

超材料前沿研究一周精选

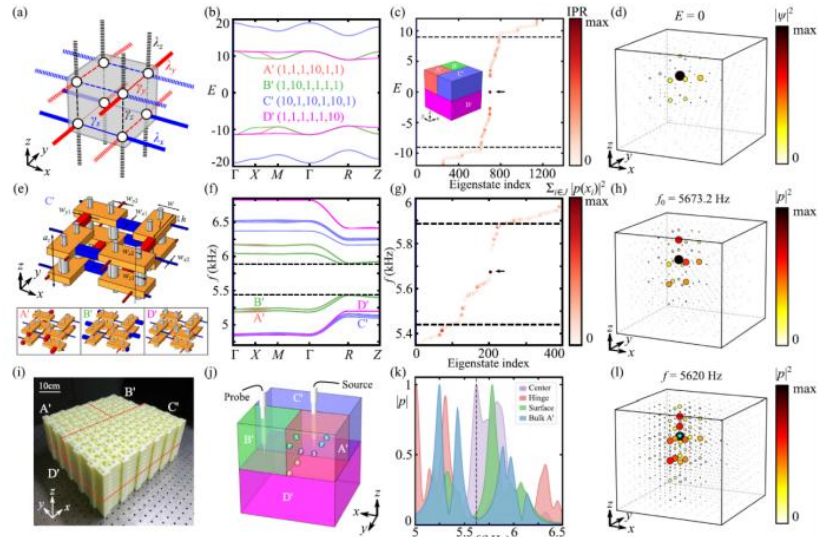
2025 年 9 月 22 日-2025 年 9 月 28 日

索引:

- 1、通过投影晶体对称性在平庸体中观测到嵌入式拓扑
- 2、时空拐角散射的理论与实验观察
- 3、片上耗散克尔孤子的混沌群速度跃迁
- 4、狄拉克半金属 NiTe_2 中拓扑表面态与超导的共存
- 5、单层 FeSe 薄膜/ Nb 掺杂 SrTiO_3 界面相干电-声子耦合
- 6、通过 MoO_2 纳米线的连续硫化制备对称性破缺的 MoS_2 纳米管
- 7、利用二氧化钛超材料器件实现全空间及任意轨道角动量复用光束操控
- 8、用于超宽带雷达隐身的仿生水基超材料吸收器

1、通过投影晶体对称性在平庸体中观测到嵌入式拓扑

体-边对应是拓扑物理的核心原理，传统上认为只有拓扑非平庸体才能产生受保护的边界态。高阶拓扑的提出进一步拓展了这一框架，使拓扑态能够在更低维的边界上出现。然而，近期理论工作提出了嵌入式拓扑的概念，即便体保持拓扑平庸，其边界能带仍可展现非平庸拓扑，从而形成低维拓扑态，但这一现象尚未得到实验验证。与此同时，投影晶体对称性作为一种新兴对称性机制，已展示出包括莫比乌斯边带、Stiefel-Whitney 拓扑荷和布里渊区克莱因瓶在内的多种新型拓扑相。然而，目前关于在投影晶体对称性下实现嵌入式拓扑的研究仍属空白。近日，南洋理工大学的龙洋博士、张柏乐教授团队与江苏大学孙宏祥教授团队合作，利用声学晶体中的投影晶体对称性，首次实现了在拓扑平庸体中的嵌入式拓扑。首先，通过构建二维平庸绝缘体之间的界面，演示了一维强拓扑绝缘体的形成。这种一维强拓扑绝缘体源于界面能带的拓扑相变，从而揭示了嵌入式拓扑。为了进一步验证界面能隙中的拓扑相，将两个拓扑性质不同的一维界面连接，形成二维三结点结构，在其中观测到能隙内的拓扑态。此外，将嵌入式拓扑的层级推广至三维绝缘体体系。在该体系中，三维体和二维表面均保持平庸，但嵌入式拓扑出现在一维棱边，并在三维四结点处诱导出零维拓扑态，从而展示了物理空间中最长的层级链条。本研究为拓扑平庸性的理解提供了全新的视角，并为设计稳健的拓扑器件开辟了更多自由度。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（张甜）

