

索引:

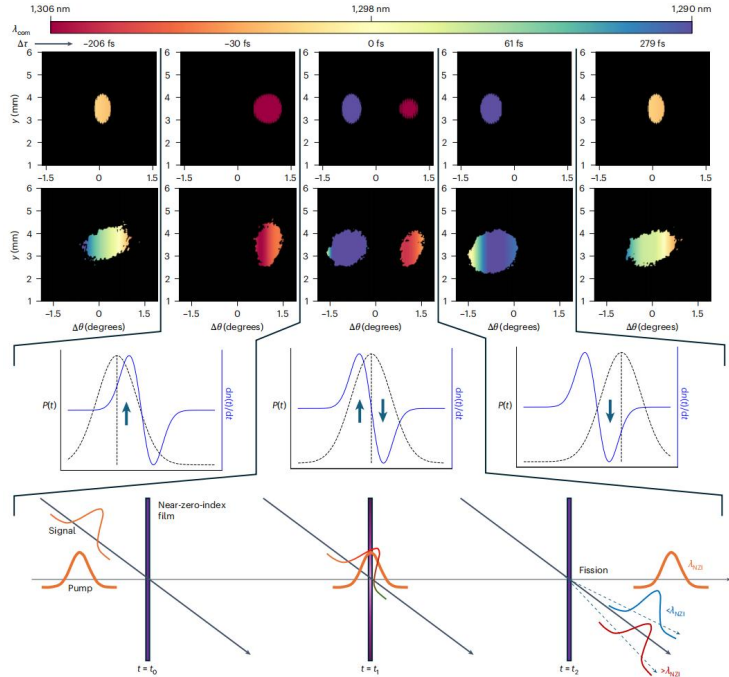
- 1、时变亚波长层中的空间光谱光学裂变
- 2、光子手性平带的观测
- 3、基于相变材料的片上非易失可重构拓扑光子学
- 4、极化子傅里叶晶体
- 5、二维异质结构中的电驱动可逆声子输运操纵
- 6、用于太阳能驱动光热应用的 $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ 纳米线中等离子体与拓扑表面态之间的强相互作用
- 7、氧硫比例调控结构与性能的异质阴离子氧硫族化合物
- 8、有机超表面中基于连续体中束缚态的拓扑可重构室温极化激元凝聚体

1 时变亚波长层中的空间光谱光学裂变

集成光子学领域中对宏观折射率的空间调控已广泛应用于超材料、光子晶体和光学光栅等器件，而时间折射率调控仍处于相对较少探索的阶段。尽管电光和全光调制已在信号处理领域得到广泛应用，相关研究主要关注信号的开关状态，而非光在介质瞬态演化过程中的相互作用。时间变化介质中的波动传播理论最早基于时间变化介电常数的概念发展而来，并在等离子体物理研究中得到了实验验证，以光子加速被引入该领域。当光子穿越发生突变的电子密度环境时，其频率会发生变化，产生时间折射现象。这一过程类似于空间维度中的材料界面折射，但并非由空间动量守恒决定，而是由时间动量守恒约束。尽管时间折射理论在过去二十年间得到了系统发展，但实验验证仍然面临挑战。要在实验上观察到显著的频率转换效应，必须在极短时间内实现剧烈的折射率变化，而现实系统通常只有折射率变化极快但幅度极小，或变化幅度大但响应速度较慢的两种情况，二者互斥的特性长期以来限制了时间折射的实验实现。近年来，透明导电氧化物在近红外波段的研究突破了这一瓶颈。这些材料在 260 nm 以上的光谱范围内具有强非线性效应，并且在 6 fs 脉冲作用下，其折射率可发生 100% 的变化，从而成为探索光子加速、时间折射和时空调控的理想平台。已有研究证实了大带宽的光频率转换、单位量级的折射率变化以及双色混合非线性效应，这些特性不仅为光子加速物理学提供了坚实的实验基础，也使透明导电氧化物成为构建光子时间晶体的潜在候选材料，甚至有望用于光学放大研究。

