

超材料前沿研究一周精选

2025 年 5 月 19 日-2025 年 5 月 25 日

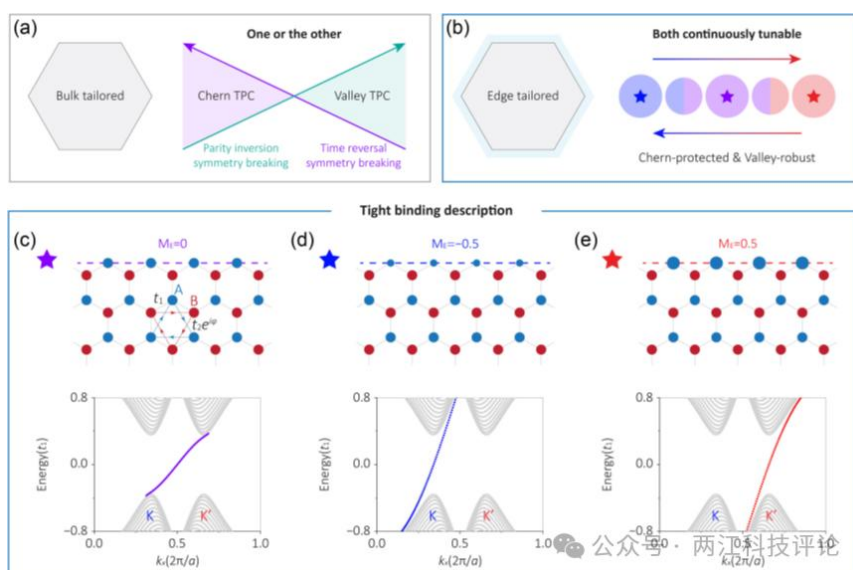
索引:

- 1、边缘剪裁光子晶体中的单向谷鲁棒输运
- 2、基于莫尔光子晶体纳米腔的腔量子电动力学
- 3、基于横向自旋匹配机制的拓扑光子晶体波导高效耦合
- 4、深亚波长分辨率微波超表面的高光谱成像
- 5、拓扑 BIC 的极端各向异性灵敏度观测
- 6、电场诱导的纤锌矿铁电体中的畴壁
- 7、强轨道-晶格耦合诱导高对称性单晶 BaTiS_3 中的玻璃态热导率
- 8、接近太阳能电池夜间性能的集中近场热辐射装置

1、边缘剪裁光子晶体中的单向谷鲁棒输运

信息载体的单向传输对现代信息与通信技术至关重要。近年来，谷自由度作为赝自旋在电子材料中被用于实现谷选择性单向输运，受此启发，提出了谷光子晶体，其支持传播方向与谷自由度锁定的光子拓扑态。破坏宇称反演对称性可产生具有相反局部 Berry 曲率的两个谷。通过在具有相反 Berry 曲率的晶体间引入线缺陷，可以激发谷态。然而，由于谷光子晶体的非全局拓扑特性，缺陷会引发反向散射和波谷翻转。为减少波谷光子晶体中的反向散射，已提出耗散稀释等方法，但仍依赖于晶体对称性，难以避免本征反向散射、频率限制及对缺陷的敏感性。能否实现对缺陷免疫的单向谷鲁棒态仍是挑战。相比之下，Chern 光子晶体通过打破时间反演对称性可实现由非零 Chern 数保护的全局单向拓扑态，但这种态独立于谷自由度。因此，一个自然的想法是结合二者，构建具有谷选择性的单向拓扑态。然而，谷态需破坏宇称反演对称性，而 Chern 态需破坏时间反演对称性，这种对称性间的冲突往往导致无法同时实现带隙内的谷态与单向态，而只能择其一。近日，新加坡国立大学的仇成伟教授团队和华南理工大学李志远教授团队合作，通过理论和实验，通过对体磁偏置和边缘几何结构进行调控，在旋磁光子晶体中实现了单向谷鲁棒态。关键在于通过边缘几何结构的局部配置引入单向态的谷自由度，而不是依赖于宇称反演对称性的全局破缺。具体而言，体磁偏置破缺了系统的时间反演对称性，从而打开了一个陈带隙，该带隙中存在一个与谷无关的单向态。同时，边缘定制几何结构在不干扰体拓扑结构的情况下将谷自由度引入单向态。最终，出现了受陈保护、谷鲁棒的单向边缘态，并且谷自由度保持连续可调。该策略避免了宇称反演对称性和时间反演对称性之间的全局竞争，打破了通常需要两个具有相反贝里曲率的谷光子晶体才能实现谷态的直觉。该结果为单向控制光的谷自由度提供了一种很有希望的方法。

