

超材料前沿研究一周精选

2025 年 6 月 23 日-2025 年 6 月 29 日

索引：

- 1、时间光子前馈晶格中的非线性非厄米趋肤效应和趋肤孤子
- 2、共振量子隧穿实现等离子体生物传感器
- 3、Floquet 光子晶格中非本征拓扑相的观察
- 4、磁性石墨烯中的量子自旋霍尔效应
- 5、氧化物铁电薄膜极性拓扑的界面调控
- 6、用于先进热界面材料的氮化硼微米片双向组装
- 7、具有可调负泊松比与多稳态的三维双曲折纸超材料

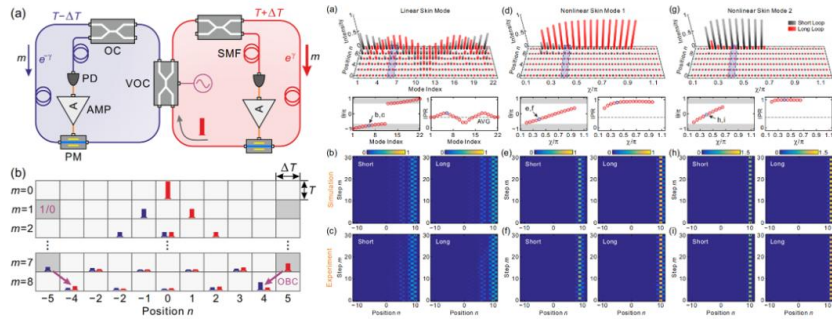
1、时间光子前馈晶格中的非线性非厄米趋肤效应和趋肤孤子

在过去二十年里，非厄米物理凭借与传统厄米体系截然不同的性质而备受关注。与具有实特征谱并满足时间反演对称的厄米系统不同，非厄米系统的本征值可为复数，因而可呈现非互易传播、EP 点以及非厄米趋肤效应（NHSE）等新奇现象。在满足开边界条件且跃迁振幅存在非对称性的晶格中，NHSE 会使体态异常地聚集到边界，呈现与厄米体系中延伸 Bloch 波截然不同的局域化特征。由于 NHSE 的出现，传统的体-边对应关系失效并亟待修订，从而极大推动了非厄米拓扑物理的发展。此外，NHSE 固有的局域化及其对边界条件的敏感性，使其在能源收集、量子传感等方面具有潜在应用价值。光学系统被视为观测 NHSE 并实现应用的理想平台，例如，通过增益-损耗耦合双光纤环构建的时间量子行走晶格，已经在实验上实现了具有域墙边界条件的 NHSE 并用于拓扑光汇聚。

尽管已有诸多进展，但是其中大部分研究仍局限于线性范畴。非线性效应与趋肤局域化的相互作用为该领域注入了新的活力，一方面将孤子等非线性概念与非厄米拓扑结合，另一方面为波的可控局域化开辟了全新策略。近期理论工作预测，非线性可能与 NHSE 在体内产生竞争或协同作用，甚至在边界和体内形成稳定的非线性趋肤孤子；然而，却缺少相关实验验证。

近日，华中科技大学王兵教授和陆培祥教授，米兰理工大学 Stefano Longhi 教授联合团队首次在具有有效 Kerr 非线性的合成时间光子晶格中实验证明了非线性 NHSE 及其趋肤孤子。为克服传统非线性光学高功率、低可调性的限制，研究团队引入了光-电前馈技术，实现可编程的人工 Kerr 非线性。实验结果显示，在较高非线性强度下，不仅在边界处，而且在体内也能形成稳健的趋肤孤子，其局域性和抗相位噪声能力均优于线性对应态。基于对非线性的精确调控，进一步设计出一款可通过非线性强度连续调谐输出端口的光路由器。本研究为探索并利用非厄米拓扑与非线性效应的深度耦合提供了全新框架，为稳健光信号传输、灵活路由及高性能波束管理等应用奠定了基础，也为未来多维合成维度与更复杂非线性模型的研究开启了大门。