近日，英国 Heriot - Watt 大学的 Marcello Ferrera 教授团队通过光学泵浦技术，使亚波长厚度的氧化铝薄膜成为一个时间变化介质。光学激发在薄膜中诱导了大的折射率时间梯度，其变化趋势先上升后下降，从而对同步探测光的前后部分产生相反作用。实验发现，透射光束在空间上分裂为两个独立部分，每部分携带约一半的光谱能量，并分别表现出红移和蓝移的光谱偏移，二者的光谱变化方向相反，并以近零折射率波长为中心对称分布。理论推导的时间变化系统广义 Snell 定律，探测脉冲穿越时间变化的透明导电氧化物薄膜时，会同时经历时间折射和空间折射。由于薄膜厚度远小于入射脉冲的空间尺度，其最大时间折射率变化梯

度比空间变化梯度大约高出 40 倍，因此可视为一个均匀介质。研究表明，透明导电氧化物薄膜的折射率时间变化可导致探测脉冲的方向性变化和光谱重新分布，这一发现为未来基于时间变化材料的光子学应用提供了重要的实验和理论支持，尤其是在光子时间晶体、集成光子神经网络、超快波束操控和光学频分复用等领域。相关内容发表于《Nature Photonics》上。（金梦成）



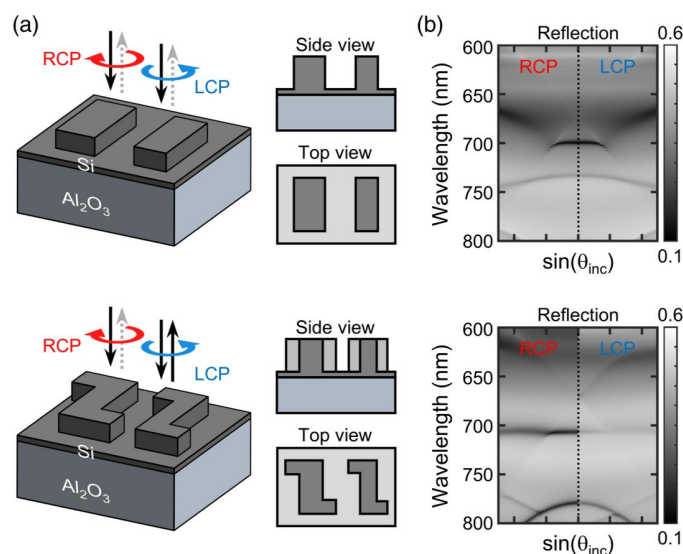
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01640-1>

2 光子手性平带的观测

对称性是许多科学技术领域的重要属性。光学手性与圆偏振选择性有关，即与光子的自旋角动量有关，并通过圆二色性（CD）进行量化，即对右旋圆偏振（RCP）和左旋圆偏振（LCP）的吸收或反射/透射选择性。过去，光学手性通常是使用宏观光学材料或手性分子获得的。最近，具有亚波长厚度的光子结构，也称为超表面，在紧凑形状因子中控制光物质相互作用方面越来越受欢迎。利用超表面中的大量自由度，各种光子带结构，包括无色散带，即所谓的“平坦”带，引起了人们的特别兴趣。由于缺乏色散，平带具有极其局部化的能量本征态，这种平带超表面已被用作紧凑型光电探测器，并增强胶体量子阱的发射。此外，这也可以用作具有最小角色散的大视场增强现实设备的窄带滤色器。然而具有手性响应的平带仅在理论上被提出，尚未在光子结构中得到证实。

近日，华盛顿大学的 Minho Choi 和 Arka Majumdar 教授团队与纽约市立大学的 Andrea Alù 教授合作设计并制造了一个在相对较宽的入射角范围（约 10° ）内具有较大 Q 因子（Q 约 140）的大手性（CD 约 0.6）平带超表面。通过控制和优化超表面的几何参数，作者设计了从抛物线到平带和多值结构的光色散。特别是，由于光的群速度慢和态密度大，平带超表面可以增强非线性光学效应。对这种超表面施加手性反应为研究轻物质与新兴低维材料的相互作用开辟了新的机会，如过渡金属二硫化物或铁磁材料。具体来说，作者设想在这种手性平带超表面中研究自旋选择性谷极化子和磁极化子。另一个重要方向是用于增强现实平视显示系