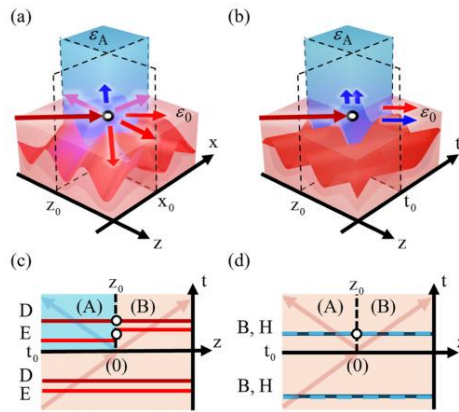


文章链接: <https://doi.org/10.1103/9tql-37j1>

2、时空拐角散射的理论实验观察

拐角处波的衍射一直是散射理论中的经典难题：当平面波自下方均匀子空间入射，遇到上方左右子空间在同一直线相接的“角点”界面时，如何给出全空间的散射场分布？传统文献自上世纪起便持续探索，近年来虽借助维纳-霍普夫方法在可穿透与不可穿透拐角情形中获得了半解析结果，但真正的瓶颈在于拐角的几何奇异性——常规边界条件对切向电磁场的连续性约束在拐角处难以自洽施加。近年来，时变介质的兴起为突破被动、时间不变系统的基本限制（如互易性、Rozanov 吸收带宽界与 Bode-Fano 匹配极限）提供了新路径。通过在时间上调控材料电磁参数，人们已实现时域瞄准、非互易热辐射，以及类黑洞/白洞等效应，并在微波与超快光学平台上相继观察到时间反射、光子“碰撞”、时间双缝衍射与时间折射等时空现象。过去的研究多聚焦于空间均匀且时间调制的体系，从而避免空间边界带来的复杂性；然而，一旦放宽这一限制，转向同时具备空间与时间变化的“时空界面”，便可获得更强的波谱整形与信号处理能力，例如实现紧凑的滤波、频谱搬移与基于超表面的增益放大等。

近日，罗马第三大学的 Davide Ramaccia 教授，纽约先进科学研究中心的 Emanuele Galiffi 教授和 Andrea Alù 教授联合团队，系统研究并实验观测了“时间切换的空间界面”处产生的时空拐角散射。团队解决了时空边界条件的不一致性，并通过解析方法证明了由散射过程引发的激波的产生。理论经数值验证后，团队在可瞬时切换阻抗的微带线平台上进行实验验证，当仅一侧区域在给定时刻发生介电常数跃迁时，测得脉冲在拐角处出现清晰的不连续与重整形特征，印证了解析模型的预言。这项研究为时调介质与静态介质在同一边界相遇时的非常规响应提供了物理上一致、数学上可计算的描述框架，为时空超材料的器件化设计提供了理论框架。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/lp4g-wt7h>

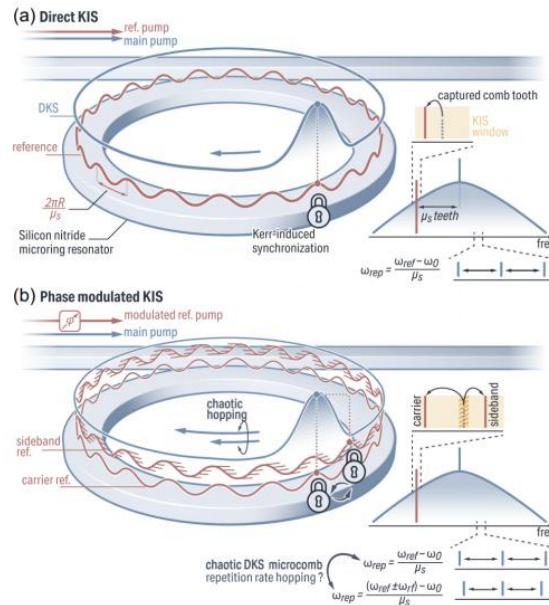
3、片上耗散克尔孤子的混沌群速度跃迁

混沌现象广泛存在于自然界：从流体湍流、生物节律到电子电路与对流大气。数学上，三个非线性耦合自变量即可在自治系统中出现混沌；初始条件的微小差异会被指数放大，使长期预测变得不可能。光学领域早已在带反馈激光器与锁模系统中观察到混沌。与其将混沌视为噪声，不如将其转化为能力：高速随机数与安全通信等应用均可受益于可控的光学混沌。