相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上，并被选为 Editors' Suggestion。
（金梦成）

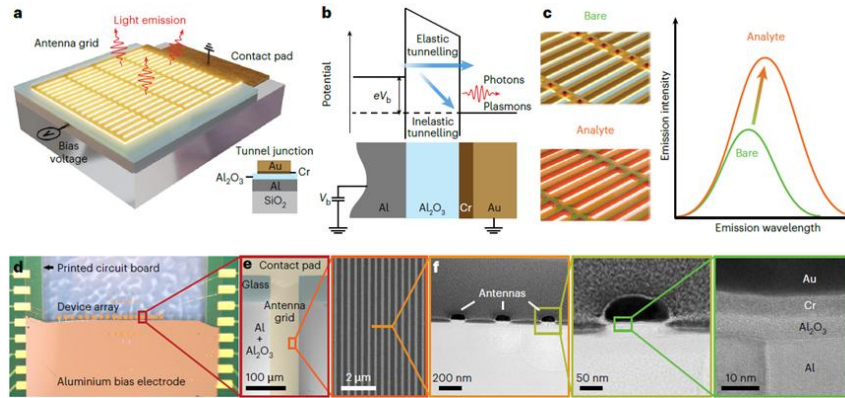


文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.243805>

2、共振量子隧穿实现等离子体生物传感器

等离子体金属纳米结构因其可同时实现强光场增强与深亚波长限制,成为高性能光学传感平台的重要支撑,广泛应用于生物传感领域。其通过局域与传播表面等离子体共振显著提升传感器灵敏度,推动了无标记、多路复用和微型化器件的发展,甚至实现了对单细胞乃至单分子的检测。近年来,量子等离子体传感的探索为进一步突破灵敏度极限提供了新机遇。然而,传统 SPP 的光激发依赖复杂耦合结构,限制了器件在便携、生物医学和即时诊断等场景的集成化应用。因此,开发电激发等离子体激元的方法成为研究重点,其中基于非弹性电子隧穿 (LIET) 发光的机制展现出巨大发展潜力。尽管该机制具备电激发、高空间分辨等优势,但受限于低效率与小发光面积,实用化进展缓慢。为克服这些瓶颈,研究者从材料层面引入二维材料作为高质量隧道势垒或调控层,并结合等离子体纳米天线提升局域光密度与发射方向性,显著增强 LIET 效率并实现光谱调控。近期已有报道实现超过 1% 的 LIET 发光效率,但仍需进一步提升稳定性、发射均匀性并抑制闪烁现象。因此,研究如何在可扩展结构中集成高效、稳定的 LIET 发光器件,特别是将其应用于新一代生物传感平台,成为推动该领域的迫切需求。近日,洛桑联邦理工学院的 Hatice Altug 团队,提出并实验验证了一种基于多层金属-绝缘体-金属 (MIM) 结构的片上自发光无标记光学生物传感器。该器件利用非弹性电子隧穿 (LIET) 效应实现无需外部光源的生物检测。在顶层设计了集成等离子体超表面,它不仅作为隧道结的电接触层,同时通过支持局域等离子体模式,有效耦合量子隧穿产生的辐射至自由空间,从而显著提高了辐射量子效率和检测灵敏度。通过优化超表面结构,使其具有均匀的空间发射特性与增强的光态密度,实现了高效、稳定的低能耗光源,可用于分析物分布的空间成像。与传统依赖外部光源的传感系统不同,该架构体积更小、集成度更高,适合应用于即时诊断等场景。通过多种分析物实验证明:LIET 发射的强度与光谱响应对表面折射率变化高度敏感,可实现远场光信号对局部环境的精准映射。这些结果表明,LIET 器件是一种具有广阔应用前景的、紧凑型、无需标记的高灵敏度片上光学生物传感平台。

