

超材料前沿研究一周精选

2025 年 8 月 11 日-2025 年 8 月 17 日

索引：

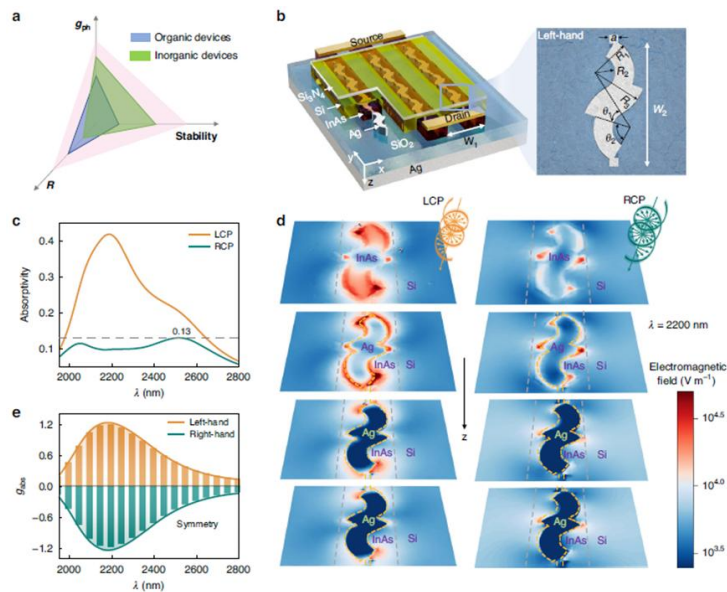
- 1、基于手性等离激元超材料的电增益辅助圆偏振光探测
- 2、纳米光机量子霍尔网络中的可编程合成磁性和手性边界态
- 3、强耦合无序非厄米链中的安德森离域
- 4、基于交联耦合谐振单元与 EP 调控的可切换式双向吸声超结构
- 5、几何阻挫向列相液晶中的多稳态极性织构
- 6、超洁净石墨烯中电荷与热量量子临界流的普适性
- 7、纳米磁超材料中的可控滑动结构
- 8、基于 Ag₂Se 的柔性薄膜热电材料在可持续能源 harvesting 和制冷中的应用

1、基于手性等离激元超材料的电增益辅助圆偏振光探测

手性广泛存在于自然界，从分子到星云均有体现。圆偏振光（CPL）因其与手性材料的强耦合特性，已成为探测和分析手性分子的关键手段，并在生物传感、分子检测、圆二色谱学及光通信、成像、量子计算等领域展现出重要应用价值。然而，传统 CPL 探测器依赖偏振片和波片，限制了小型化与集成化。近年来，基于手性材料或结构的无滤波 CPL 探测器受到关注，但仍存在性能瓶颈。基于有机手性材料的器件虽能直接探测 CPL，但因本征手性弱，常表现为低不对称因子和稳定性差。相比之下，无机手性等离激元超材料器件利用金属微纳结构对 LCP/RCP 光的差异吸收，可提升稳定性，但响应度受限于热电子注入效率不足。现有方法难以兼顾电不对称因子、响应度和稳定性，因此亟需发展新型高性能 CPL 探测方案。

近日，苏州大学的杨阵海副教授、李孝峰教授和曹国洋副教授团队，提出了一种新型 CPL 探测器，其结构将“S”形手性银（Ag）纳米结构与无机砷化铟（InAs）/硅（Si）异质结相结合。“S”形手性 Ag 纳米结构能够有效激发局域表面等离激元（LSPR），从而实现对 InAs 材料在左、右圆偏振光（LCP 和 RCP）下吸收的差异化调控。同时，InAs 作为导电通道，通过光电导效应、光栅效应、栅极调控以及陷阱效应等机制产生显著的电增益。多物理场耦合模拟结果表明，该无机器件可同时实现 1.56 的高电学不对称因子（gph）和高达 $33,900 \text{ AW}^{-1}$ 的超高响应度（R），并具备覆盖 2000 - 2800 nm 近红外至中红外波段的宽带响应。此外，InAs/Si 异质结结构还使器件具备自供电模式，表现出 10 ps 的超快响应时间和高达 $8 \times 10^{13} \text{ Jones}$ 的比探测率。基于该高性能 CPL 探测器，研究人员进