统的角度无关窄带滤波器。使用无色散平带可以同时实现窄光谱窗口和大视场。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）



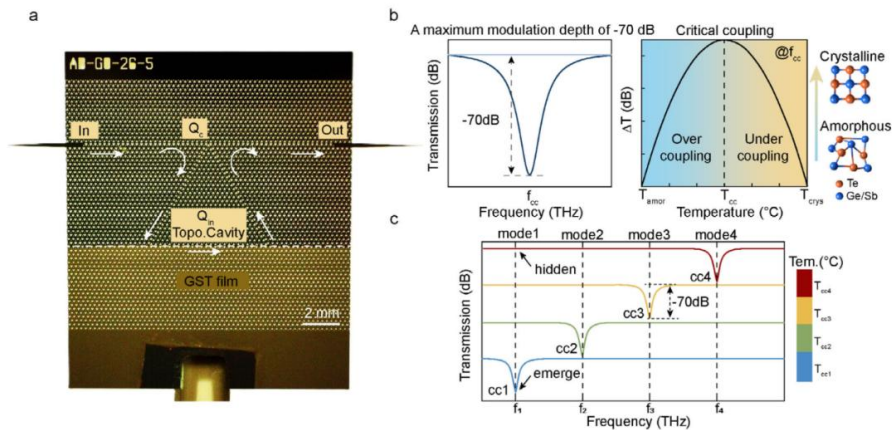
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.103801>

3 基于相变材料的片上非易失可重构拓扑光子学

随着第五代通信技术向毫米波频段扩展,大带宽、低延迟和高可靠性成为新一代无线通信的核心需求。虚拟现实、增强现实、高清视频流、自动驾驶和物联网的快速发展,推动了对更高数据速率、更大容量和更低端到端延迟的追求。太赫兹频段(0.1–10 THz)因其超大可用带宽被视为满足未来6G及超6G(XG)通信需求的关键,预计可支持1 Tbps的数据速率。然而,现有太赫兹集成芯片面临显著挑战:传统金属波导存在欧姆损耗高的问题,而介质波导(如硅基波导、光子晶体波导)虽能降低损耗,却受限于弯曲损耗、缺陷敏感性和缺乏动态调制的缺陷。此外,现有太赫兹拓扑光子器件多依赖易失性调谐机制,需持续外部供能以维持功能,限制了其实际应用。拓扑光子学通过利用拓扑边缘态的鲁棒传输特性,为克服上述问题提供了新思路。基于拓扑保护的波导和腔体系统能够抑制背向散射和辐射损耗,但现有拓扑腔体器件在动态调谐能力上仍存在不足,亟需非易失、可重构的解决方案。

近日,天津大学的田震教授课题组和美国圣母大学的Ranjan Singh教授以及来自新加坡南洋理工大学的研究团队合作,提出了一种基于相变材料锗碲碲(Ge₂Sb₂Te₅, GST)的非易失可重构太赫兹拓扑集成芯片。通过将拓扑波导-腔耦合系统与GST薄膜结合,实现了无需持续供能的持久功能调控。GST的非晶态与晶态间显著的光学对比度使其成为理想调谐介质。研究通过精确调控GST的中间相态(如面心立方相和六方密堆积相),在拓扑腔中实现了从过耦合、临界耦合到欠耦合状态的非易失切换,并展示了高达70 dB的共振传输多级调制深度。实验表明,通过热退火调控GST的结晶度,可选择性驱动不同腔模进入临界耦合状态,从而按需控制共振模式的显现与消失。此外,结合光泵浦技术,该芯片支持在非易失状态下进行易失性调制,实现耦合状态的可控重置。这一设计突破了传统拓扑器件调谐能力的限制,为太赫兹拓扑光子集成电路(T²PIC)提供了关键功能模块,包括可重构滤波器、调制器和逻辑电路。其非易失特性显著降低了