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



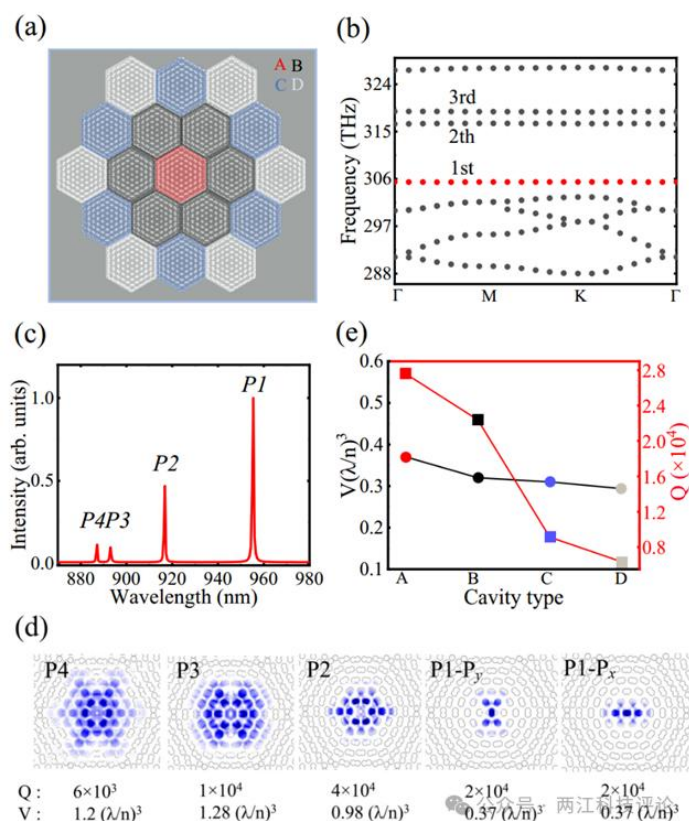
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.203803>

2、基于莫尔光子晶体纳米腔的腔量子电动力学

腔量子电动力学 (CQED) 是研究量子发射体与受限光场相互作用的核心领域, 其强耦合与弱耦合机制为量子光源、低阈值激光及量子信息处理提供了重要基础。传统微腔 (如光子晶体腔、回音壁模式腔) 虽能实现高 Q 值与小模体积 (V), 但其 Q/V 值仍受限于材料与结构设计, 阻碍了量子信息技术的进一步发展。近年来, 莫尔光子晶体 (MPhC) 因层间扭转形成的平带特性成为新焦点。平带理论支持动量无关的光局域化, 可实现接近零群速度的光场模式, 为超高 Q 值与超低模体积的纳米腔提供了可能。然而, 实验上实现单量子点与莫尔纳米腔的有效耦合面临两大挑战: 一是悬浮双层结构在近红外波段易塌缩, 二是腔模场主要分布于空气孔中, 导致量子点与光场空间重叠效率低, 突破这些瓶颈对推动 CQED 应用至关重要。

近日, 中国科学院物理研究所王灿团队与北京大学物理学院许秀来教授课题组合作, 通过优化单层光子晶体的填充比与结构参数, 设计并制备了嵌入量子点的 GaAs 基莫尔光子晶体纳米腔。理论模拟表明, 调整晶格常数 (a) 可显著提升 Q 值 (理论预测达 105) 并扩大有效作用区域 (提升约 35%)。实验中, 采用 6.01° 扭转角的双层结构, 通过调控外层空气孔间距 (δd) 增强结构稳定性, 最终实现了 Q 值约 2000 的基模共振。当单量子点与腔模共振时, 其光致发光强度增强约 8.4 倍, 通过寿命测量确认珀塞尔因子为 3.0, 二次相关测量显示单光子纯度显著提升 ($g_2(0)$ 从 0.65 降至 0.28)。此外, 腔模的远场垂直发射特性为自由空间或光纤集成量子光源提供了直接应用潜力。该工作首次实验验证了莫尔纳米腔与量子点的弱耦合效应, 为高纯度单光子源、低阈值激光器及量子非线性光学研究奠定了技术基础, 标志着固态 CQED 平台向实用化迈出关键一步。

