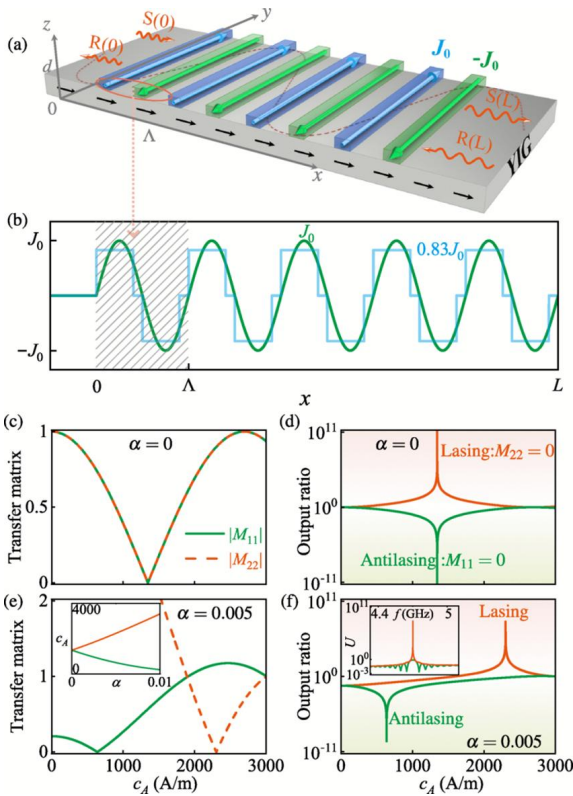
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.74050>

4、PT 对称磁振子激光与反激光

磁振子作为自旋波的量子化激发，已被广泛认为是一类重要的信息载体，可用于构建低功耗、可集成的新型信息处理器件。与传统电荷自由度相比，磁振子具有波长短、可受磁场、电流、几何结构等多种外部刺激调控，并易于与自旋电子学器件集成等优势。因此，如何在磁性纳米结构中高效地产生、放大并操控相干磁振子，是发展磁振子学器件的关键问题之一。实现相干磁振子发射的一种重要途径是自旋扭矩振荡器。在这类器件中，直流电流向磁层注入自旋流，并通过自旋转移力矩或自旋轨道力矩对局域磁化进动施加抗阻尼作用，从而补偿材料本征阻尼并放大磁振子振幅。然而，单纯依赖增益驱动的磁振子发生器通常容易激发多个模式，导致相干性和单模纯度受到限制。虽然电同步自旋扭矩振荡器阵列可以改善单模输出，但由于磁性材料内部相互作用和磁有序类型所导致的非线性色散，磁振子激光的稳定单模运行仍然面临挑战。

近日，哈雷-维滕贝格大学 Jamal Berakdar 教授和国防科技大学景辉教授团队提出了一种可电调谐的 PT 对称磁子激光与反激光机制，并设计了一种由磁有序平面波导中的电流偏置区域构成的器件。在偏置区域内，多根承载直流电荷电流的重金属导线周期性地连接至波导，产生空间周期性的自旋-轨道扭矩，从而实现电调制的磁子增益与损耗。团队证明：尽管存在非线性磁子色散，这种修饰后的波导仍能在布拉格点发射强单频磁子模式（激光），同时吸收相位匹配的同频入

射相干磁子（反激光）。与仅依赖增益驱动多模激发的自旋扭矩振荡器不同，PT对称的增益-损耗平衡能够稳定单一磁子模式的工作状态。该物理机制可通过解析模型描述，并经全面的材料特异性及器件特定数值模拟验证。进一步表明，该磁子激光吸收器可实现电调谐，并适用于环形结构及反铁磁序环境。这些成果构建了一个实验上可行的平台，使单一元件同时兼具磁子激光器与吸收器功能，为可重构非厄米磁子学及集成磁子信号处理开辟了新途径。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



