

超材料前沿研究一周精选

2025 年 4 月 7 日-2025 年 4 月 13 日

索引:

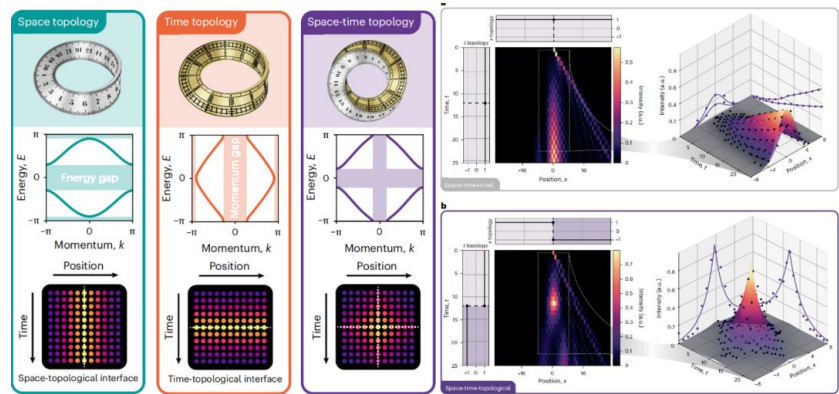
- 1、时空拓扑事件
- 2、Yb:Lu₃Ga₅O₁₂ 晶体的生长、光谱特性及激光性能研究
- 3、纤锌矿异质结构中的邻近铁电效应
- 4、CeSbTe 电荷密度波态内部结构可视化
- 5、魔角扭转双层石墨烯中涌现局域矩的热电探针
- 6、多层 PdSe₂ 场效应晶体管中的界面热传输和能量耗散
- 7、莫尔量子材料中强相互作用偶极激子的超辐射

1、时空拓扑事件

随着时间晶体和时空晶体的提出，晶体结构的周期性从空间维度延伸到了时间乃至时空维度。在光子学中，这类结构通常被称为时变介质或光子时间晶体。它们虽然在概念上与 Wilczek 最初提出的“时间晶体”类似，但实际上存在显著差异：Wilczek 所指的时间晶体，强调的是连续时间平移对称性的自发破缺，多出现在量子多体系统中；而光子时间晶体则更为广义，通常是指具有离散时间平移对称性的系统。与此同时，拓扑物理学已发展为一个统一不同物理现象的跨学科框架，其应用覆盖了从电子的量子霍尔效应、拓扑量子计算，到拓扑激光器等多个前沿领域。然而，时间与空间在本质上却存在关键区别：时间具有不可逆的方向性，而空间是对称的；这意味着，时间中并不支持类似于空间中那样的“反射”机制，反而催生了一种全新的现象——时间反射；与之对应的，是一种局域在时间接口的拓扑态，其产生机制并非依赖于能隙，而是依赖于动量带隙的拓扑结构。此前已有研究在数值模拟中观察到这种“时间拓扑态”，其显著特征是系统的能谱出现复数值，导致解在时间上表现为指数增长或衰减，类似于能隙中出现的“空间倏逝波”。值得注意的是，动量隙在驱动系统或耗散系统（即非厄米系统）中常见，因此时间拓扑与非厄米物理天然相关联。

近日，德国罗斯托克大学 Alexander Szameit 教授团队基于光子系统中的离散时间量子行走，实验证实了时间拓扑态的存在。研究团队构建了一个带有可调增益-损耗调制和耦合结构的光子晶格，提出并定义了“时间拓扑不变量”，并通过实验验证了其与时空拓扑态之间的明确对应关系。进一步地，团队构建了一个同时具有能量带隙与动量带隙的系统，首次提出了“时空拓扑”的概念，并观测到一种在空间与时间维度同时局域的拓扑态，称之为“时空拓扑事件”。这类全新的拓扑状态展现出一系列独特的物理行为，包括：因果性抑制耦合和局域性的有限崩塌等。这项研究不仅为时间与时空拓扑提供了理论与实验支持，也揭示了动量拓扑与能量拓扑之间深刻的互补关系。掌控这类拓扑结构，有望推动时空维度波动调控技术的发展，广泛应用于成像、通信、拓扑激光器等新型光子器件与系