本文发表于《Nature Communications》。(刘梦洋)



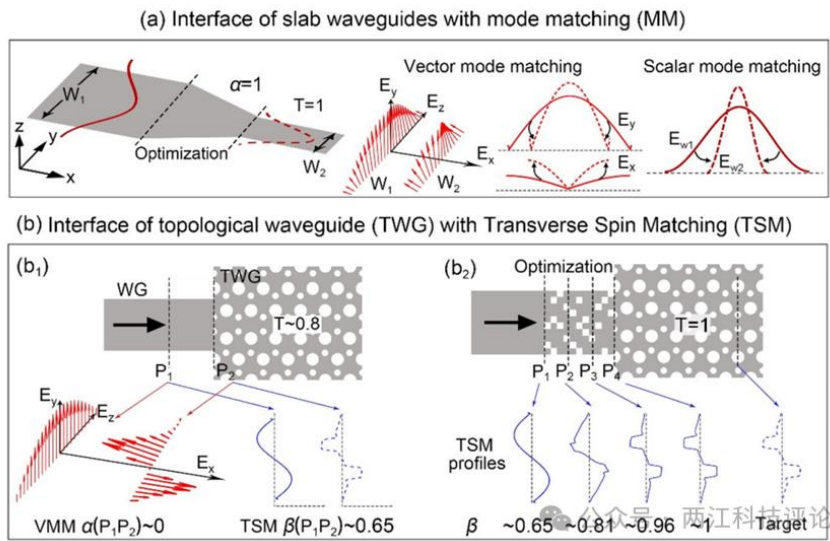
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59942-5>

3、基于横向自旋匹配机制的拓扑光子晶体波导高效耦合

拓扑光子学为集成光学芯片的发展开辟了新方向,其核心优势在于光传播的鲁棒性。拓扑光子晶体波导因其对缺陷的容忍性、高效弯曲传输能力及多自由度信息编码潜力,被视为未来片上光器件的理想候选。然而,尽管拓扑波导内部传输效率极高,其与常规波导的耦合效率长期受限,成为制约大规模拓扑光子芯片发展的关键瓶颈。现有方法基于模式匹配原理,但实际应用中传输效率普遍低于 80%,部分结构甚至不足 25%,严重削弱了拓扑结构的固有优势。因此,探索普适性的拓扑结构耦合机制,成为推动高效拓扑光学系统发展的核心挑战。

近日,哈尔滨工业大学的丁卫强教授、曹永印副教授课题组与新加坡国立大学的仇成伟教授合作,提出了一种全新的横向自旋匹配(TSM)机制,突破了传统模式匹配的局限性。研究发现,拓扑波导与普通波导的耦合效率并非由电场模式的重叠度决定,而是依赖于横向自旋分布的匹配程度。通过理论分析与数值模拟,研究揭示了横向自旋与能量流动方向的锁定关系(自旋-动量锁定),并建立了横向自旋匹配度的量化公式。基于此机制,研究团队设计了紧凑型耦合器,利用遗传算法优化其几何参数,最终在硅基拓扑波导与条状波导之间实现了理论 96.3%与实验 94.2%的传输效率,显著高于已有报道。这一效率提升源于横向自旋分布的空间调控,即使在模式正交条件下仍能实现高效能量传递。实验验证表明,优化后的耦合器在 1530-1570 纳米波段内保持高效传输,带宽达 22 纳米,充分证明了 TSM 机制的普适性与实用性。该成果不仅解决了拓扑结构输入输出耦合的长期难题,还为片上拓扑光子器件的集成化提供了关键技术支撑,有望推动拓扑延迟线、激光器及光开关等功能器件的规模化应用。

