

超材料前沿研究一周精选



2026年6月1日-2026年6月7日

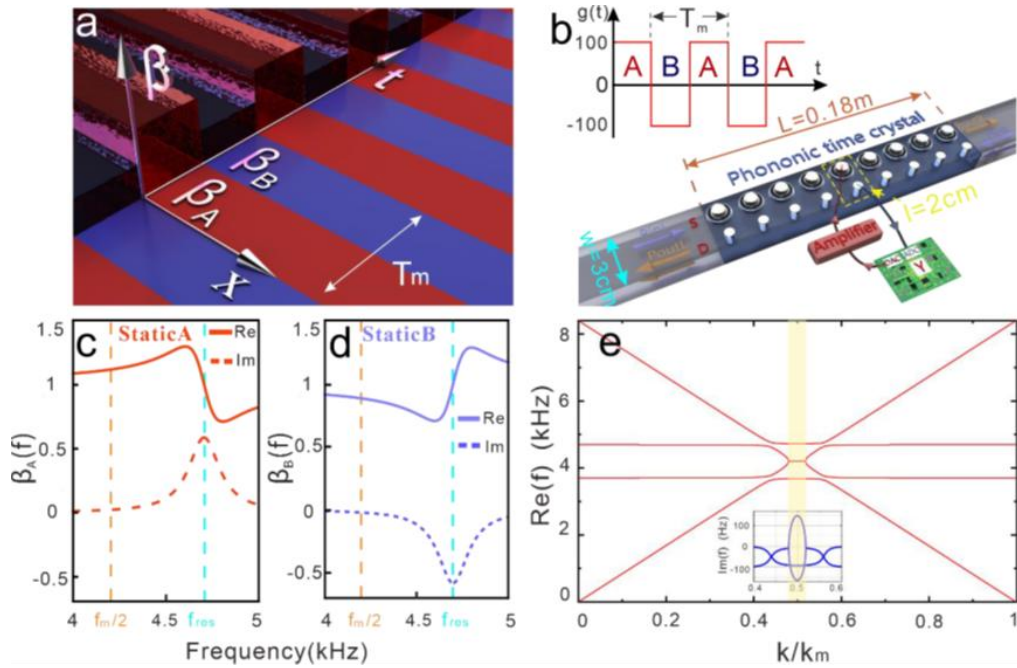
索引:

- 1、色散声子时间晶体中的时间超胞设计与声学放大
- 2、非局域双体相互作用诱导的连续谱中的声学束缚对态
- 3、六方氮化硼用于电子和光子芯片纳米级散热
- 4、电子-晶格凝聚体中电荷的巨栅极响应
- 5、可改善电子和热传输的类木制结构界面
- 6、范德华间隙褶皱工程实现层状热电材料中的热与电荷输运解耦
- 7、中心对称范德瓦尔斯磁体中偶极型斯格明子袋的多样化观测
- 8、仿生流体传感器使水下机器人能够估测运动并检测流动结构

1、色散声子时间晶体中的时间超胞设计与声学放大

Floque 时间晶体是一类新型人工材料，其构成参数在空间上均匀但随时间周期调制，形成离散时间界面，从而产生动量带结构和动量能隙（ k -gap）。与空间晶体的能隙不同， k -gap 支持两种 Floquet 模态，一种随时间指数增长，另一种衰减。理论上，光子时间晶体可实现拓扑时间边界态、时间安德森局域化、电子及偶极子增强辐射及超光速动量孤子等现象。实验上，微波、弹性波、水波及声学中已开发多种时变平台，包括动态传输线、受驱谐振器阵列、时变超表面及数字虚拟化超原子，但在光学和空气声学中实现快速均匀调制仍具挑战，多 k -gap 的可控打开更是难题。

近日，安徽理工大学的吴宏伟教授、南京大学彭茹雯教授和王牧教授、埃克塞特大学的 Jensen Li 教授团队合作，通过将可编程、时变谐振超原子嵌入一维声波导，实验实现了声子时间晶体。通过对超原子谐振强度进行时间调制，观察到声波透射显著增强，透射率最高达 13.4，嵌入单极源的辐射增强 Purcell 因子达 30。在此平台基础上，设计了时间超胞，实现动量带折叠并打开多个 k -gap。实验表明，超胞声子时间晶体不仅保持常规 k -gap（调制频率一半处），还产生由带折叠引起的新 k -gap（调制频率四分之一处）。精心设计的时变超材料为定制动态响应提供了高度灵活性，有助于调控动量带结构并丰富声波传播物理。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