相关工作发表在《Nature Photonics》上。(刘帅)

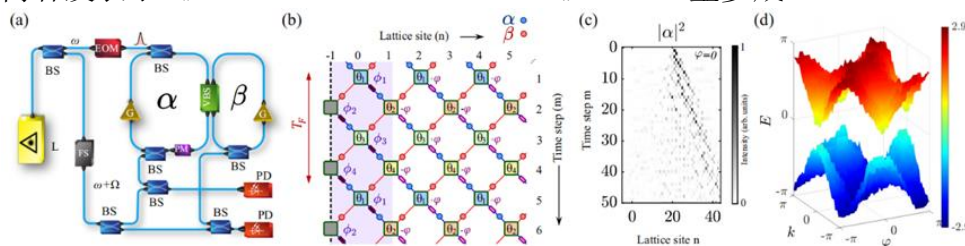


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01708-y>

3、Floquet 光子晶格中非本征拓扑相的观察

拓扑分类为理解与预测物质表面的输运通道提供了强有力的工具，已在电子、光子、声学及软凝聚态体系等领域得到广泛验证。在静态晶格中，最具代表性的非平庸拓扑现象包括整数与分数量子霍尔效应、拓扑绝缘体和 Weyl 半金属等，其由 Chern 数或 Z2 指数描述。值得注意的是，当晶格受到周期驱动、可由时变哈密顿量描述时，即使体 Chern 数为零，也能出现被称为“异常 Floquet 拓扑相”的新相位，其拓扑性质由一个反映完整驱动周期微观演化的缠绕数来表征。在传统的 Chern 相和异常 Floquet 相中，体拓扑不变量均来自无限大体系本征模式的整体性质，可精确预测当晶格在边界截断时出现的表面态数目。然而，这种“体-边对应”框架并不适用于完全由离散步进演化算符主导的体系：离散演化无法用连续、随时间变化的微观哈密顿量来描述，因而经典的 Chern 和 Floquet 工具不足以完整刻画其拓扑特性。近期理论工作指出，在一维和二维离散步进晶格中，还存在仅由边缘处么正算符的缠绕数决定的拓扑相，称为非本征拓扑相。与连续 Floquet 哈密顿体系不同，这种缠绕可在离散单步算符中自由设计，不受厄米性约束。

近日，法国里尔大学 Alberto Amo 教授与西班牙基础物理研究所 Álvaro Gómez-León 教授团队首次在实验上验证了这种非本征拓扑相。团队利用双光纤环构成的离散分裂网络，系统性地测量演示了修正后的“体一边对应”关系： $N_{\text{edge}} = C_{\text{bulk}} + \nu \text{Edge}$ ，其中 C_{bulk} 为体 Chern 数， νEdge 为边缘么正算符的缠绕数。实验结果显示，无需经历能隙闭合即可在 0、1、2 条边模之间自由切换，并可在体内写入局域“条纹”算符以产生手性束缚态，使得离散步进体系的拓扑通道工程成为可能。这项工作不仅丰富了 Floquet 量子行走拓扑的理论框架，也为在光子、冷原子及离子等平台上可重构拓扑器件的实现奠定了实验基础。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