本文发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



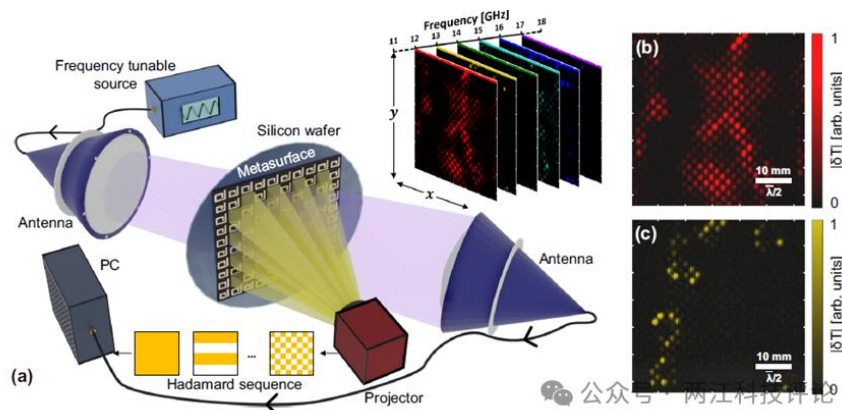
文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41467-025-59941-6>

4、深亚波长分辨率微波超表面的高光谱成像

超材料是一种复合介质，可以设计成具有独特的电磁性能。它们可以被设计为在透射和反射、偏振或调制辐射中实现光束整形，充当透镜，或实现成像。然而，它们的第一个也是仍然高度相关的应用是作为过滤辐射的频率选择性表面。随着超材料的复杂性和大规模制造的需求随着时间的推移而增加，对其性能进行无损评估的更强大方法的需求也将增加。超表面通常由金属或介质谐振器组成，谐振器排列成亚波长厚度的平面或多层结构，通过多个超原子同步作用的累积效应获得所需的辐射效果。然而，如果单个谐振器不能按预期工作，则相互作用可能偏离设计。例如，制造过程中的缺陷通常会导致尺寸或材料特性的改变，这可能导致性能下降。这种制造缺陷可能具有许多意想不到的后果，例如光谱展宽，这通常是短波长超表面的问题，其中结构可能需要纳米精度。然而，即使在较长的波长下，由于不均匀性，建模和实验之间的差异也会出现，并且会对设备性能产生关键影响。

近日，埃克塞特大学的 Harry Penketh 团队，介绍了一种成像技术，该技术能够在空间上分辨微波超表面中单个超原子的频率响应。通过将利用光激励掩模的微波单像素相机与窄带、频率可调的源相结合，对复杂超表面的内部运作获得了有价值的新见解。作者展示了该技术在空间诊断频率选择性超表面中非均匀展宽的原因的应用，并对单个超原子的近场进行成像。此外，作者还探索了多个样品上一系列制造缺陷和特征的独特空间光谱特征，并表明该方法可以应用于不同类型的超表面。

相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



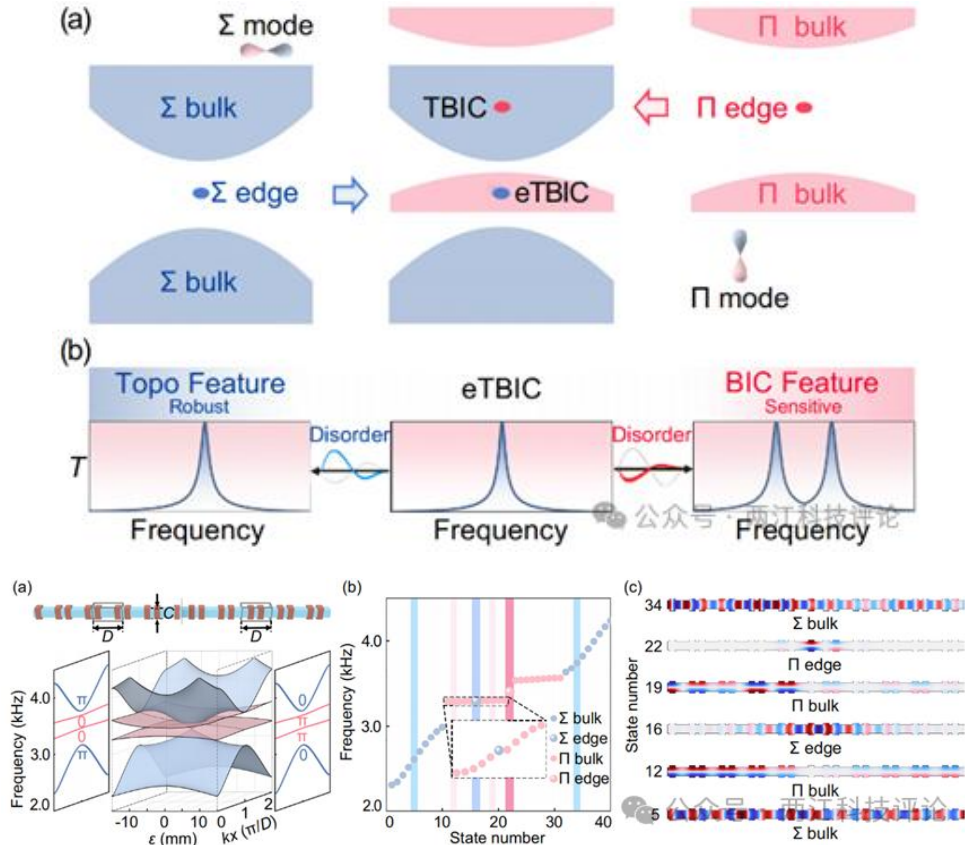
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59814-y>