一步构建了简化且无密钥的光学加密通信系统，展示了其多功能性与实际应用潜力。本研究通过将手性等离子超构材料与电增益相结合，为实现高性能 CPL 探测提供了一条极具前景的途径。相关工作发表在《Light: Science & Applications》上。（刘帅）



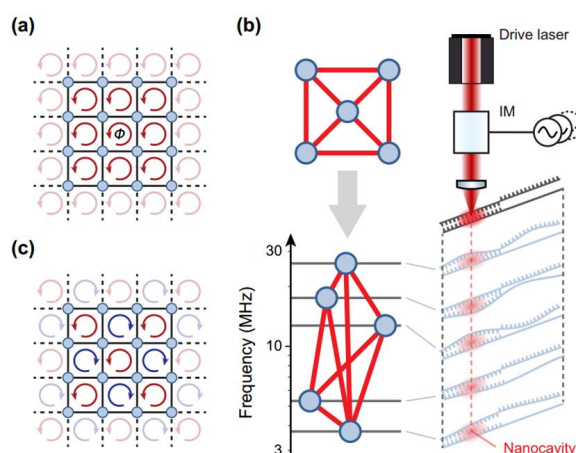
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01932-9>

2、纳米光机量子霍尔网络中的可编程合成磁性和手性边界态

量子霍尔效应作为凝聚态物理的核心现象，揭示了强磁场下二维电子气中受拓扑保护的鲁棒手性边界态。其物理本质源于时间反演对称性破缺导致的非互易 Aharonov-Bohm 相位积累，促使体态绝缘化而边界形成单向导电通道。这一波现象学原理具有普适性，可拓展至光子、声子等中性玻色子体系。然而，在纳米尺度实现人工磁场以打破时间反演对称性存在显著挑战：传统方法如旋转流体、耦合陀螺仪或磁光材料受限于系统尺寸、材料特性及原位可调性，难以在纳米光子与纳米机械领域应用。尽管动力学调制（Floquet 系统）通过参数驱动可构建规范场，但在纳米机械谐振器网络中实现可控量子霍尔相仍属空白。发展可编程人工磁场的纳米平台，对探索拓扑声子相、开发抗背散射信息传输通道及噪声管理技术具有迫切需求。

近日，荷兰 AMOLF 纳米光子学中心的 Ewold Verhagen 研究团队通过设计多功能纳米光力学平台，在合成维度上利用机械谐振器网络首次实验实现了声子的量子霍尔物理。该研究利用激光驱动在硅基光子晶体纳米梁上构建全可编程耦合网络：通过调制控制激光强度与相位，在机械模式间诱导非互易声子跃迁，从而在谐振器闭环中植入人工 Aharonov-Bohm 磁通。实验系统实现了对网络哈密顿量矩阵的精确操控，包括任意连接构型与磁通分布（如非均匀磁场）。在关键实验验证中，研究聚焦多磁通干涉效应，突破了传统材料的限制，首次在纳米机械系统中实现了整数量子霍尔相的核心特征——手性边界态与体边分离，为拓扑声子学提供了可扩展的实验基础。其全光编程能力为研究复杂网络中的对称性破缺、拓扑相变及声子输运机制开辟了新途径，在芯片级声学隔离器、高鲁棒性信息路由及量子模拟领域具应用潜力。本研究成果发表于《Nature Communications》。

(刘梦洋)



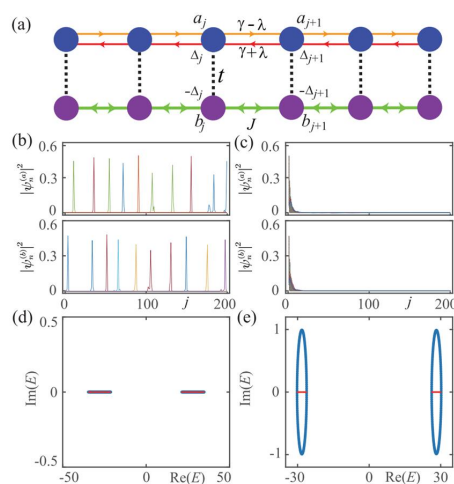
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62541-z>