能耗，而高调制深度和动态调谐能力则为未来太赫兹片上高速通信、传感和成像技术奠定了基础。该研究成果发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）

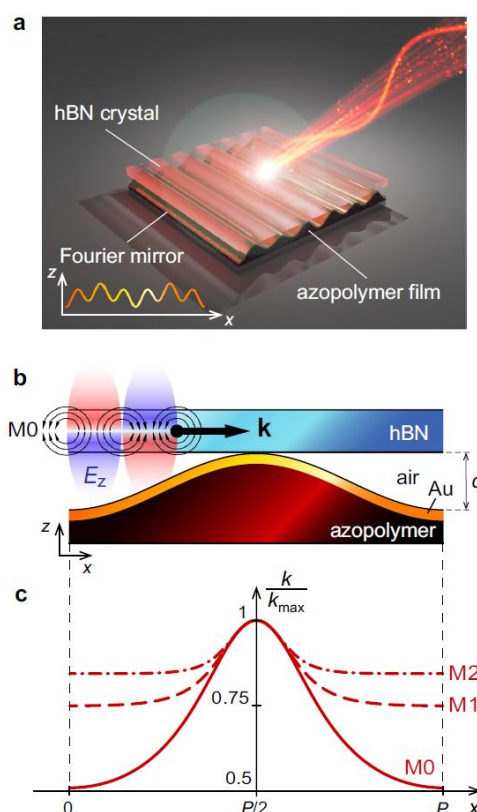


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202418510>

4 极化子傅里叶晶体

光子晶体具有光子带隙，已广泛应用于操纵光传播。然而，光子的空间限制受到衍射的限制，其动量严格由承载介质定义。同时，这些限制对于极化子（由光与电荷的集体振荡耦合而产生的准粒子）则不存在。特别是，薄层范德华(vdW)晶体能够引导极化子并将光限制在比自由空间波长小几个数量级的纳米级体积内。尽管范德华晶体层中的极化子在强场限制和动量可调性方面具有明显优势，但它们也存在固有材料介导损耗以及边缘和表面缺陷处通常较大的散射损耗等问题。因此，实现具有明显波动现象的极化子晶体并非易事。

近日，韩国科学技术院的 Min Seok Jang、多诺斯蒂亚国际物理中心的 Alexey Y. Nikitin、高丽大学的 Seungwoo Lee 引入了一种极化子傅里叶晶体的概念，该晶体基于在具有最小散射的原始极化子波导中对极化子动量的谐波调制。作者采用六方氮化硼 (hBN) 和近场成像来揭示傅里叶晶体中整齐且定义明确的声子极化子能带结构，该结构源于一阶布洛赫模式的主要激发。此外，即使在相对有损耗的自然丰富的 hBN 中，基本布洛赫模式也具有极化子带隙。因此，该工作为极化子晶体提供了一种替代范式，这对于增强光物质相互作用、色散工程和纳米光导至关重要。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



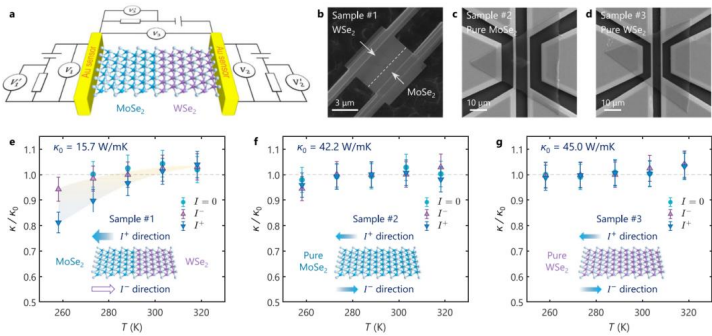
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57748-z>