5、拓扑 BIC 的极端各向异性灵敏度观测

在波动物理中，连续谱中的束缚态（BIC）是一类反直觉的局域态，尽管它们嵌入在扩展状态的连续谱中，却具有极长寿命。自最初在量子力学中被提出以来，BIC 已在电磁、声学与水波等系统中广泛发现。其形成机制包括：对称性不匹配、坐标变量分离以及参数调控等。由于其与外界波动解耦，BIC 表现出极高 Q 因子。这为潜在的高性能传感应用提供了极高的灵敏度，但也使其易受制造缺陷的影响。随着拓扑物理在凝聚态、光学与声学系统中快速发展，拓扑态的引入为提升 BIC 的鲁棒性提供了新机遇。拓扑边界态（TES）天然具有一定的抗缺陷能力，拓扑与 BIC 的融合不仅拓展了体-边界对应关系，也为 BIC 提供了内禀保护。目前的 TBIC 研究主要有两种路径：一种是通过镜像叠加构建双层系统，继承了原系统的拓扑性质；另一种则是在高阶拓扑结构中引入零维角态。然而，这两类方法均依赖高维复杂系统，且对 TBIC 的应用潜力关注较少。

近日，同济大学王旭副教授和李勇教授团队提出了通过对称性诱导的模式正交性来构造 TBIC 的通用机制，并以结构简单的单层拓扑声波导为例，实验验证了该机制的有效性。在该系统中，不同模式因对称性而自然分属两个不可耦合的子空间，实现能带结构的独立调控。以这种方式构建的“奇异”TBIC 在其透射谱中编码了极端各向异性，对特定扰动表现出高灵敏度，同时对其他扰动保持稳健。该研究结果将丰富拓扑物理和 BIC 的研究意义。