3、强耦合无序非厄米链中的安德森离域

近年来,非厄米系统中涌现出许多奇异物理现象,其研究平台包括光学系统、电路以及开放量子系统。其中一个核心发现是非厄米趋肤效应 (NHSE):在开放边界条件下,本征态对边界极为敏感,并全部堆积在边缘。该效应源于点隙拓扑,引发了一系列没有厄米对应物的新现象,例如传统布洛赫能带理论的失效以及无无序的纠缠相变。

在非厄米系统中,无序也发挥着关键作用,影响输运、纠缠和拓扑。它能够诱发一些奇异现象,例如定位中的非幺正标度行为、由无序驱动的非布洛赫拓扑相变,以及动力学去局域与谱局域的共存。在弱无序下,一维 Hatano - Nelson (HN) 链中可出现 NHSE 伴随的意外去局域化,挑战了“低维无序系统必然局域化”的传统预期。然而,随着无序增强,趋肤态最终会重新局域化,这揭示了无序与非厄米性间复杂的再入效应。由此自然引出一个问题:在强无序条件下,非厄米系统是否仍可能经历局域 - 去局域转变,并重新唤起 NHSE? 在厄米系统中,已有研究表明耦合无序链可诱导去局域化,这提示了在非厄米体系中探索类似转变的潜在途径。

近日,华南理工大学巨文博教授,杨中民教授和刘涛教授团队在一个阶梯格架几何中研究了处于超强无序下的耦合非厄米链的安德森局域 - 去局域转变:其发生在带有相关无序的耦合链中,并由非厄米性、链间耦合与相关无序的三重作用驱动。具体而言,该系统由一条非厄米 HN 链与一条带反对称相关无序的厄米链耦合而成。这种结构在超强无序下依然会出现安德森去局域化,并伴随 NHSE 的重新出现,而其临界条件由链间耦合强度所控制。该转变可通过实空间绕数进行拓扑表征。通过可调的非互易电路,团队在实验上实现并验证了这一现象,强调了非厄米性与相关无序如何协同决定波动的局域化特性。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》。(金梦成)

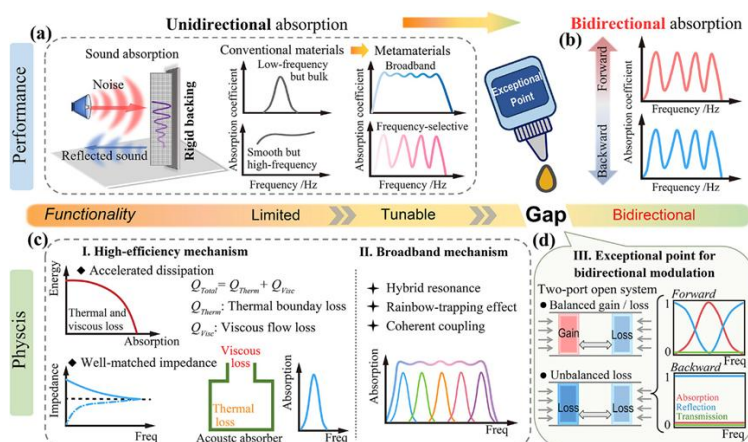


文章链接: <https://doi.org/10.1103/lpm2-vc4>

4、基于交联耦合谐振单元与 EP 调控的可切换式双向吸声超结构

声波调控在噪声控制等领域至关重要,但传统材料受限于波长尺度,低频吸声效果受限。声学超材料虽可通过局域共振与阻抗调制突破该瓶颈,但多停留于单向吸声;工程上常用的“双侧各铺一层吸声体”又显著增加厚度与体积,难以满足紧凑化与集成化需求。因此,亟需面向双向吸声的新机理与新结构。近年来,非厄米物理中的 EP 点为不对称散射与定向吸声提供思路,然而既有研究多追求“极端不对称”,对于可调/可切换的双向吸声所依赖的耦合态调制、能量耗散与阻抗匹配等机制仍缺乏系统阐明,制约了工程化与通用设计框架的形成。