5 二维异质结构中的电驱动可逆声子输运操纵

在现代电子器件、热电转换和热管理技术中，声子输运（phonon transport）起着至关重要的作用。由于晶体材料的热导率主要由声子主导，因此，如何有效调控声子的散射机制，以实现高效的热传输或热隔离，是当前材料科学的重要研究方向。然而，传统的热管理方法通常依赖于改变材料的结构，如纳米图案化、施加外部压力、应变工程或掺杂缺陷等手段，这些方法往往不可逆，并可能导致材料性能的不可控退化。因此，实现一种可动态调控且可逆的声子输运方式，对先进热管理技术的发展具有重要意义。近年来，电子-声子相互作用（electron-phonon interaction）成为调控热传导的新策略。理论研究表明，在一定条件下，电子可以通过散射声子来影响晶体的热导率，尤其是在二维半导体材料中，该效应甚至可以与声子-声子散射相媲美。然而，如何利用外加电场来主动调控电子-声子散射，从而实现动态、可逆的声子输运调控，仍然是一个未被充分探索的研究方向。

针对这一挑战，上海交通大学鲍华教授团队联合清华大学王海东副教授和吕瑞涛教授，成功开发了一种基于电场调控的二维 $\text{MoSe}_2\text{-WSe}_2$ 异质结声子输运调控方法，实现了热导率的可逆调控。研究团队利用化学气相沉积（CVD）方法成功合成了单层 $\text{MoSe}_2\text{-WSe}_2$ 横向异质结，并采用 H 型金电极传感器测量了其热导率。实验发现，在正向偏压下，异质结的热导率明显降低，而在反向偏压下则恢复到较高水平，这一差异在低温下更加显著。例如，在 258K 时，正向偏压下的热导率比反向偏压降低了 13.8%。进一步的理论建模和第一性原理计算揭示了这一现象的本质机制：在正向偏压下，载流子浓度和电子温度显著升高，导致更强的电子-声

子散射，使得热导率下降。该研究表明，通过调节外加偏压的大小和方向，可以在-20V 至+15V 的范围内动态控制热导率，从而实现对声子输运的主动可逆调控。研究人员通过器件模拟和有效的第一性原理模型，进一步量化了电子-声子散射的强度随偏压变化的趋势，并证明了这一方法的普适性。该研究首次在二维半导体异质结中实现了基于电场的可逆声子输运调控，为未来的热管理、半导体热设计以及动态热电转换器件提供了全新的可能性。这一突破性成果不仅为二维材料的热输运研究提供了新的思路，也为智能热管理技术的发展奠定了重要的理论和实验基础。未来，研究团队计划进一步优化异质结结构，提高热导率调控效率，并探索其在下一代电子和光电子器件中的实际应用潜力。研究成果发表在《Nature Communications》上(张琰炯)。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57224-8>

6 用于太阳能驱动光热应用的 $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ 纳米线中等离子体与拓

扑表面态之间的强相互作用

随着全球能源短缺和环境污染问题的加剧，太阳能驱动的光热转换技术因其可再生、绿色环保的特点，成为能源领域的重要研究方向。其中，太阳能蒸发是一项极具应用前景的技术，它能够利用太阳光直接将水转化为蒸汽，从而用于海水淡化、废水处理和热能能量转换等应用。近年来，研究人员致力于开发高效的光热材料，以提高光热转换效率，从而提升水蒸发速率和能量转换效率。目前，光热材料主要包括二维层状材料、碳基材料、半导体材料和等离子体纳米结构。其中，等离子体共振材料因其能够在纳米尺度上聚集光能并通过等离子体加热实现高效的光热转换，受到了广泛关注。尤其是 Cu_{2-x}S 等自掺杂半导体，能够在近红外波段产生强烈的局域表面等离子体共振 (LSPR)，展现出优异的光热性能。此外，近年来兴起的拓扑材料因其独特的电子结构和拓扑表面态 (TSS) 而受到关注。拓扑表面态不仅能够增强材料对光的吸收，还能通过减少载流子复合，提高光生载流子的利用率，从而提高光热转换效率。因此，将拓扑材料与等离子体共振材料结合，利用二者的协同作用提升光热性能，成为近年来光热转换领域的一个重要研究方向。