相关内容发表于《Physical Review Letters》上。（金梦成）

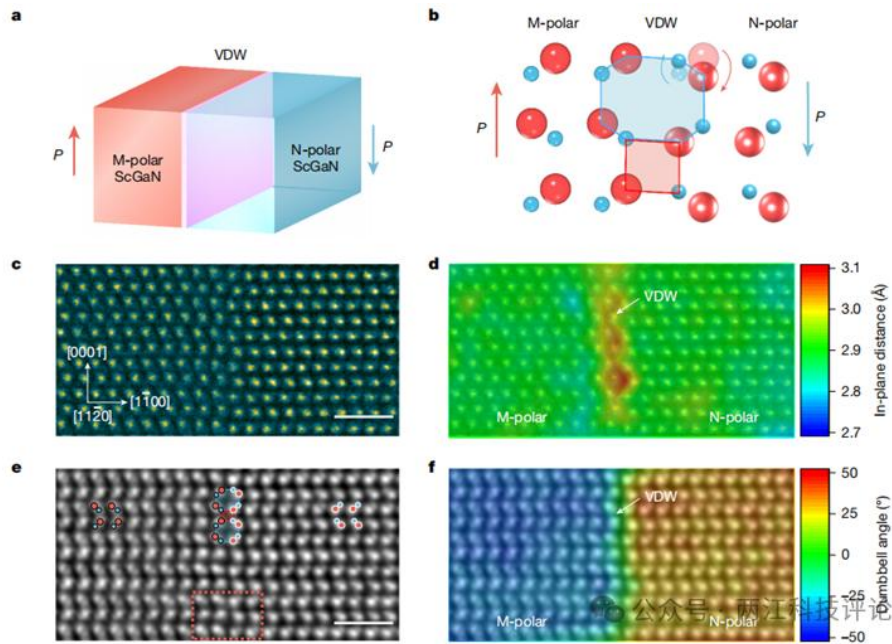


文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.206601>

6、电场诱导的纤锌矿铁电体中的畴壁

纤锌矿铁电体在下一代微电子领域具有革命性潜力。深入理解其铁电特性与畴结构能量学，对于调控铁电性能及开发其实用器件功能至关重要。尽管研究兴趣日益浓厚，但纤锌矿铁电体中畴壁的精确构型与电子结构仍不甚明晰。本研究揭示了钪掺杂氮化镓 (ScGa_N) 铁电材料中电场诱导畴壁的原子构型与电子特性。通过透射电子显微技术与理论计算的结合，发现了一种具有二维屈曲六方相的带电畴壁。密度泛函理论计算证实，这类畴壁结构会在禁带中产生前所未有的中隙态。定量分析揭示了一种普适性的电荷补偿机制：180° 畴壁处的极化不连续性通过未成键价电子得以补偿，从而稳定了铁电材料中的反极性畴壁。实验进一步证明了这类畴壁的可重构导电特性，展现了其在超微型器件中的应用前景。近日，美国密歇根大学 Zetian Mi 和 Emmanouil Kioupakis 研究团队系统研究了纤锌矿铁电材料 ScGa_N 中电场诱导畴壁的原子构型与电子特性。通过结合亚埃级扫描透射电镜 (STEM) 与密度泛函理论 (DFT) 计算，揭示了两种典型畴壁结构：垂直畴壁 (VDWs) 呈现电荷中性，原子排列保持六方对称性，电子结构与块体材料一致；水平畴壁 (HDWs) 则形成二维屈曲六方相，其极化不连续性通过未成键价电子实现电荷补偿，产生禁带内独特的中隙态。实验证实 HDWs 具有可重构导电性，导电路径可通过电场调控形成或擦除。研究还提出普适性电荷补偿机制，即 180° 畴壁处的极化突变通过悬挂键电子稳定化，为理解纤锌矿铁电体的畴动力学提供了原子尺度依据。这些发现不仅深化了对新型铁电材料极化机制的认识，更为基于畴壁导电特性的纳米器件（如高密度存储器、可重构电路）设计开辟了

新途径，推动下一代低功耗微电子技术的发展。相关研究成果以“Electric-field-induced domain walls in wurtzite ferroelectrics”为题发表在《Nature》上。（郑佳慧）