近日,中南大学王中钢教授团队和南洋理工大学范峥教授团队将交错耦合谐振单元与 EP 调控相结合,提出以“等效阻抗—EP”为核心的可切换式双向吸声超结构。该设计通过垂直/水平维度共振协同,在深度亚波长尺度下,前向获得 478 - 670 Hz 连续宽带吸收,后向出现 260 Hz 与 542 Hz 两个离散峰值。理论、数值与实验结果一致,体现出优异的紧凑性、低频/宽带性能与鲁棒性,并具备良好的可迁移性。相关工作以“Switchable Bidirectional Sound Absorption Via Exceptional Point Modulation in Acoustic Metastructures with Interleaved Resonator Coupling”为题发表在《Advanced Science》上。(孙嘉鹏)

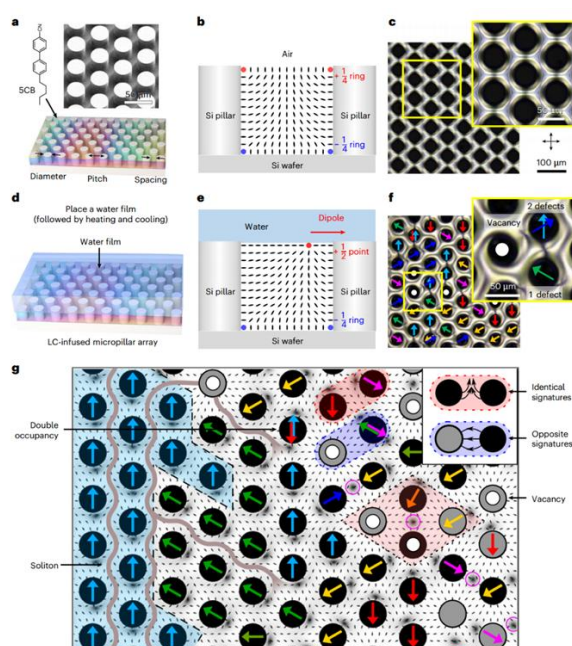


文章链接: <https://doi.org/10.1002/advs.202508951>

5、几何阻挫向列相液晶中的多稳态极性织构

极性有序作为物质体系内电荷、状态或取向不对称分布的基础特性，在自旋系统、光子学和软物质等领域具有重要应用价值。铁电和铁磁材料通过有序排列的偶极矩赋予独特的电磁光学性质，而人造自旋冰等受挫系统则揭示了多极子构型的新物理现象。机械超材料利用拓扑态中的偶极响应实现可定制力学行为，光子自旋晶格则为光偏振调控提供了新途径。向列相液晶兼具晶体有序性与液体流动性，是操纵极性相的理想平台，但传统棒状分子形成的非极性向列相难以自发产生极性对称性。虽然弯曲型液晶分子可呈现本征铁电相，其分子设计限制阻碍了普适性应用；现有通过外场、流控或限制诱导极性织构的方法多受限于一维取向控制，难以实现真正二维可重构的偶极晶格。如何在非极性向列相液晶中构建具有多向交互能力的偶极子阵列，成为该领域亟待解决的关键科学问题。

近日，美国俄亥俄州州立大学的王晓光助理教授和斯洛文尼亚卢布尔雅那大学的 Uroš Tkalec 教授研究团队，提出了一种创新性几何限制策略，通过在六边形排列的硅微柱阵列中灌注棒状向列相液晶，结合水界面引发的锚定转变，成功诱导出二维极性有序。微柱表面经十八烷基二甲基硅烷处理实现垂面排列，初始空气界面形成 $-1/2$ 绕数缺陷环；引入水膜后，界面锚定转变为简并平面锚定，导致缺陷结构演化为绕数为 -1 的表面 boojum 点缺陷，与微柱构成稳定的“拓扑缺陷-微柱”弹性偶极子对。这些偶极子在六边形晶格中呈现六种可能取向，形成类似 XY 自旋模型的偶极晶格，其相互作用受晶格参数调控。该体系表现出显著的多稳态特性，通过水微滴定向滑动可实现对偶极取向的精准操控。研究进一步演示了信息的“写入-擦除-重写”循环，并且利用微悬臂水下操控技术，该工作成功编码了直线、螺旋及笑脸等复杂图案，突破了传统电场/光场调控的局限性。这些发现不仅为理解受限拓扑偶极子动力学提供了新模型，其流变记忆效应更为开发微流控传感器、可编程软材料及仿神经形态器件开辟了新途径。本研究成果发表于《Nature Physics》（刘梦洋）