在集成光学频率梳中，混沌动力学常由连续波泵浦 Kerr 微谐振腔触发的调制不稳定性引出，并已用于测距、光学判决与分布式加密通信。与此同时，许多计量与通信应用又依赖等间隔的梳线，这通常由耗散 Kerr 孤子（DKS）提供。作为 Lugiato-Lefever 方程的稳健解，DKS 对扰动具有鲁棒性，可成为可部署计量系统的基石。因此，要同时获得“等间距频标”与“可编程混沌”，就需要为腔孤子引入新的耦合与调控机制。

一种可行路径是孤子束/孤子分子内部的非线性耦合，但在集成平台、尤其是单泵单孤子情形中仍较罕见。近期工作引入 Kerr 诱导同步（KIS）：在外部参考激光作用下，参考场“捕获”某条梳齿，实现对微梳双重钉扎，由此形成绕过腔内本征涨落的独特 DKS 吸引子。与常见的孤子同步机理不同，KIS 并非由过阻尼的一阶 Adler 方程刻画，而需借助二阶 Adler 方程；其关键之处在于，相位调制为系统提供了通往混沌的有效耦合通道。然而，此前的验证多停留在直流工作区，关于“二阶时间导数”在触发 DKS 混沌中的核心角色，缺乏直接实验佐证。

近日，NIST/马里兰大学教授 Grégory Moille 教授团队提出一种新型微梳态：单个 DKS 孤子展现出混沌行为。通过相位调制 DKS 与外部注入参考激光器之间的 KIS，观测到孤子的混沌群速度跃迁现象，导致重复率发生随机性跃迁。利用芯片级跨倍频程微梳进行实验验证，成功推导出描述 KIS 的二阶阿德勒方程，并证实了这种混沌 DKS 跃迁现象。本研究将非线性动力学与光学孤子物理相结合，为在孤子态中触发微梳混沌现象提供了确定性理论框架。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）

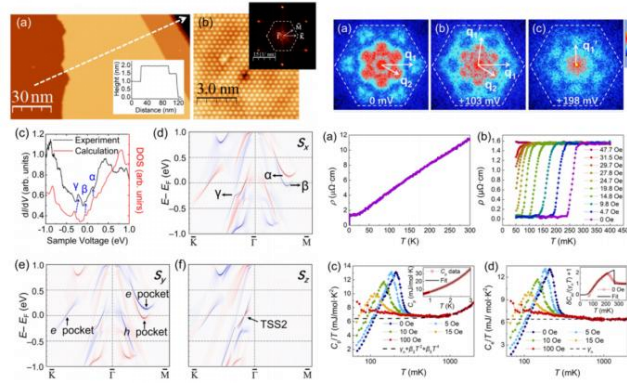


文章链接: <https://doi.org/10.1103/2k7d-p7rm>

4、狄拉克半金属 NiTe₂ 中拓扑表面态与超导的共存

材料中的拓扑态受其能带结构的拓扑不变量所保护，对局域扰动、缺陷或杂质表现出显著的鲁棒性。在这些拓扑态中引入超导性，特别是当拓扑态位于费米能级（EF）附近时，为实现拓扑超导提供了一条有前景的途径。然而，同时具备本征拓扑态和超导性的材料非常稀少，尤其是在化学计量化合物中。NiTe₂ 是一种层状过渡金属二硫化物，最近的报道已确认其为 II 型狄拉克半金属，具有拓扑表面态和可能的拓扑铰链态。在基于 NiTe₂ 的约瑟夫森结中，从超导电极注入的超导电流与 NiTe₂ 拓扑表面态和铰链态耦合，表现出有限动量库珀对配对和铰链超导电流。然而，尽管已有报道通过化学掺杂或在 NiTe_{2-x}（ $x = 0.38 \pm 0.09$ ）中施加压力成功诱导块体 NiTe₂ 出现超导性，但迄今为止，化学计量比的 NiTe₂ 并未被发现具有本征超导性。