统。相关内容已发表于《Nature Photonics》。（金梦成）

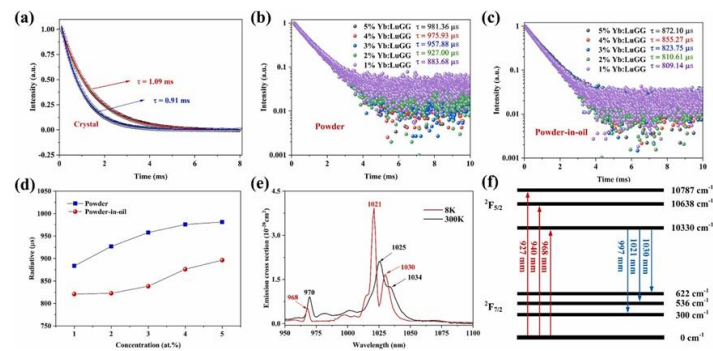


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01653-w>

2、Yb:Lu₃Ga₅O₁₂ 晶体的生长、光谱特性及激光性能研究

本文采用提拉法成功生长出尺寸为 $\varnothing 30\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的高质量 Yb 掺杂 LuGG 单晶，并系统研究了其生长过程、光谱特性及激光性能。在室温和低温（8K）条件下测量了吸收光谱、荧光光谱及荧光寿命，计算得出 Yb:LuGG 晶体的吸收截面、振子强度、线强、跃迁概率及辐射寿命等参数。通过不同实验条件测定了 Yb³⁺激发态能级 2F_{5/2} 的寿命，实验值与理论计算值高度吻合。计算获得的发射截面为 $2.11 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ，显著高于常见激光晶体 Yb:YAG。基于叠加模型（SM）拟合了 Yb:LuGG 的自旋轨道参数和本征晶体场参数（CFP），理论计算的晶体场能级与实验值呈现良好一致性。此外，通过激光性能参数计算获得了最大输出功率 2.57 W，斜率效率达 12.16%。研究结果表明，Yb:LuGG 晶体在激光晶体材料领域具有重要应用潜力。

中国科学院安徽光学精密机械研究所张庆礼研究员和孙贵花研究员研究团队采用提拉法成功生长了 Yb³⁺原子百分比为 5% 的 Yb:Lu₃Ga₅O₁₂（Yb:LuGG）晶体，系统研究了其光谱与激光性能。通过叠加模型拟合获得自旋轨道参数及晶体场参数，能级计算结果与实验高度吻合。激光性能测试显示，976nm 泵浦时最大输出功率为 2.57 W，斜率效率 12.16%，阈值 4.3 W。结果表明，Yb:LuGG 在可调谐与超快激光领域具显著应用潜力。相关研究成果以“Growth, spectral characteristics, and laser performance of Yb: Lu₃Ga₅O₁₂ crystals”为题发表在《Journal of Alloys and Compounds》上。（郑佳慧）