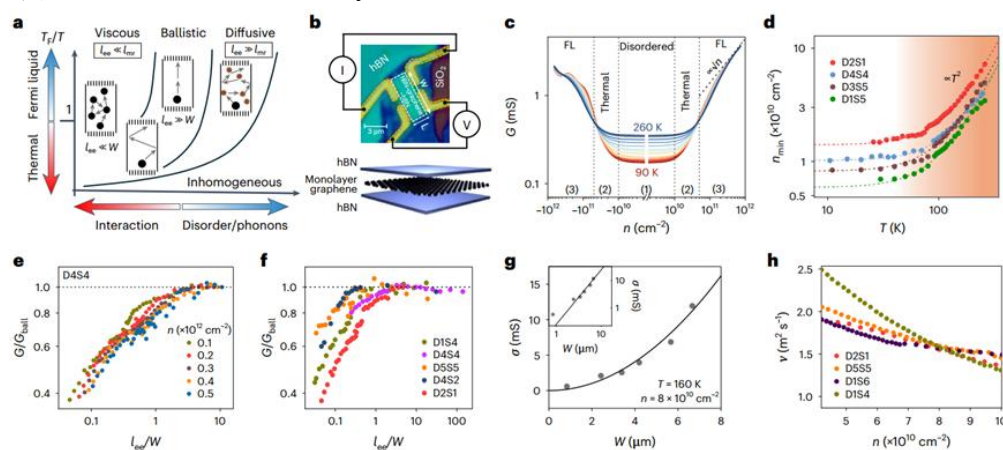


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02966-x>

6、超洁净石墨烯中电荷与热量量子临界流的普适性

石墨烯在接近电中性点（Dirac 点）时，其电子体系不再遵循传统费米液体理论，而可能进入一种由相对论型线性色散和强电子—电子相互作用共同驱动的量子临界态。在这种状态下，电子和空穴像两种带相反电荷的流体相互碰撞、共同流动，形成一种具有黏滞性的“电子流体”，其电荷与热的输运不再由单个粒子的散射主导，而是符合相对论流体力学的规律。这一现象的直接结果之一，是著名的维德曼 - 弗朗兹定律（Wiedemann - Franz law）在该体系中被大幅打破：在普通金属中，热导率与电导率之比是一个普适常数，而在狄拉克流体中，这一比值——洛伦兹数——可能超出经典值数百倍。同时，理论预言在量子临界点附近，体系的直流电导率应表现出普适性，仅由临界点的普适类决定，与具体材料细节无关。然而，过去实验上虽已观测到石墨烯中电子的流体化特征（如超弹道输运、负非局域电阻等），但要在实验证据中明确分离出这种“量子临界普适电导”的精确数值一直存在巨大挑战，主要受限于器件本征电荷不均匀性及杂质散射带来的非普适贡献。如何在超洁净石墨烯中，直接验证量子临界输运的普适行为，并同时刻画其电荷与热流动的耦合规律，一直是该领域的核心难题。