近日，哈尔滨工业大学（深圳）的李哲副教授和上海大学葛军飴教授课题组合作，通过扫描隧道显微镜（STM）、准粒子干涉（QPI）以及电输运等实验手段结合证明，首次在化学计量比的 NiTe₂ 单晶中证实了拓扑表面态在费米能级附近的存在与本征超导性（ $T_c \approx 260$ mK）的共存。结合密度泛函理论计算，该团队观测到了 STM 谱线中来自拓扑表面态的峰。进一步的 QPI 测量和自旋分辨的能带计算揭示了其独特的面内自旋纹理和动量-自旋锁定特性。此外，电输运信号在 260mK 以下的骤降表现出 NiTe₂ 的超导性，且上临界场对应的 310nm 的相干长度以及比热信号中的跳变点进一步证明了其体超导性而非表面超导。以上现象表明，NiTe₂ 为第二类超导体，且指出其超导性可能源于双能带机制。该工作为探索化学计量过渡金属二硫化物中拓扑结构和超导性之间的相互作用以及研究拓扑超导性和有限动量库珀配对等新的量子现象建立了一个新的平台。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。（侯玥盈）



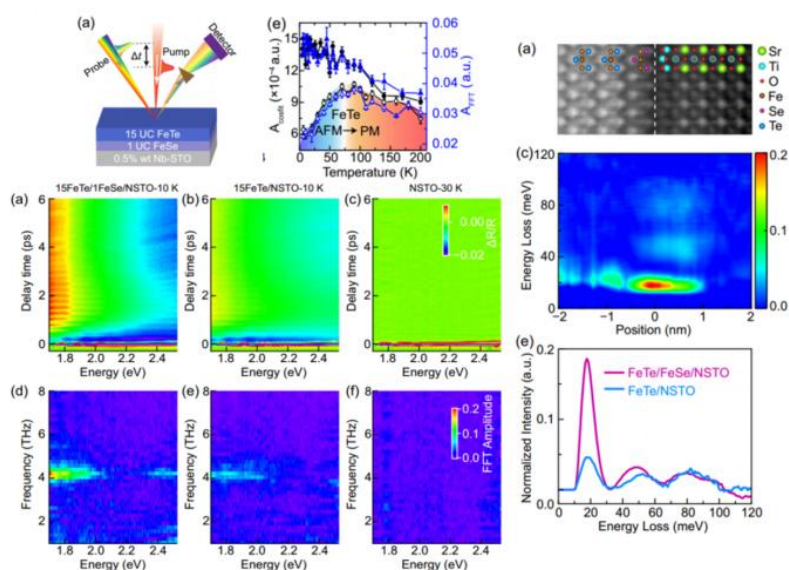
文章链接: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/vpl7-n6bp>