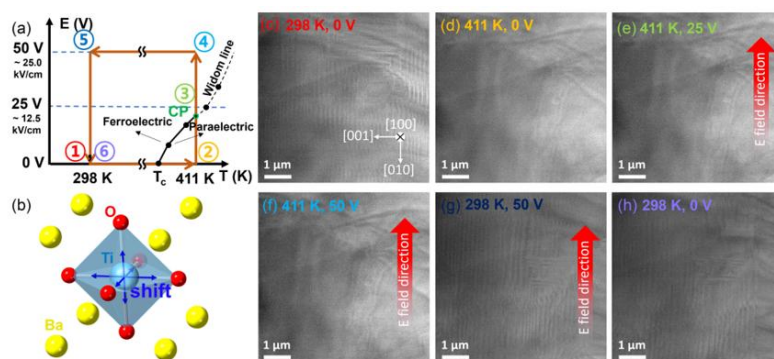
文章链接: <https://doi.org/10.1103/2lts-5d39>

5、BaTiO₃晶体临界点附近结构无序的直接观察

压电材料能够实现机械能与电能之间的相互转换，是传感器、精密驱动器、超声器件、医疗成像以及新一代智能电子系统的核心功能材料。其中，钛酸钡(BaTiO₃)作为最经典的无铅铁电材料，因具有优异的介电和压电性能，被广泛应用于多层陶瓷电容器、压电执行器等器件。长期以来，人们发现铁电材料在电场-温度相图中的临界点(Critical Point, CP)附近往往表现出异常增强的介电、压电和电卡效应，因此如何利用临界点提升材料性能一直是凝聚态物理和材料科学的重要研究方向。然而，一个困扰学界数十年的关键问题始终没有得到解答：为什么临界点附近会出现如此巨大的性能增强？过去研究主要依赖拉曼光谱、X射线衍射等技术推测结构演化，虽然证明了性能峰值确实存在，却难以在原子尺度直接观察临界区域的晶体结构变化，也无法揭示局域极化、晶格畸变与宏观压电响应之间的内在联系。因此，建立临界点附近原子结构演化与功能性能之间的直接关联，不仅是理解铁电相变物理本质的重要科学问题，也将为设计更高性能、更低铅甚至无铅压电材料提供新的理论基础和技术路线。

针对这一科学难题,美国艾姆斯国家实验室周琳教授联合佛罗里达大学南部分校 Inna Ponomareva 教授和爱荷华州立大学谭晓礼教授研究团队创新性地将原位加热—电偏置透射电子显微镜 (in situ biasing-heating TEM) 与第一性原理有效哈密顿量分子动力学模拟相结合,首次在原子尺度直接观察了 BaTiO₃ 单晶跨越临界点过程中结构无序的演化规律。实验结果显示,当体系接近临界点时,宏观铁电畴逐渐消失,而高分辨 TEM 傅里叶变换 (FFT) 中的 (001) 衍射斑明显展宽,表明 Ti 离子偏心位移方向发生随机化,并伴随大量局域晶格畸变,材料进入高度无序的极化状态;随着外加电场进一步增强,随机分布的局域极化开始重新沿电场方向排列,无序逐渐转变为有序,从而导致压电增强效应减弱。理论模拟进一步验证了实验发现,并揭示压电系数和介电响应均在铁电—顺电相边界及其 Widom 线附近达到最大值;与此同时,局域偶极矩的概率分布明显展宽,说明结构无序和极化涨落达到峰值,而更强电场则重新收窄分布,使体系恢复有序状态。研究由此首次建立了“结构无序增强—极化涨落增强—压电响应增强”之间的直接因果关系,证明临界点附近巨大的压电性能并非来源于传统意义上的畴壁运动,而是源于随机极化和局域晶格无序共同诱导的高涨落状态。这项工作不仅揭示了非弛豫型铁电材料临界点增强效应的微观起源,也提出了通过精确调控无序—有序平衡优化压电、介电乃至电卡效应的新设计策略,为新一代高性能铁电功能材料和智能电子器件的发展提供了重要理论依据