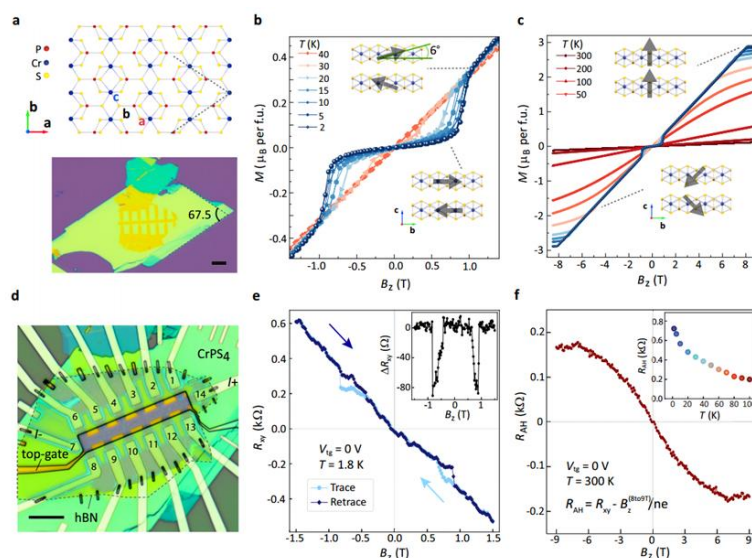
文章链接: <https://doi.org/10.1103/tqyx-qyj4>

4、磁性石墨烯中的量子自旋霍尔效应

实现长距离相干自旋输运是自旋电子学器件发展的核心挑战之一。拓扑自旋极化边界态因其对无序散射的鲁棒性，被视为理想载体。石墨烯虽具备优异的电荷与自旋输运特性，但其固有的能带结构缺乏拓扑非平庸带隙，无法在无外磁场条件下支撑此类受拓扑保护的边界态。通过范德瓦尔斯异质结构邻近效应，可在石墨烯中诱导交错势、自旋轨道耦合（SOC）及磁交换相互作用，理论上可打开拓扑体带隙并形成螺旋边界态。然而，尽管前期研究在磁性邻近石墨烯中观测到了反常霍尔效应（AHE）等自旋相关现象，零磁场下量子自旋霍尔效应（QSH）的直接实验证据仍长期缺失。主要障碍包括界面电荷转移对邻近效应的掩盖，以及磁性对时间反演对称性的破坏（传统理论认为 QSH 态依赖此对称性）。因此，探索兼具强磁性与拓扑边界态的石墨烯基异质结构，对实现无需磁场的实用化量子自旋电子学器件至关重要。

近日，荷兰德尔夫特理工大学的 Herre S. J. van der Zant 教授、Talieh S. Ghiasi 博士后研究团队，通过在石墨烯邻近引入层状反铁磁半导体 CrPS₄（CPS），成功观测到零磁场下的量子自旋霍尔态，并揭示了其与反常霍尔效应的共存。研究的关键突破在于抑制了界面电荷转移，使得 CPS 诱导的磁交换与自旋轨道耦合主导了石墨烯的输运行为。实验检测到高达室温下的显著反常霍尔电阻，证实了强邻近相互作用的存在。更重要的是，在零磁场和电荷中性点附近，四端电导表现出量子化平台，这是螺旋边界态的特征信号。通过设计不同几何构型的多端输运测量（包括切割沟道以排除几何巧合），并依据 Landauer-Büttiker 公式分析不同探针配置下的电导值，该研究确证了该量子化平台源于自旋极化且反向传播的螺旋边界态。此外，在有限磁场和不同温度下，零级朗道能隙附近仍表现出类金属行为（电阻随温度升高而增加），进一步支持了无能隙边界态的持续存在。这一发现挑战了传统认知，表明即使在邻近磁性破坏时间反演对称性的情况下，强自旋轨道耦合仍能稳定 QSH 态。磁性石墨烯中 QSH 与 AHE 的共存，为开发基于二维拓扑材料的室温自旋电子电路开辟了新途径。