5、单层 FeSe 薄膜/Nb 掺杂 SrTiO3 界面相干电-声子耦合

近年来，界面超导性成为凝聚态物理研究的热点之一。尤其是在单层 FeSe 薄膜/SrTiO₃ (STO) 基底上的体系中，实验观测到了高达 65 K 至 109 K 的超导转变温度 (T_c)，远高于块体 FeSe (约 8 K) 以及其他铁基超导材料。这一现象打破了人们对铁基超导体传统配对机制的理解，引发了对其背后物理机制的广泛关注和研究。最初，研究者普遍认为这种 T_c 升高主要来源于界面处的电子掺杂效应。实验发现单层 FeSe 的电子结构类似于重电子掺杂的 $AxFe_{2-y}Se_2$ ($A = K, Cs$) 或 $Li_{1-x}Fe_xOHFeSe$ 等体系，这些材料也具有较高的 T_c 。然而，进一步的实验表明，即使掺杂浓度进一步增加， T_c 也最高只能达到约 48 K，仍远低于 FeSe/STO 界面的记录值。因此，仅靠电子掺杂无法完全解释 T_c 的显著增强。因此，研究者们进而认为“界面电子-声子耦合 (EPC)”可能是增强超导性的关键机制。尽管已有工作利用角分辨光电子能谱 (ARPES) 和高分辨电子能量损失谱 (HREELS) 等手段在 FeSe/STO 界面观测到了能量在 70 - 100 meV 范围内的高能光学声子模式，但仍缺乏直接的实空间证据将特定界面声子模式与 FeSe 中的电子动力学联系起来。

近日，清华大学物理系熊启华教授团队与南方科技大学薛其坤教授团队合作，结合超快泵浦-探测光谱与扫描透射电子显微镜-电子能量损失谱 (STEM-EELS) 技术，观测到 FeSe/SrTiO₃ 界面电-声子耦合的直接证据。研究团队制备了三种样品进行对比：1. 表面覆盖 15UC FeTe 保护层的单层 FeSe 薄膜/SrTiO₃ 衬底样品 15FeTe/1FeSe/NSTO；2. 生长在 NSTO (001) 衬底上的 15 层 (15UC) FeTe 薄膜样品 15FeTe/NSTO；3. 裸 NSTO。1100nm (1.3eV, 低于 STO 带隙) 的泵浦光激发下，在 15FeTe/1FeSe/NSTO 和 15FeTe/NSTO 样品中均探测到一个 4.2 THz 的相干光学声子，但相同条件下，在裸 NSTO 衬底上却没有探测到该声子，说明其来源于界面处的晶格振动。进一步的 STEM-EELS 实验显示该声子对应于双 TiO_x 终止层处的 Ti - O 面外振动，该振动产生穿透 FeSe/FeTe 层的界面偶极场，与电子发生耦合。此外，15FeTe/1FeSe/NSTO 样品的声子振荡幅值是 15FeTe/NSTO 的 2 倍，表明 FeSe/NSTO 界面具有更强的电子-声子耦合。这归因于 FeSe 中更高的电子掺杂水平，增强了界面偶极矩。温度依赖的实验现象还表明界面耦合在低温下更稳定，且 FeSe/NSTO 独特的电子结构导致了界面电-声子耦合相互作用在磁结构相变下的鲁棒性。该工作建立了原子尺度声子局域与电子动力学之间的直接联系，为理解界面超导机制提供了新的视角。相关内容发表于《Physical Review