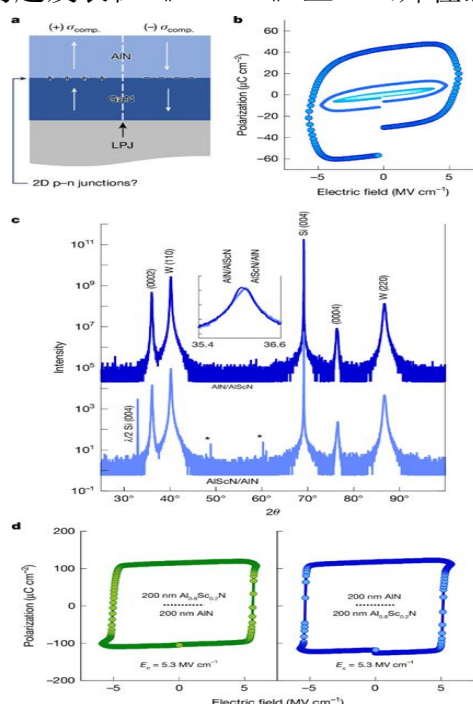


文章链接: DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.178255

3、纤锌矿异质结构中的邻近铁电效应

邻近铁电性是一种界面关联现象，指非铁电极性材料在相邻铁电材料的耦合作用下，通过电场驱动实现极化反转。本文报道了纤锌矿铁电异质结构中的邻近铁电性。在本研究中，非铁电层为氮化铝 (AlN) 和氧化锌 (ZnO)，而铁电层由 $\text{Al}_{1-x}\text{B}_x\text{N}$ 、 $\text{Al}_{1-x}\text{Sc}_x\text{N}$ 和 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ 构成。层状结构包含氮化物-氮化物、氧化物-氧化物及氮化物-氧化物堆叠体系，并设计了两层（非对称）与三层（对称）构型。通过多模态表征手段（包括极化滞回曲线、各向异性化学蚀刻、二次谐波产生、压电力显微镜、机电测试，以及扫描透射电子显微镜的实空间原子级极化取向成像），研究团队验证了两类材料层的铁电翻转行为，提出一种物理翻转模型：反极化核首先在铁电层内形成，并向内部非铁电界面传播。畴壁前缘产生的弹性场与电场会跨越邻近界面，从而降低非铁电层的翻转势垒，使得畴结构能够完整传播而不引发击穿。密度泛函理论对多晶型能量、翻转势垒及畴壁能量的计算结果支持该模型。邻近铁电性实现了纤锌矿材料的极化反转，避免了元素替代伴随的化学/结构无序性，为基于界面工程的铁电性研究开辟了新的科学问题与技术机遇。

近期，美国宾夕法尼亚州立大学 Jon-Paul Maria 研究团队揭示了一种新的界面现象，首次揭示了纤锌矿异质结构中的邻近铁电效应。研究团队提出：邻近铁电性源于铁电层中畴壁前缘局域动态接近铁电/非铁电界面时产生的弹性场与电场。当这些场抵达内部界面时，它们可协同调控多晶型体的相对稳定性，并将矫顽场强度降至击穿阈值以下——其作用机制类似于取代阳离子引发的局域改性效应，从而触发极化翻转。相关研究成果以“Proximity ferroelectricity in wurtzite heterostructures”为题发表在《Nature》上。（郑佳慧）