该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



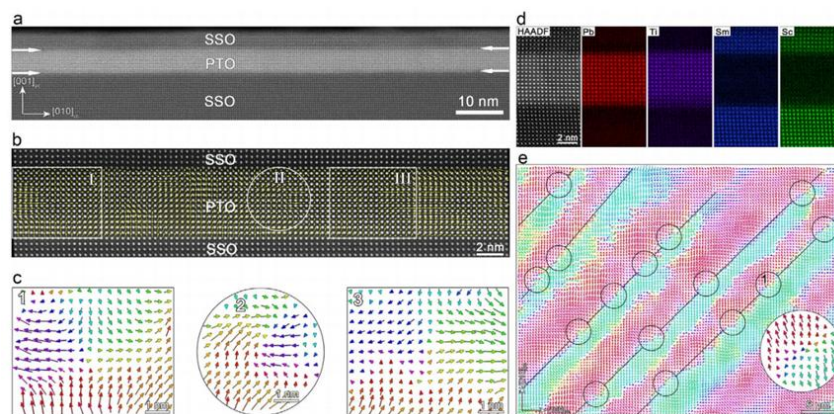
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60377-1>

5、氧化物铁电薄膜极性拓扑的界面调控

拓扑极性结构因其纳米尺度、拓扑保护性及负电容效应等特性，在高密度存储器 and 低功耗电子器件中展现出重要潜力。近年来，铁电体系中的通量闭合、涡旋、斯格明子等拓扑态成为探索新兴物性和器件应用的热点，但其确定性制备与稳定调控仍面临挑战，尤其在界面效应显著的实际器件中。界面工程通过引入对称破缺、应变梯度和电荷重分布调控铁电极化，然而界面设计与拓扑态稳定性的内在机制尚不明确。现有研究存在矛盾结论：部分表明绝缘层可稳定通量闭合结构，另一些发现电极不对称性会导致拓扑态瓦解。这些矛盾突显了界面与极化行为的复杂关联，亟需揭示界面工程对极性拓扑的调控规律。

近日，松山湖材料实验室大湾区显微科学与技术研究中心的马秀良研究员、朱银莲研究员团队，通过设计对称与非对称界面，在 PbTiO_3 外延薄膜中实现了极性布洛赫点与半子的可控调控。基于正交相衬底制备了 $\text{PbTiO}_3/\text{SmScO}_3$ (PTO/SSO) 双层膜、(PTO)₁₃/(SSO)₉ 超晶格等对称结构及 $\text{SrRuO}_3/\text{PbTiO}_3$ (SRO/PTO)、SRO/PTO/SSO 等非对称异质结。电镜观测表明：对称界面稳定了布洛赫点阵列，其极化呈镜面对称分布；非对称界面则诱导半子结构，形成发散或汇聚的垂直极化。相场模拟揭示内建电场方向主导拓扑态形成——对称界面产生收敛电场稳定布洛赫点，非对称界面引发单向电场驱动半子生成。能量竞争机制表明：布洛赫点因低静电能稳定，半子受限于高弹性能。压电测试证实含布洛赫点的三层膜压电响应振幅较双层膜提高 65%，这源于球对称极化构型对外电场的高效响应。该研究首次阐明界面对称性是调控拓扑态的核心因素（超越传统电路边界条件），为三维拓扑多态集成提供了新范式，同时为高密度存储器与高性能压电器件设计开辟了新路径。

该成果发表于《Advanced Functional Materials》。（刘梦洋）



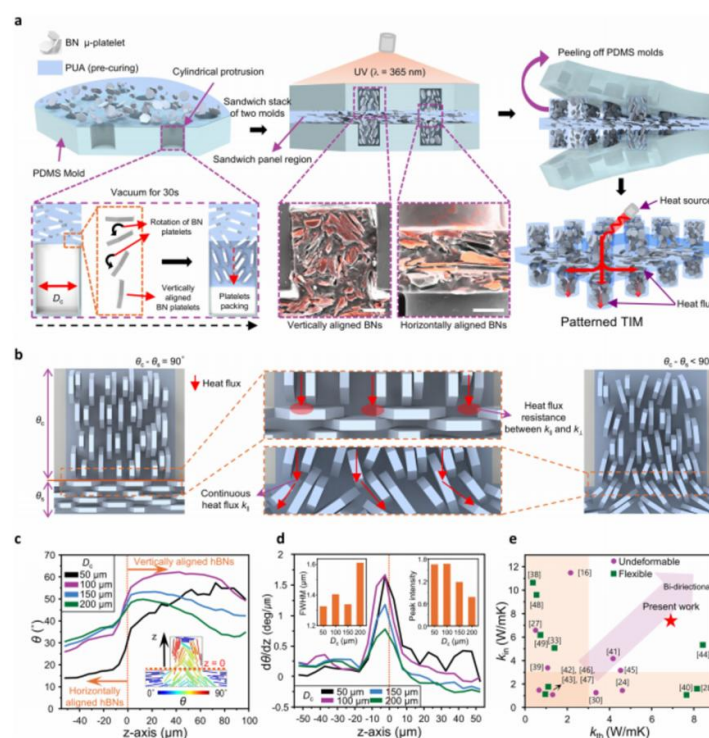
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202510402>