针对这一挑战，武汉工程科技学院马良教授团队，联合中国地质大学（武汉）丁思静教授、南方科技大学王取泉教授，成功制备了一种基于 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ 纳米线的高效光热材料，并揭示了其中的等离子体共振与拓扑表面态的强相互作用机制。研究团队通过水热法合成了 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ 杂化纳米线结构，其中， Cu_{2-x}S 纳米片均匀生长在 Bi_2Se_3 纳米线上。实验表明，该结构在 808nm 激光照射下的光热转换

效率高达 54.6%，可与多种高效光热材料（如半导体结、金属基复合材料）相媲美。进一步的光学分析显示， $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ 杂化纳米线展现出宽光谱吸收能力，尤其在近红外区域的吸收显著增强。研究表明，这种增强源于等离子体共振与拓扑表面态的共振耦合效应，以及光生载流子的快速弛豫过程。为了进一步验证该材料的光热性能，研究团队将 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ 杂化纳米线集成到水凝胶中，并与热电模块结合，构建了太阳能驱动的水蒸发与热电发电一体化系统。实验数据显示，该系统的水蒸发速率高达 $3.67\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，太阳能-蒸汽转换效率达到 95.2%，远超目前大多数光热蒸发器。此外，通过引入锥形反射镜，研究团队进一步提升了蒸发速率至 $5.94\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，最大输出功率提高至 3.259 W/m^2 ，且无需额外能源输入。这一成果不仅验证了拓扑表面态与等离子体共振在光热转换中的协同效应，也为高效太阳能热管理、海水淡化和太阳能热电转换提供了一种新的策略。未来，该研究团队计划进一步优化材料结构，提高其在实际应用中的稳定性和耐久性，为绿色能源技术的发展提供新的方向。相关内容发表于《Science Advance》上。（张琰炯）

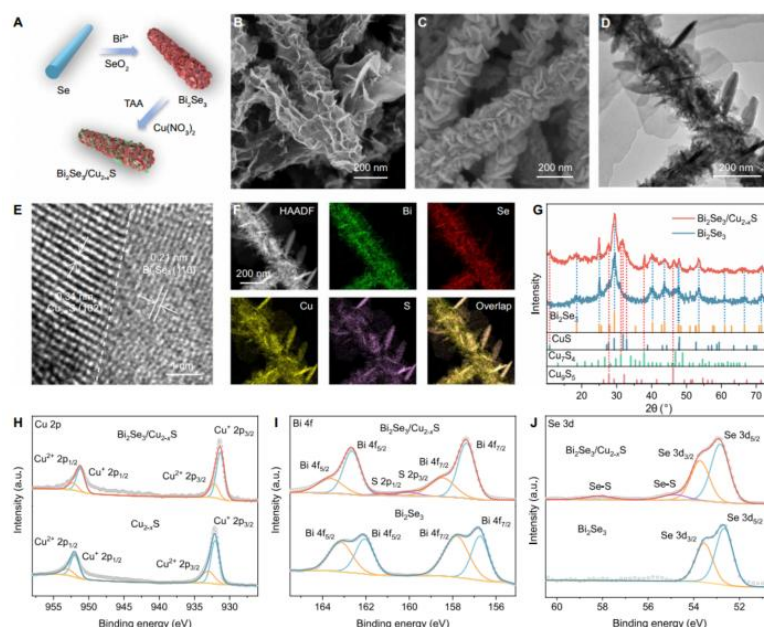


Fig. 1. Preparation and characterization of $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ hybrids. (A) Schematic illustration of the synthetic process. SEM images of Bi_2Se_3 (B) and $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ (C) nanowires. TEM image (D) and EDS mappings (F) of $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ hybrids. (G) XRD patterns for Bi_2Se_3 and $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ hybrids. High-resolution XPS spectra of Cu 2p (H), Bi 4f (I), and Se 3d (J) for $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ hybrids and components. a.u., arbitrary units.