Letters》上。（侯玥盈）

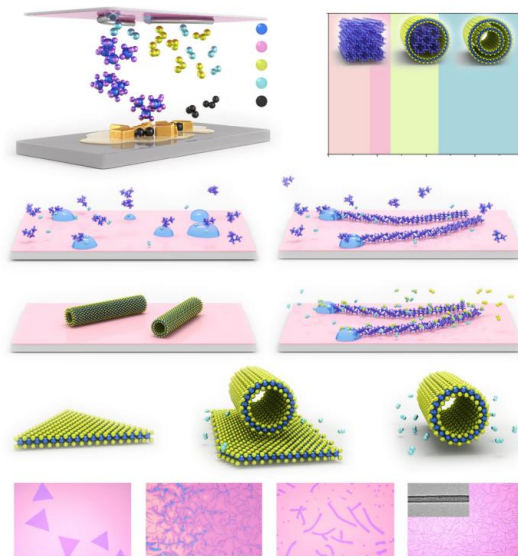


文章链接: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/qxhc-khzhf>

6、通过 MoO₃ 纳米线的连续硫化制备对称性破缺的 MoS₂ 纳米管

从范德华层状量子材料衍生的一维纳米管因其区别于二维材料的独特物理和化学性质而受到广泛关注。过渡金属二硫属化物纳米管作为其中的重要成员，具有非中心对称晶格和固有应变，呈现出反演对称性破缺的高度极化结构，展现出优异的电学和光学特性，在超导、自发光伏效应及催化等领域具有应用潜力。与碳纳米管相比，它们因丰富的元素组成和可调带隙而更具研究价值，但受制于合成难度，相关研究仍有限。将层状硫属化物转化为管状结构需要克服较大的弹性能量，并兼顾少层产物的稳定性。由于层间范德华力较弱，这类材料在形成一维结构时更易生成中空纳米管或纳米卷片。现有方法多依赖高温固-气反应，或借助金属纳米颗粒催化，但后者易引入杂质，降低电子性能。作为替代，利用 Kirkendall 效应的前驱体硫化也能有效构筑管状结构。然而，尽管基于模板的合成取得一定进展，前驱体选择与结构稳定性仍是主要挑战。

近日，西北工业大学王学文教授团队和南洋理工大学刘政教授团队，提出了一种稳健且可控的策略，可直接生长具有清晰管状形貌和高度结构均一性的结晶 MoS₂ 纳米管。该方法包含两项关键创新：其一，通过可控引入氢气，将 MoO₃ 还原为一维四方相 MoO₂（空间群 I4/m）链，并借助气-液-固（VLS）机制实现生长；其二，通过精确的温区调控，使硫蒸气在适时注入，实现充分硫化。中间产物 MoO₂ 具有单一晶体学取向，因而成为理想的纳米管形成模板。碲（Te）在过程中作为助熔介质，促进均一 MoO₂ 纳米线的生成，并在后续转化为 MoS₂ 纳米管。通过系统调节氢气浓度，揭示了其在产物形貌调控中的关键作用。所得 MoS₂ 纳米管表现出显著的对称性破缺效应及优异的体光伏性能，在 $1.88 \times 10^4 \text{ W cm}^{-2}$ 光照下实现了 510 A cm^{-2} 的光响应。本研究不仅加深了对纳米管生长机理的基础理解，也推动了对称性工程光电材料的发展。相关工作发表在《Nature Communications》上。（张甜）

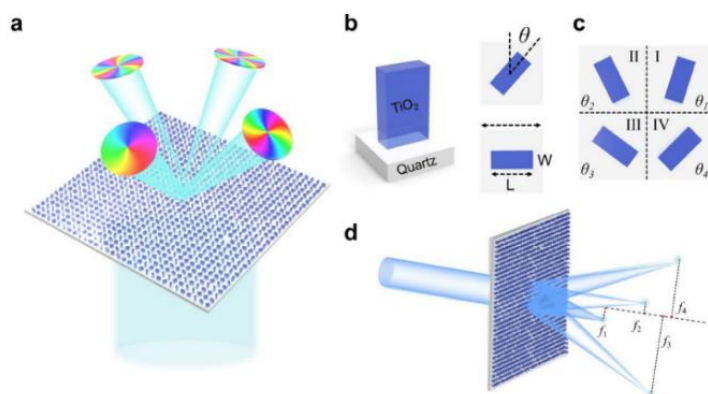


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63333-1>

7、利用二氧化钛超材料器件实现全空间及任意轨道角动量复用光束操控

二氧化钛 (TiO₂) 超表面凭借高折射率和低光损耗, 可在可见光范围内实现任意光波前调控, 推动了金属透镜、螺旋全息、光束偏转、结构色及自旋-轨道转换等功能发展, 也为轨道角动量 (OAM) 光束生成提供了新途径。OAM 可连续取值, 为光镊、量子信息、非线性光学和高速通信等提供额外通道。传统 OAM 生成器件如空间光调制器和螺旋相位板难以微型化或集成。通过亚波长单元旋转实现潘查拉纳姆-贝里相位, 全介电 TiO₂ 超表面可高效灵活地操控 OAM, 避免金属欧姆损耗。最新研究在极化与涡旋复用、远场生成及近场耦合方面取得突破, 为微型系统中全空间 OAM 操控和下一代集成光子器件奠定基础。