6、用于先进热界面材料的氮化硼微米片双向组装

在集成电路技术飞速发展的今天，3D 垂直堆叠集成成为芯片微型化和高性能化的关键路径。然而，随着电路密度和功耗的持续攀升，局部高温和散热不均已成为制约电子器件可靠性和使用寿命的“热瓶颈”。传统的金属散热片虽然在宏观散热中发挥作用，但与电子器件表面微观粗糙接触所形成的微米级空隙，往往充

满低导热的空气，从而产生显著的界面热阻。为了解决这一难题，导热界面材料（Thermal Interface Materials, TIM）应运而生。理想的 TIM 不仅需要具备高导热性能，还要保持优异的机械柔韧性、热稳定性和电绝缘性，以适应 3D 封装中高温高压的严苛工况。近年来，虽然以石墨烯、金属纳米线等高导热填料为代表的 TIM 备受关注，但其高电导性在一定程度上限制了在电绝缘需求场景中的应用。相比之下，氮化硼（BN）微片因兼具高导热性和电绝缘性，成为 TIM 研究的重要方向。然而，BN 纳米片在实际应用中面临分散性差、易团聚等加工挑战，如何兼顾填料取向控制与界面紧密接触，构建既能横向又能纵向高效导热的三维散热通路，一直是学术界和产业界探索的热点问题。

在此背景下，韩国成均馆大学 Tae-il Kim、Seok Joon Kwon 团队提出一种利用微模塑（micro-molding）技术双向组装氮化硼微米片的新型方法，实现兼具高双向导热性和机械柔性的先进 TIM。该团队通过设计周期性微柱阵列模具，将平均直径约 42 微米的 BN 微片均匀分散在光固化聚氨酯丙烯酸酯（PUA）基体中，借助真空旋涂与紫外光固化工艺，在微柱区域诱导 BN 微片垂直取向，而在相邻的平面区域则形成水平排列。通过有限元流固耦合仿真（FSI）和热传导模拟，研究人员系统优化了微柱直径和微片尺寸，发现当微柱直径为 100 微米时，BN 微片在两区域实现理想的“取向分叉”结构：垂直区取向角约 56° ，水平区约为 20° ，在界面区域形成平滑的过渡。这一结构不仅有效提升了垂直方向（through-plane）导热性能（ $6.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ），也增强了水平方向（in-plane）导热能力（ $7.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ），远超传统未取向 TIM 的性能。更为重要的是，即使填料含量高达 40 wt. %，该材料依旧展现出最小曲率半径约 1 毫米的卓越柔性，能够在不同形貌和组成的基底表面实现近乎完美的贴合，显著降低界面热阻。在多层金属-导热界面材料叠层结构中，样品在高温高压条件下仍保持稳定形貌和导热通路，展现出良好的应用前景。相关内容发表于《Advanced Functional Materials》上。（张琰炯）