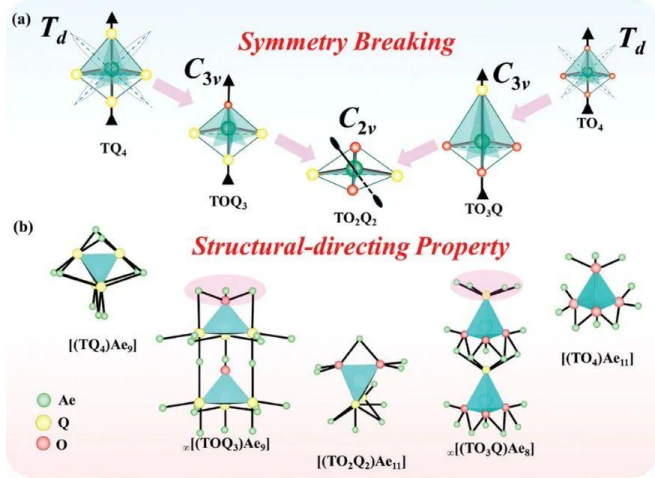
文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adt2884>

7 氧硫比例调控结构与性能的异质阴离子氧硫族化合物

含有两种或多种阴离子的异质阴离子化合物，其结构和性能有望通过改变阴离子比例进行调控，但其合理的结构设计仍是一个巨大的挑战。本文报道了首个异质阴离子氧硫属化合物家族，其结构和性能通过不同的 O:S 比例得到了有效调控。这些化合物包括：三角晶系的 $\text{Sr}_2(\text{SnS}_4)_{2/3}(\text{SnOS}_3)_{1/3}$ (P3m1; O:S=1:11)、菱方晶系的 $\text{Sr}_2(\text{GeS}_4)_{4/9}(\text{GeOS}_3)_{5/9}$ (R3; O:S=1:6.2)、正交晶系的 $\text{Sr}_2[\text{Ge}(00.89/\text{S}0.11)\text{S}_3]$ (Ama2; O:S=1:3.5) 以及正交晶系的 $\text{Ba}_2(\text{GeOS}_3)_{1/2}(\text{GeO}_2\text{S}_2)_{1/2}$ (Pnma; O:S=1:1.7)。这些化合物均被视为 Sr_2GeS_4 的不同 O 和 S 取代衍生物。它们之间有趣的结构转变可归因于异质阴离子的“对称性破缺”和“结构导向”特性。此外，由于 O 和 S 原子的电负性和极化

性不同，这些材料的功能性能可根据 O:S 比例进行调控。通过合理提高 O:S 比例，成功设计出一种优异的红外非线性光学晶体 $\text{Sr}_2[\text{Ge}(\text{O}_{0.89}/\text{S}_{0.11})\text{S}_3]$ ，其在所有已报道的氧硫属化合物中表现出二次谐波产生响应与宽带隙之间的最佳平衡。这些研究为异质阴离子功能材料（尤其是非中心对称材料）的合理设计提供了新的见解。

近期，天津理工大学俞洪伟教授研究团队设计合成了首个具有不同 O/S 取代比例的氧硫族化合物家族 $\text{Ae}_2\text{TIV}_2\text{O}_x\text{S}_{4-x}$ ($\text{Ae} = \text{Ba}, \text{Sr}$; $\text{TIV} = \text{Ge}, \text{Sn}$) 被成功设计与合成。详细的结构分析表明，这些化合物之间有趣的对称性转变可归因于异质阴离子基团的“对称性破缺”和“结构导向”特性。其中， $\text{Sr}_2[\text{Ge}(\text{O}_{0.89}/\text{S}_{0.11})\text{S}_3]$ 表现出优异的非线性光学性能，使其成为一种有前景的红外非线性光学晶体。这些发现为非中心对称功能材料的设计提供了新的见解。相关研究成果以“Hetero-anionic oxychalcogenides with structures and properties tuned by the O:S ratio”为题发表在《Advanced Functional Materials》上。（郑佳慧）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202424059>