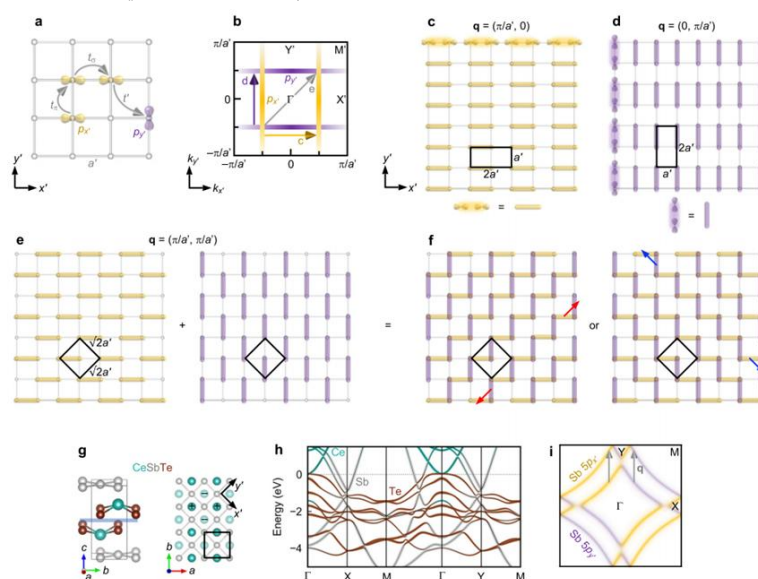
文章链接: DOI:10.1038/s41586-024-08295-y

4、CeSbTe 电荷密度波态内部结构可视化

在凝聚态物理领域，电荷密度波（Charge Density Wave, CDW）是一种常见的量

子多体现象，表现为电子密度与晶格周期的协同调制。该现象广泛存在于低维材料中，与高温超导、拓扑量子态等前沿课题密切相关，因此长期以来受到研究者的高度关注。CDW 的本质涉及电子之间的相互作用、声子参与的自发对称性破缺、以及晶体结构的复杂调控行为。尽管已有大量文献探讨 CDW 的形成机制和调控路径，但对其内部结构的精确观测始终是一大挑战，尤其是在实际材料中，CDW 的调制维度、周期性以及相干性往往非常复杂，难以通过传统探测手段获得全面认知。近年来，随着新型材料的发现与表征技术的飞速发展，具有多重序参量耦合特性的系统逐渐成为研究热点。例如，在某些 f 电子系统中，CDW 可能与自旋序、轨道序甚至拓扑电子态耦合，展现出前所未有的复杂性与功能性。因此，深入揭示 CDW 态在实际材料中的三维结构和多尺度特征，不仅对于理解其量子本质具有基础意义，也为开发可控的电子态调控手段提供了新机遇。当前最主要的瓶颈在于，如何在单一实验体系中同时解析 CDW 的周期性、相干长度、调制方向及其与晶格结构之间的精细关联。为此，需要发展具有原子分辨能力的新型探测方法，并将之应用于典型 CDW 材料的研究。

在这一背景下，德国马普所 Dennis Huang 研究员团队取得了重要进展。研究聚焦于一种具有层状结构的稀土四方化合物 CeSbTe，通过冷冻电子显微术（cryo-STEM）在原子尺度上揭示了该材料中前所未有的电荷密度波内部结构。CeSbTe 是一种 f 电子材料，具有层状晶体结构，属于 WHM（W=稀土，H=Si, Ge, Sb, Bi, M=过渡金属）材料族。此前研究已知该体系展现出非平庸的拓扑电子态和丰富的电子关联行为。本研究首次通过原位冷冻 STEM 成像和高精度傅里叶变换分析，在 CeSbTe 中观察到沿层间方向（即 c 轴）调制的三维电荷密度波结构，这在 f 电子材料中尚属首次报道。作者不仅确认了 CDW 具有非平凡的层内三重周期，还揭示了其相干长度长达 20 个层间距离，显示出强有序性的空间调制模式。更重要的是，团队通过系统的电子衍射分析和 STEM 图像重构，识别出 CDW 调制不仅包含单一方向上的简单正弦波成分，还呈现出高阶调制与层内/层间共存的多重谐波特征，体现出其非线性耦合的复合结构。此外，该工作还结合第一性原理计算，验证了调制可能源自 f 轨道电子的能带重构和声子模式的不稳定性，为理解 CDW 态的起源提供了清晰图景。（张琰炯）。

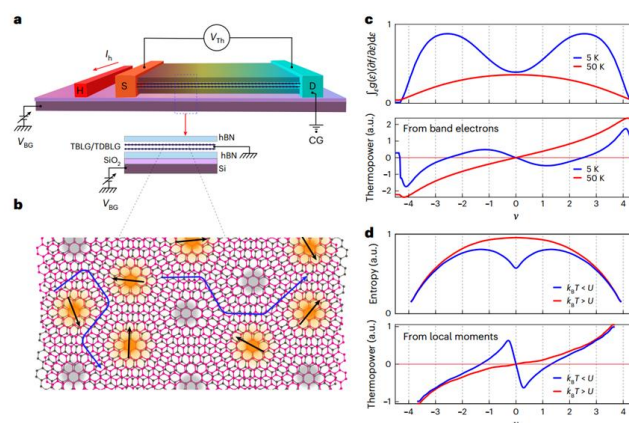


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58417-x>

5、魔角扭转双层石墨烯中涌现局域矩的热电探针

近年来，魔角扭转双层石墨烯（MATBLG）因其独特的平带结构及由此引发的强关联效应受到广泛关注。当两层石墨烯以约 1.1° 的魔角相对扭转时，层间杂化作用会形成近乎平坦的能带，使得电子动能远低于库仑相互作用能，从而为探索强关联物理提供了理想平台。实验已在该体系中观测到超导、莫特绝缘态、反常霍尔效应等一系列量子现象，揭示了其丰富的相图。然而，尽管扫描隧道显微镜（STM）和压缩率测量等局域探针间接暗示了局域矩的存在，但全局输运测量中仍缺乏直接证据。传统理论认为平带中的强关联可能导致局域矩的涌现，但其对宏观输运性质的影响尚未明晰。热电势作为一种反映系统熵特性的全局探针，为揭示局域矩与电子关联的相互作用提供了新途径。