近日，印度科学研究所物理系 Arindam Ghosh 教授团队联合日本国立材料科学研究所等单位，首次在实验中确立了石墨烯量子临界输运的普适电导率，并揭示了电荷与热流在狄拉克流体中的反相关关系。研究团队制备了本征电荷不均匀度极低 [$n_{\min}(0)$ 仅约 $5 - 10 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$] 的超高质量单层石墨烯/hBN 异质结构器件，电子迁移率在低温下可达 $6 \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。他们同步测量了直流电导率 (σ) 与电子热导率 (κ_e)，并利用 Johnson 噪声测温技术精准提取了洛伦兹数 L 的载流子密度与温度依赖。结果显示，在靠近 Dirac 点、热主导输运 ($T_F/T \ll 1$) 的区间内， σ 与 κ_e 呈显著反比关系，且由此反推出的量子临界电导 σ_Q 在不同器件和条件下都收敛到 $(4 \pm 1)e^2/h$ ——这一数值正是理论预言的普适量子临界电导。同时，洛伦兹数在低温接近 Dirac 点时较维德曼 - 弗朗兹常数超出 200 - 300 倍，揭示了强烈的电荷 - 热流解耦特征。在高温极限下，团队还评估了体系的动态黏滞系数与熵密度之比 η/s ，发现最洁净器件可逼近全息理论预言的“最小黏滞”界限 $\hbar/4\pi k_B$ 的四倍以内。这一工作不仅为石墨烯中狄拉克流体的存在与特性提供了首个全实验验证的量子临界输运标尺，也为探索强关联系统、相对论电子流体以及最小黏滞量子液体等前沿课题奠定了坚实的实验基础。相关内容发表于《Nature Physics》上。（张琰炯）

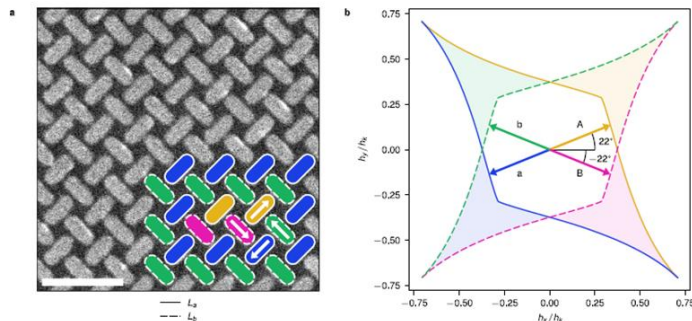


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02972-z>

7、纳米磁超材料中的可控滑动结构

人工自旋冰是一类由纳米磁体在二维晶格中排布而成的超材料，纳米磁体之间通过偶极耦合相互作用，能够表现出长程有序、磁单极子、Dirac 弦及电荷屏蔽等多种新奇的行为。近年来，研究者提出了“星体时钟化”方法，可选择性切换局部纳米磁体，从而实现对系统状态演化的精确操控。人工自旋冰在类脑计算中具有重要潜力，尤其适合作为储备池计算的物理平台。然而，其记忆容量不足，难以同时兼顾信息的传输、存储与变换，限制了进一步应用。元胞自动机的研究表明，能够在体系中保持形态并移动的“滑动子”结构是信息传递与存储的核心单元。如果在人工自旋冰中发现并实现类似的滑动结构，不仅可以弥补现有的计算瓶颈，还能够为高精度操控磁性纹理提供新手段，例如在可重构磁子晶体中开辟自旋波通道，或引导纳米颗粒运动，从而推动磁学与信息处理器件的发展。

近日，挪威科技大学的 Arthur Penty 等人，从元胞自动机中获得灵感，其中信息的传输与存储可以通过“滑动子”这一简单的移动结构来实现。通过进化算法，研究人员在风车型人工自旋冰中发现了一种滑动子，并将其命名为“蛇”。这种“蛇”型滑动子由全局场协议控制，可在约百纳米尺度上实现对磁性纹理的精确操控。研究人员在数值模拟和实验中均展示了该结构，并进一步探究了其运动机理及其对无序的鲁棒性。最后，研究人员演示了“蛇”在计算与存储中的应用潜力。该结构能够将信息的传输、存储与变换统一在同一磁性基底上，从而为超低功耗计算器件的实现开辟新的可能性。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