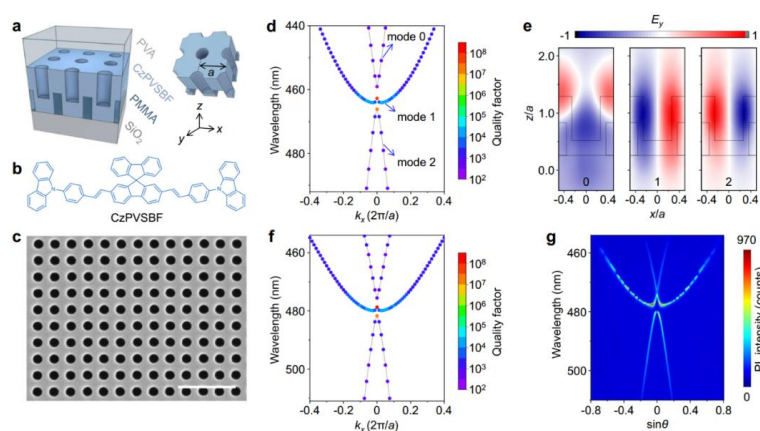
8 有机超表面中基于连续体中束缚态的拓扑可重构室温极化激元凝聚体

聚体

激子极化激元是由半导体激子与腔光子强耦合形成的玻色型准粒子，其凝聚态因集体相干性展现出超流性、拓扑激发等宏观量子现象，并为低阈值激光器、超快光开关等功能器件奠定物理基础。然而，激子极化激元的快速耗散特性严重限制了其凝聚态的产生与调控。近年来，连续体中的束缚态（BIC）作为一种特殊的拓扑光学模式，因无限高的品质因子和非辐射特性，为抑制极化激元耗散、实现高效凝聚提供了新思路。BIC 的拓扑性质还可赋予极化激元对称性保护、偏振涡旋等独特行为，进一步扩展了其在拓扑光子学中的应用潜力。有机半导体材料凭借强 Frenkel 激子、高激子结合能及优异的物理化学可调性，被视为实现室温 BIC 极化激元凝聚的理想平台。然而，有机体系中 BIC 的普适性设计机制尚未明确，且传统无机材料受限于低温需求与结构不可调性，导致拓扑可重构的极化激元凝聚体长期难以实现。如何通过系统化工程策略，在室温下实现 BIC 极化激元的动态拓扑调控，成为该领域亟待解决的关键科学问题。

近日，中国科学院大学的赵永生教授课题组与德国莱布尼茨固体与材料研究所的

马利波博士团队合作，通过设计二维有机半导体超表面，成功实现了室温下基于BIC的低阈值极化激元凝聚及其拓扑动态重构。研究团队利用光刻技术制备了周期性孔阵列有机超表面，其支持两种具有不同拓扑电荷的极化激元BIC模式。通过理论计算与实验表征，证实了有机Frenkel激子与BIC光子模式的强耦合作用，使得极化激元在室温下以超低阈值（ $0.30 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ）实现非平衡凝聚。进一步通过调控超表面填充因子改变能带结构，实现了极化激元激光在两种BIC模式间的切换，并利用分子光异构化策略动态调节超表面折射率对比度，成功在实时光控下切换BIC的拓扑电荷（ $q=\pm 1$ ）。实验表明，两种BIC极化激元凝聚体分别携带偏振涡旋特征，其远场激光光束呈现环状分布，且通过线性偏振片后表现出相反的偏振旋转方向，验证了拓扑电荷的可控性。该工作不仅突破了室温极化激元凝聚的阈值限制，还首次在有机体系中实现了拓扑性质的动态重构，为开发基于拓扑光子学的新型量子器件提供了材料设计与调控的理论及实验依据。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57738-1>

（来源：两江科技评论）