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



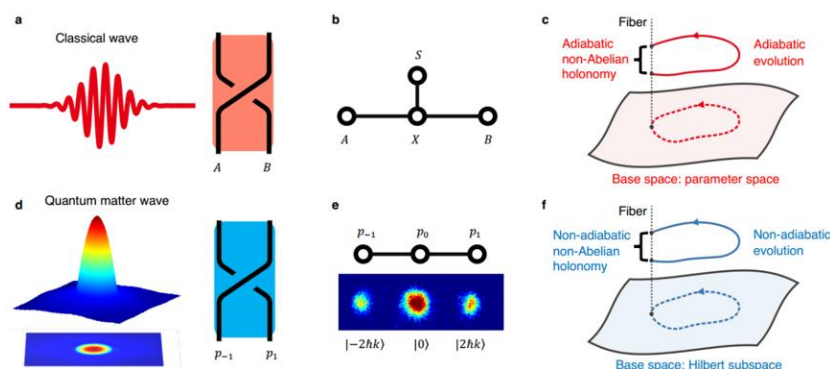
文章链接: <https://doi.org/10.1103/qhn9-42d5>

6、物质波非绝热非阿贝尔编织的实验观测

非阿贝尔编织将几何演化、拓扑交换与非对易操作联系起来,是实现拓扑量子门和容错量子计算的重要理论基础。传统方案通常依赖非阿贝尔任意子的交换,但这类准粒子需要在分数量子霍尔态或拓扑超导体等强关联拓扑物态中产生,实验制备与操控难度极高。近年来,声学 and 光学波动系统通过可编程波导结构模拟了非阿贝尔编织,并推动了非阿贝尔规范场、拓扑输运和拓扑泵浦等研究。然而,已有模拟大多建立在绝热 Wilczek - Zee holonomy 之上,需要系统参数缓慢变化以抑制非绝热跃迁,因而操作时间较长,也主要局限于经典波平台。如何将非阿贝尔编织扩展至真正的量子物质波,同时摆脱绝热条件对速度的限制,并进一步用于量子态制备与操控,成为该领域亟待解决的问题。

近日,山西大学的赵延霆教授和梅锋教授研究团队在玻色 - 爱因斯坦凝聚体中构建离散动量态晶格,利用双光子布拉格跃迁调控不同动量模式之间的耦合,并将动量态编码为模拟编织的有效链股。通过设计循环演化子空间和满足平行输运条

件的耦合脉冲,研究实现了由 Aharonov - Anandan 几何结构产生的非绝热非阿贝尔 holonomy, 使系统无须经历缓慢绝热过程即可完成几何操作。实验首先实现了高保真的 Hadamard 门和交换门, 并通过改变操作顺序得到彼此正交或明显不同的末态, 直接验证了操作矩阵的非对易代数。进一步地, 研究在多个动量态之间实施两种顺序相反的交换序列, 观测到相同初态被映射至不同末态, 从而完成非绝热非阿贝尔编织的量子模拟。该平台还可通过调节激光强度与相位灵活控制编织矩阵, 并实现动量叠加态的制备、转移、扩展和重新分配, 为快速非阿贝尔量子操控、非绝热拓扑泵浦及 holonomic 量子信息处理提供了新的实验路径。该文章发表于《Nature Communications》。(刘梦洋)