近日，印度科学研究所的 Anindya Das 教授团队通过系统测量魔角扭转双层石墨烯的热电势随填充因子和温度的变化，首次在输运实验中观测到强关联平带中局域矩的明确信号。实验发现，在魔角器件中，热电势除在狄拉克点和能带满填充处发生符号反转外，在四分之一填充附近 ($\nu \approx \pm 1$) 还出现额外的温度无关符号反转点。这一现象与弱关联扭转双层石墨烯器件中温度敏感的符号反转行为形成鲜明对比。结合动力学平均场理论（DMFT）和原子极限模型的计算，研究证实此类鲁棒的符号反转源于局域矩的自旋/谷自由度熵贡献。进一步施加磁场实验表明，平行与垂直磁场分别使热电势降低 30% 和 50%，且熵积分曲线与局域矩理论预测高度吻合，表明磁场通过部分极化自旋自由度抑制了熵的贡献。高温区 (>120 K) 的热电势响应则回归传统石墨烯特性，与能带热展宽效应主导的莫特关系一致。这些结果不仅为魔角体系中强关联局域矩的存在提供了直接证据，还揭示了热电势在区分平带关联态与常规能带态中的独特优势。该研究提出的原子极限模型为理解强关联平带的熵特性奠定了理论基础，并为未来设计基于扭转异质结的热电器件提供了关键指导。相关文章发表于《Nature Physics》。（刘梦洋）



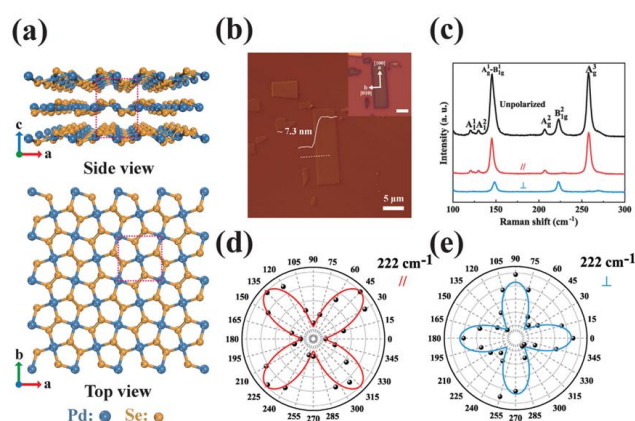
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02849-1>

6、多层 PdSe₂ 场效应晶体管中的界面热传输和能量耗散

在半导体器件不断向二维、纳米级别发展的今天，器件的高集成度和小尺寸化带来了电流密度急剧增高的问题，从而使得热耗散和热管理问题变得尤为突出。二维材料因其原子级薄度及独特的物理性质被广泛关注，尤其是在场效应晶体管（FET）等器件中展现出优异的电学性能。然而，在器件工作过程中，高功率密

度导致的局部高温现象容易引起热崩溃，进而损伤器件，制约了器件性能的进一步提升。当前，二维半导体与三维基底之间形成的范德华异质结构在热传输过程中表现出较大的热界面阻力（TBC），这不仅限制了热量从活性通道向基底的有效扩散，也成为制约器件稳定性和长期可靠性的重要因素。PdSe₂ 作为一种新型无机金属二硫属化物，其独特的低对称性、波状五边形晶格结构赋予了其各向异性电学、光学以及热电性能，其能带结构随层数变化具有较高的可调性，使其在高性能低功耗器件中的应用前景广阔。与此同时，高电流密度与低热界面导热率之间的矛盾，成为研究如何优化二维器件热管理的关键问题。因此，如何在保持器件优良电学性能的同时，通过改善界面热传输效率，实现高功率密度下的热安全运行，成为当前学界和产业界亟待解决的技术难题。