文章链接: DOI: 10.1038/s41586-025-08812-7

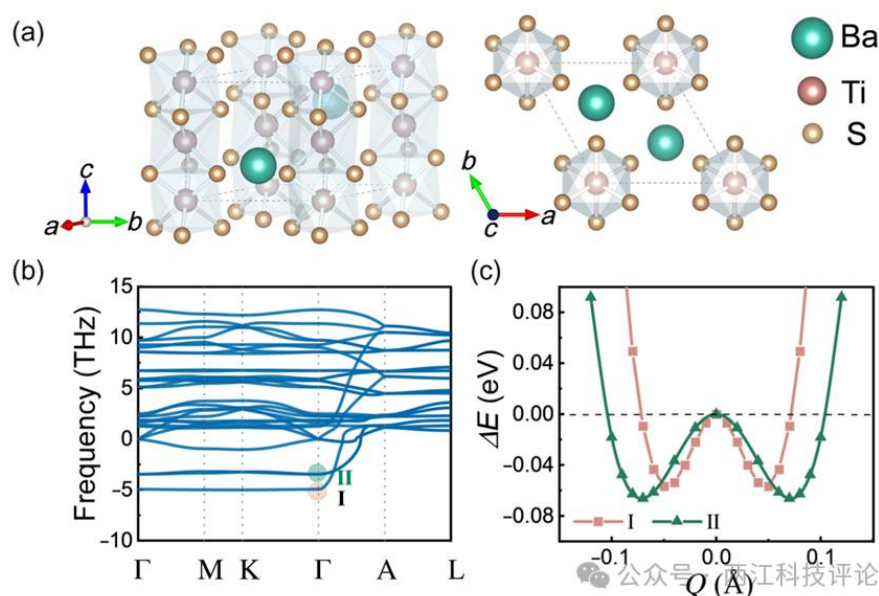
7、强轨道-晶格耦合诱导高对称性单晶 BaTiS₃ 中的玻璃态热导率

在热电材料研究中，如何在不牺牲晶体结构完整性的前提下实现玻璃态的低热导率，一直是材料科学领域的重大挑战。众所周知，晶体材料因其有序排列的原子结构通常具有高热导率，而无序的非晶材料则呈现出玻璃态特征的低热导率。这种差异源自声子在有序与无序结构中传播机制的显著不同。传统的降低晶体热导率的方法依赖于引入外源性的结构缺陷，如掺杂、位错、界面等手段，尽管这些方式能够有效削弱声子的平均自由程，但也可能对电子输运性能产生不利影响，难以同时实现高热电优值（ zT ）。因此，开发本征低热导率的单晶材料成为一个重要方向，尤其是那些在高对称性结构下却能呈现出“玻璃态”热导行为的材料。例如，SnSe、AgCrSe₂ 等材料的热导率虽接近理论下限，但它们的热导率温度依赖性仍体现出晶体材料的典型趋势。相比之下，极少数高对称性单晶，如 Cs₃Bi₂I₆Cl₃、RbV₃Sb、BaTiS₃ 等，则在整体有序的晶体框架中体现出局域的结构无序，从而表现出罕见的玻璃态热导率特征。这一独特现象被认为与强烈的轨道-晶格耦合引发的自发对称性破缺密切相关，进而引起局部结构的不稳定与原子排列的随机性。

近日，南方科技大学物理系讲席教授何佳清团队首次系统揭示了高对称性单晶 BaTiS₃ 中轨道-晶格强耦合诱导的一维有序-二维无序结构如何导致平面内的玻璃态热导行为。研究通过密度泛函理论计算、分子动力学模拟和热反射实验，发现 Ti³⁺ 离子的 t_{2g} 轨道三重简并态因伪 Jahn-Teller 效应 (PJTE) 被打破，导致 Ti-S 八面体发生非对称畸变，从而自发破坏 BaTiS₃ 的六方对称性。这种对称性破缺不仅在原子层面形成了“链内有序、链间无序”的特殊晶格结构，而且在宏观热传输上表现出极低且随温度升高而增强的热导率，即典型的玻璃态

行为。通过电子能谱和电子衍射验证，该二维无序的链间排列被直接观察到，并被理论建模所重现。更为重要的是，作者还发现，这种由轨道重构引发的结构不稳定性，在宏观尺度上显著抑制了声子的有效传播路径，尤其是在平面方向形成了热流的“扩散障碍”。与此同时，沿链方向的热导率则仍保持晶体材料的温度依赖趋势，显示出该材料在热输运上的高度各向异性。这一成果不仅拓展了人们对轨道-晶格耦合物理本质的理解，也为设计无需外部掺杂、即可实现本征低热导率的热电材料提供了新思路 and 理论基础。

相关内容发表于《Physical Review X》上。(张琰炯)