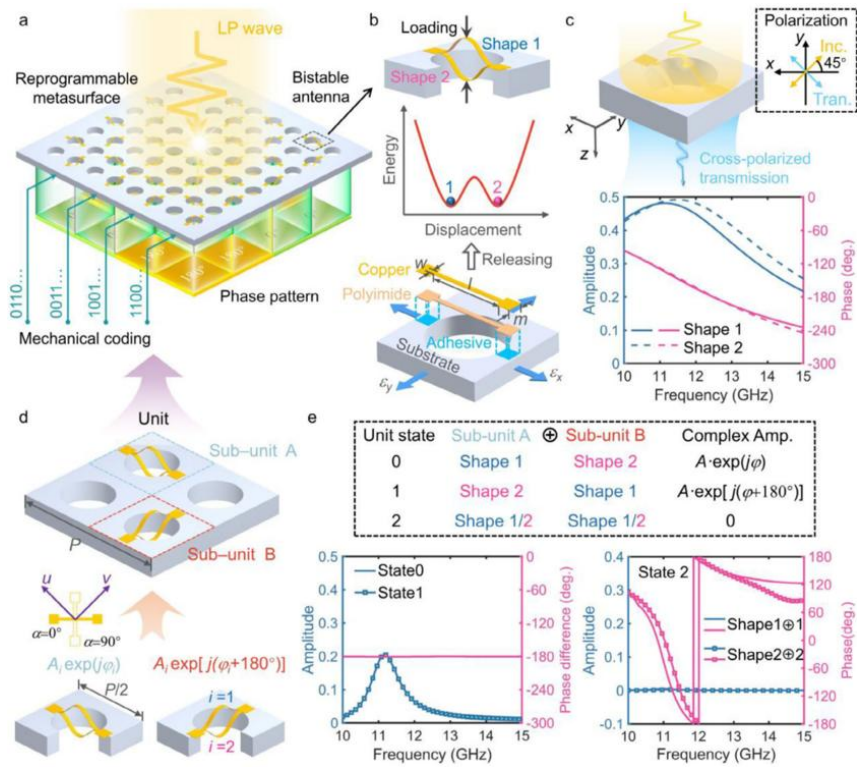
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-75085-7>

7、面向任意电磁波操控的可重编程双稳态超表面

随着卫星通信、低空飞行器、可穿戴电磁设备和物联网等领域向智能化与多功能化发展,能够动态调控电磁波传播的可重构超表面受到广泛关注。现有方案通常借助相变材料、二维材料、二极管或变容器件改变单元的电磁响应,虽然具备较快调制速度和较强功能扩展能力,却往往依赖复杂的偏置电路、控制系统及精细化集成。机械可重构超表面则通过拉伸、折纸、剪纸或三维屈曲等方式改变谐振结构形貌,具有结构简单、无需持续供能和状态保持稳定等优势。然而,传统机械调控多表现为整体协同变形,难以实现单元级独立寻址;即使部分研究已实现幅度编码,受限于形变引起的相位变化不足且难以预测,真正可编程的相位控制仍然缺失。因此,如何在保持机械结构简洁和可靠性的同时,实现宽频、可重复且独立可编程的相位调制,成为机械超表面迈向任意波前操控的关键问题。

近日,西安交通大学的张留洋教授和美国加州大学洛杉矶分校的陈俊副教授研究团队,提出一种基于三维屈曲双稳态天线的机械可重编程超表面。研究利用带孔超弹性预拉伸基底,将平面铜/聚酰亚胺天线转化为可在上下两种稳定形态之间反复切换的三维结构,并在单个编码单元内正交布置两根双稳态天线。借助两路交叉极化电磁波的可控干涉,不同形态组合可产生幅度近似一致、相位相差约 180 度的两种状态,从而形成宽频一比特相位编码。基于这一原理制备的阵列样品能够通过局部面外加载逐单元写入空间相位分布,实验与仿真共同验证了可调波束偏转、三维焦点横向扫描、焦距切换以及多图案全息显示等功能。该方案将机械双稳态的非易失性、三维屈曲结构的可制造性与数字相位编码相结合,为摆脱复杂电子控制系统、构建低功耗和可反复编程的电磁器件提供了新路径,并有望拓展至自适应隐身、增强现实、三维成像、机械传感和信息处理等应用。

该研究发表于《Advanced Materials》。(刘梦洋)



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202522736>
 (来源: 两江科技评论)