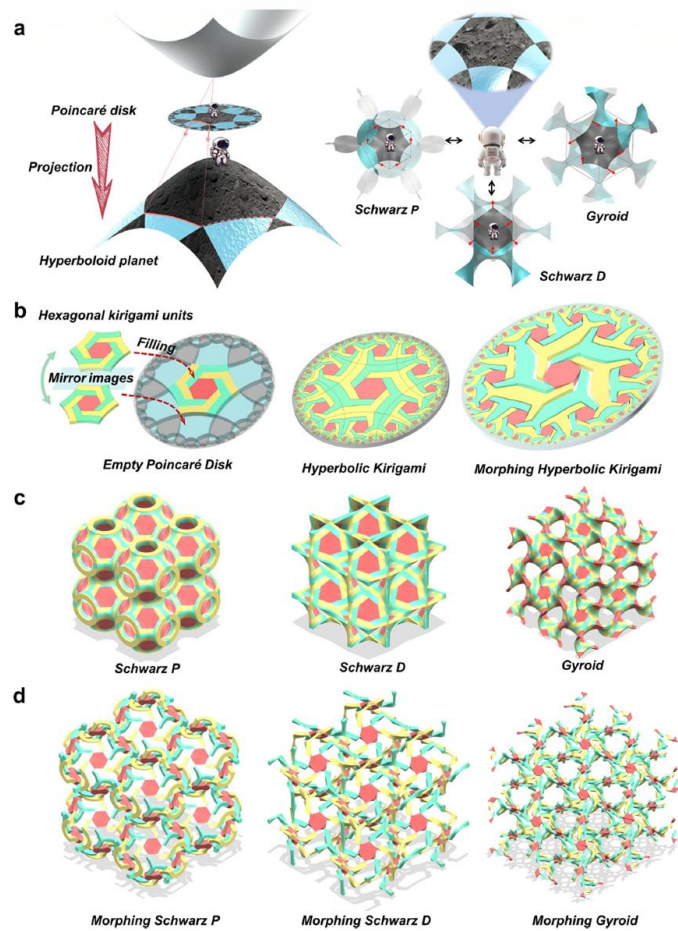


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202421607>

7、具有可调负泊松比与多稳态的三维双曲折纸超材料

剪纸近年来在机械超材料研究中获得广泛关注。其结构可通过调控二维单元的面外弯曲或扭转，实现从二维向三维的可编程形变，已被应用于可展开结构、柔性电子、光机设备等领域。然而，现有剪纸结构多局限于二维平面或准三维变形，难以支持任意三维体积的周期性拓展，这限制了其在能量吸收、大体积可重构结构等方面的应用潜力。现有设计多基于欧几里得平面，难以实现真正的三维可拓展性。为此，本文引入双曲几何作为非欧几里得设计框架，构造基于三重周期极小曲面（TPMS）的三维剪纸超材料。TPMS 具有六边形对称性，适合构建连续镶嵌结构，已被广泛应用于具高强度与可调刚度的机械超材料中。尽管 TPMS 在结构力学中表现出色，其在形状重构与可变形剪纸结构设计中的潜力尚未被探索。近日，甬江实验室邓必为研究员、宁波大学金育安教授、南京航空航天大学高金翎研究员团队，展示了从双曲剪纸镶嵌的设计出发，构建具有可编程变形能力的三维力学超材料的完整过程。基于所提出的设计策略，实现了一类共轭的三维机械材料族，其应力-应变响应可调。通过变形结构中铰接单元的协同三维旋转，这些超材料表现出非传统的力学特性，如负泊松比效应和多稳态性，其泊松比最低可达 -1 。此外，作者还探索了体素化超材料器件的合成生成方式，即通过不同参数化的单元组合构建具有特定力学响应的超材料模块。作为概念验证研究，非欧几里得的双曲空间可作为连接二维设计理念与三维实际结构的理想桥梁。总体而言，本工作开创性地提出了双曲剪纸结构的全新设计路径，为发现具备独特力学性能的三维剪纸超材料提供了新的平台。

相关工作发表在《Advanced Science》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/advs.202506703>

(来源: 两江科技评论)