近日, 西北工业大学的樊元成教授、张富利教授团队与中科院物理所李俊杰研究员团队合作, 提出并实验验证了一种基于 TiO₂ 的超材料器件, 用于在角度和距离两个维度上实现 OAM 光的空间复用操控。通过空间旋转 TiO₂ 纳米鳍片以调控光的几何相位, 该器件能够在可见光波段实现 OAM 光的产生、空间复用和聚焦。当平面波通过该超材料器件后, 可被分解成四束不同拓扑荷光束, 沿四个不同方向传播并在四个不同平面聚焦, 且具有宽带特性。该空间复用超材料器件 (SMM) 充分利用了全空间操控和任意复用 OAM 光束的能力, 相较于传统的相位累积螺旋光学器件, 在超紧凑光子器件中展现出更高的可扩展性和灵活性。相关工作发表在《Nano Letters》上。(刘帅)

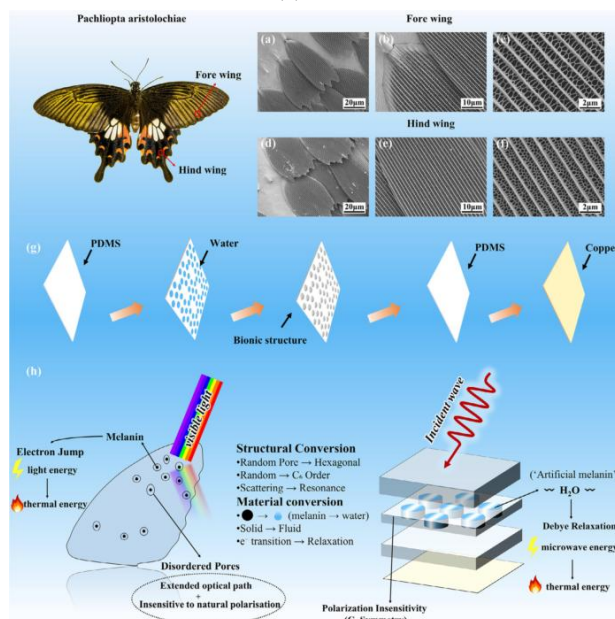


文章链接: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c02519>

8、用于超宽带雷达隐身的仿生水基超材料吸收器

现有雷达吸波体在“超宽带吸收”与“轻量化”之间长期难以两全：四分之一波长方案需接近 $\lambda/4$ 的厚度；多层/多谐振叠层虽可拓宽带宽，却显著增加厚度与制造复杂度；超构材料方案多依赖窄带共振，且对极化与入射角敏感，实际工况下性能易劣化。

近日，来自吉林大学的冀世军教授团队受蝴蝶翅分级多孔结构启发，并结合水的固有介电色散，提出仿生水基超材料吸收体：在毫米级厚度内实现 Ku - Ka 波段（17.11 - 35.74 GHz）超宽带高吸收，并兼具极化与入射角稳定。其充水腔体按梯度多孔几何排布，有效延长电磁传播路径；水以德拜弛豫提供可调介电损耗，PDMS 封装层通过分级介电常数增强阻抗匹配。该吸收体在带宽 - 厚度比上优于现有超表面方案，且经全波仿真、等效电路与微波暗室测试共同验证。制造上采用激光刻蚀 PDMS 微流控并注水，工艺简化、成本可控且具备良好规模化潜力。未来的研究将集中在通过先进的微流体驱动技术和控制范式来克服流体响应速度限制，同时探索该设计方案在多光谱隐身中的直接实际应用。相关工作发表在《Advanced Materials》上。（李治含）



文章链接: S. Ji, M. Qin, J. Zhao, H. Dai, and J. Li, “ Biomimetic Water-Based Metamaterial Absorber for Ultrabroadband Radar Stealth.” Adv. Mater. (2025): e07439.

<https://doi.org/10.1002/adma.202507439>

(来源: 两江科技评论)