近日，南京师范大学张力发、赵云山教授和南京大学王雷教授课题组在多层 PdSe₂ 场效应晶体管的能量耗散与界面热传输研究方面取得了重要突破。该课题组利用电致焦耳热作为加热源，通过非接触式拉曼热测技术首次系统研究了 PdSe₂ FET 在高电场下的电击穿行为及其界面热传导特性。研究结果表明，多层 PdSe₂ 器件在 SiO₂ /Si 基底上实现了约 2.74 MAcm⁻² 的最大电流密度，其电流密度水平与多层黑磷器件相当，并约为多层 MoS₂ 器件的五倍，同时在高电场作用下达到约 0.037MWcm⁻² 的阈值功率密度。这些数据充分证明了 PdSe₂ 在承受大电流传输方面的巨大潜力。然而，该器件在实际工作中仍面临界面热阻较高的问题，其通过拉曼热测方法测得 PdSe₂ /SiO₂ 界面的热边界导热率仅约为 12 - 13 MW m⁻²K⁻¹，相比于其它二维材料与 SiO₂ 之间的热传输效率明显偏低。为此，该团队进一步采用差分 3 ω 法对界面热阻进行交叉验证，揭示了内部声子分布不均对拉曼测温结果的影响，为器件热管理提供了更为准确的上界估计。文章中深入分析了二维材料与基底间接触面积不足、界面结构异质性等因素对热传输效率的制约机制，提出了通过界面工程、纳米结构调控及热界面材料集成等策略来优化 PdSe₂ 器件热管理的思路。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202503264>

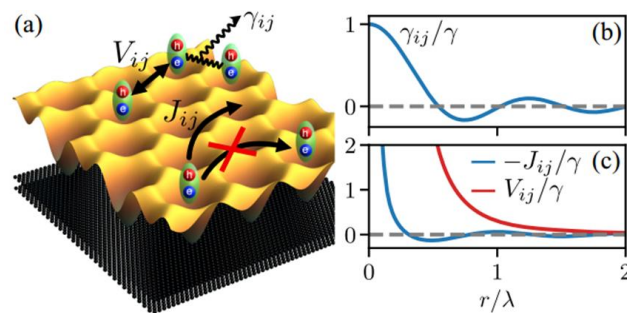
7、莫尔量子材料中强相互作用偶极激子的超辐射

二维半导体材料及其莫尔异质结构近年来成为探索强关联电子态与激子物理的重要平台。这类材料通过层间堆叠形成周期性莫尔势场，将激子局域在势阱中，形成亚波长尺度的晶格结构。莫尔激子因具有长寿命、强相互作用及可调控的光

学特性，在量子模拟与光电子器件领域展现出广阔潜力。此前研究多聚焦于激子间的静电相互作用，而集体光-物质耦合诱导的协同光学效应仍待深入探索。尤其在亚波长极限下，光子介导的长程耦合可能引发显著的量子多体动力学行为，如超辐射现象。然而，静态偶极相互作用对激子集体辐射的影响机制尚不明确，这成为理解莫尔量子材料光学性质的关键问题。

近日，奥地利维也纳工业大学的 Thomas Pohl 教授课题组通过理论模型分析了强相互作用的层间偶极激子在莫尔晶格中的协同辐射动力学。研究发现，静态偶极-偶极相互作用可显著调控激子的超辐射行为：在无序激发态下，偶极相互作用通过破坏激子波函数的对称性抑制超辐射；而在有序晶格填充态（如激子晶体或广义维格纳晶体）中，其通过增强激子间的相位一致性促进超辐射。此外，电子掺杂可动态调控光学协同性——当电子形成有序晶格时，未被占据的莫尔位点可容纳激子，使低填充激子态转变为超辐射态。研究还表明，莫尔晶格的亚波长特性（晶格常数远小于光学波长）使光子介导的激子跃迁强度远超单粒子辐射速率，进一步放大了集体效应。这些发现揭示了静态粒子相互作用与光致协同衰减的复杂关联，为设计基于莫尔材料的量子非线性光学器件提供了理论依据，并为探测强关联激子多体态开辟了新途径。该成果发表于《Physical Review Letters》。

（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.126901>

（来源：两江科技评论）