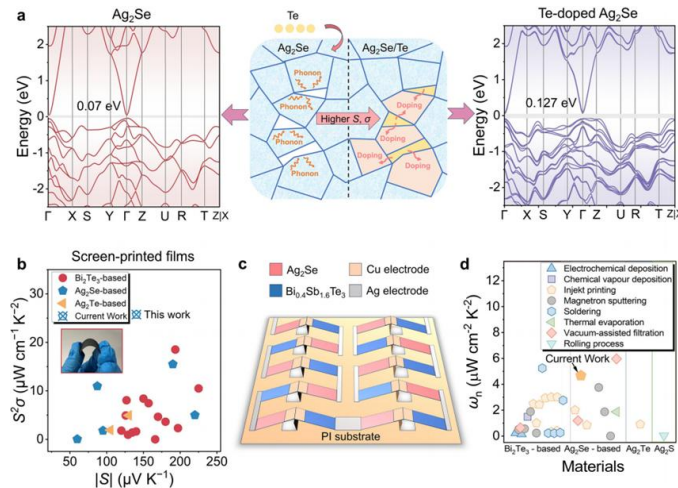
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62515-1>

8、基于 Ag₂Se 的柔性薄膜热电材料在可持续能源 harvesting 和制冷中的应用

在当下全球能源转型与碳中和战略的背景下，如何高效利用废热并推动可穿戴能源器件的发展，已成为材料科学和能源工程领域的前沿热点。热电技术因其能够实现“热-电”直接转换而被寄予厚望，其中柔性热电器件（flexible thermoelectric devices, F-TEDs）尤其受到关注，它们不仅能为智能手表、传感器、可穿戴医疗设备等小型电子产品提供自供能方案，还能在芯片散热与微型制冷领域展现独特优势。然而，制约该领域走向实用化的关键在于材料本身：传统的无机热电材料虽性能优异，却普遍缺乏柔性；而有机材料虽柔韧性好，却难

以获得高热电优值（ZT）。当前商业化的热电器件几乎清一色依赖于 Bi₂Te₃ 体系，但该体系对稀缺元素 Te 的依赖极大推高了成本，也限制了规模化推广。因此，科研人员迫切需要找到一种兼具高性能、低成本和柔性的替代方案。近几年，Ag₂Se 因其优异的电荷迁移率和低晶格热导率被视作最有潜力的 n 型候选材料，更令人兴奋的是，它与 Bi₂Te₃ 相比展现出更好的延展性和韧性，理论上更适合发展柔性热电薄膜。然而，以往通过磁控溅射、共蒸发、真空过滤等方法制备的 Ag₂Se 薄膜普遍存在致密性不足、孔隙率高、性能不稳定等问题，使其 ZT 值难以突破 1，这严重限制了其在柔性能源器件中的应用。因此，如何在保持薄膜柔性的同时，显著提升 Ag₂Se 体系的电输运性能与整体热电效率，成为全球学界亟待解决的科学难题。

近日，澳大利亚昆士兰科技大学陈志刚教授团队联合四川大学孙强研究院团队，提出并实现了一种简便、低成本的柔性 Ag₂Se 薄膜制备路线，并取得了国际领先的突破性成果。研究团队通过“溶剂热合成+丝网印刷+放电等离子烧结”三步工艺，首次在 Ag₂Se 薄膜中引入少量 Te 作为纳米填充与扩散掺杂源，不仅有效提高了薄膜的致密度，还在退火过程中形成了独特的能量过滤效应，从而同时优化了载流子浓度与迁移率。最终所得 Ag₂Se/Te 薄膜在室温下实现了高达 25.7 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ 的功率因子以及 1.06 的 ZT 值，刷新了丝网印刷 Ag₂Se 薄膜的性能纪录。更为关键的是，该薄膜展现出优异的柔性，经 1000 次、弯曲半径 5 mm 的循环弯折后仍能保持 96% 以上的性能。基于这一材料，团队进一步设计了一种独特的三角形 p-n 结柔性热电器件，结合 p 型 Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te₃ 与 n 型 Ag₂Se/Te，实现了在 $\Delta T=20\text{ K}$ 时 4.8 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ 的归一化功率密度，并在无外部散热器的条件下实现了接近 30 K 的最大制冷温差。这项成果不仅为柔性热电材料的发展提供了全新思路，更为未来低成本可穿戴能源采集与片上散热器件的应用奠定了坚实基础。研究成果发表在《Nature Communications》上，（张琰炯）。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62336-2>
(来源: 两江科技评论)