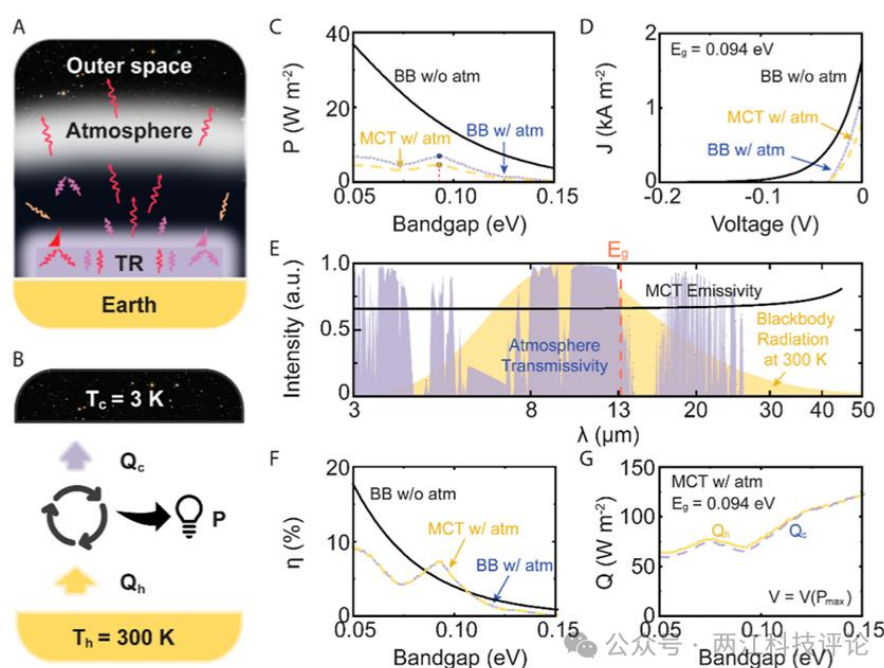
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.15.011066>

8、接近太阳能电池夜间性能的集中近场热辐射装置

在能源危机与碳中和目标并重的时代，如何高效利用自然环境中蕴含的低品位能源成为全球科研焦点。白天，太阳能无疑是最丰富的清洁能源来源之一，但夜晚的能源供给仍是一大难题。地球表面白天吸收的太阳能量最终以中红外波段的热辐射形式向太空发射，根据热力学第一定律，这一过程具有明确的能量守恒特性。近年来，科学家尝试将这部分“夜间向宇宙的热辐射”转化为可用电能，发展出热辐射电池（thermoradiative cell, TR cell）和基于辐射冷却的热电转换技术，力图实现全天候的绿色能源获取。尤其是 TR 技术，通过在夜间以负照射方式将热流引导至冷源（即外太空），在理论上具备高达 48.4 W/m^2 的功率上限，远超辐射冷却热电装置的性能。然而，实验上受限于大气窗口吸收、半导体材料折射率高导致的全内反射等瓶颈，传统 TR 器件的实际输出功率仅为 $1 \sim 2 \text{ mW/m}^2$ ，转换效率也低于 1%。如何突破这一性能桎梏，使夜间发电成为现实，成为当前热辐射研究的重要方向。

近日，东南大学冯杜东教授，提出一种“集中近场耦合”的夜间热辐射电池架构，在理论上实现了高达 180 W/m^2 的输出功率，首次将夜间发电性能推进至接近太阳能电池白天工作时的水平。研究人员首先系统分析了传统 TR 电池的性能瓶颈，指出大气吸收效应与窄带隙半导体的高折射率是限制热辐射释放和光子提取的核心因素。研究人员创新性地引入了一个由极性介电体构成的近场耦合层，在纳

米尺度的真空间隙内实现光子隧穿效应,大幅提升近带隙光子的提取能力。同时,为克服极性介电体在大气透明窗口中的低辐射能力,研究人员又在其上覆盖具有谱选择性的辐射冷却涂层,通过优化材料发射谱,使该系统在夜间有效散热至太空,从而维持 TR 电池的负照射环境。更进一步,研究人员将传统太阳能中的“聚光技术”思路应用于夜间发电,提出将辐射冷却发射体面积放大至 TR 电池的 20 倍,使总辐射通量得到倍增。在此“集中近场热辐射”结构中,功率密度被显著提升至 180 W/m^2 , 转换效率可达 36.2%, 远超当前所有实验结果,理论性能已接近太阳能电池日间工作值。该研究不仅在理论上为夜间可再生能源开辟了新方向,更为 TR 器件的工程实现提供了材料与结构设计方案。相关内容发表于《ACS Nano》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c16433>

(来源: 两江科技评论)