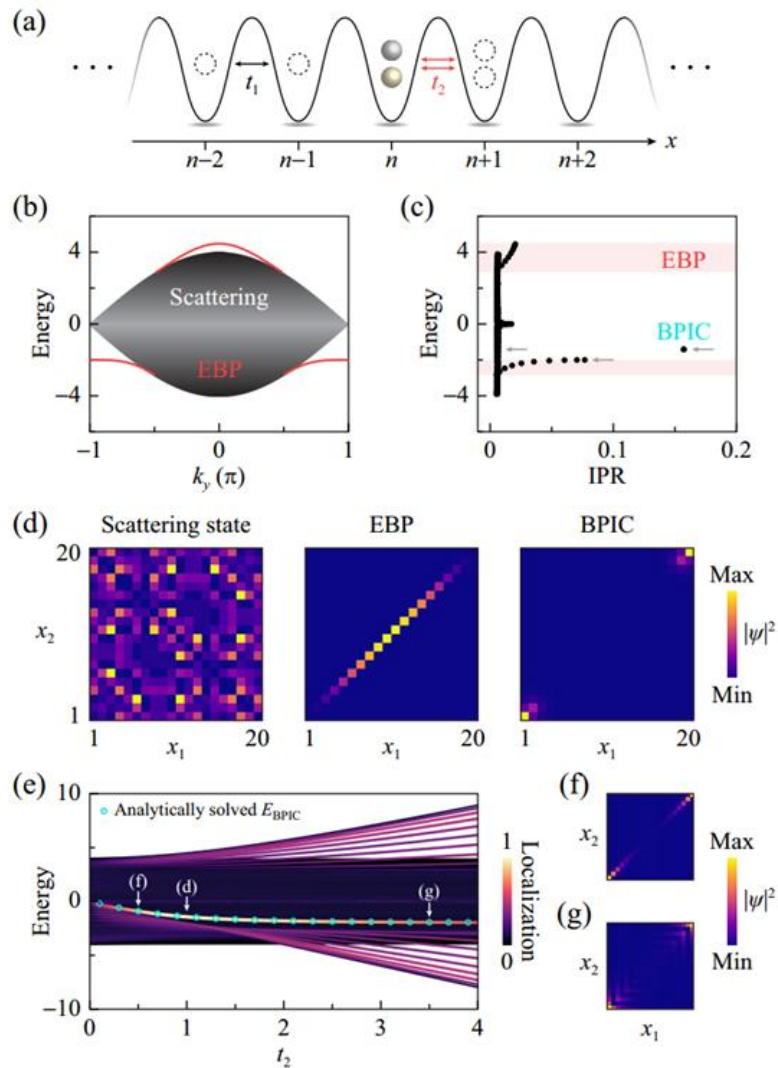
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-73459-5>

2、非局域双体相互作用诱导的连续谱中的声学束缚对态

连续谱中的束缚态（BIC）是一类本征能量嵌入连续谱却仍保持空间局域的特殊状态，因其兼具高品质因子、强场局域和低辐射损耗等特性，在激光、传感、滤波等领域展现出广阔应用前景。长期以来，BIC 研究主要集中于单粒子体系，而将其推广至存在关联效应的多体体系则成为近年来的重要研究方向。多体相互作用能够催生丰富的新奇量子现象，因此探索多体 BIC 不仅有助于拓展人们对局域态形成机制的认识，也为理解复杂关联体系提供了新的视角。然而，已有研究大多依赖局域相互作用、杂质势或时空调制等特殊条件来实现多体 BIC，其实验构筑和调控过程较为复杂。如何利用更加普适的非局域相互作用实现多体 BIC，并建立可实验验证的物理平台，仍然是该领域亟待解决的重要问题。

近日，武汉大学的刘正猷院士、柯满竹教授、邓伟胤教授研究团队提出了一种包含双体跃迁过程的扩展 Bose-Hubbard 模型，并理论预测了一类新型边界局域化双粒子态，即连续谱中的束缚对态（BPIC）。与传统束缚态不同，该状态对应两个粒子以束缚对形式共同局域于体系边界，而其本征能量却嵌入散射连续谱之中。理论分析表明，这种状态完全由均匀双体跃迁诱导产生，无需局域相互作用、杂质势或时空调制等额外条件。为实现实验验证，研究进一步利用声子晶体构建二维经典波平台，通过高维映射将双粒子关联动力学转化为声波传播问题，实现了束缚对态和连续谱中束缚对态的直接观测。实验结果与理论预测及数值模拟高度一致，证实了该新型多体 BIC 的存在。该工作建立了 BIC 研究与关联多体物理之间的新联系，展示了非局域相互作用在产生特殊局域态方面的重要作用，也为利用经典波平台研究复杂量子多体问题以及开发高品质因子声学器件提供了新的思路。

该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



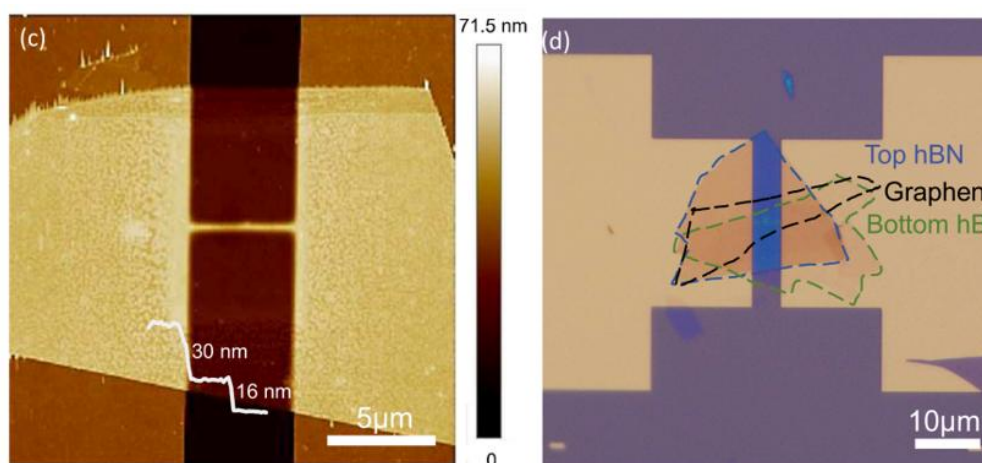
文章链接: <https://doi.org/10.1103/46kx-13jm>

3、六方氮化硼用于电子和光子芯片纳米级散热

随着人工智能、大数据和高速通信技术的快速发展,电子芯片和光子芯片正朝着更高集成度、更高功率密度和更小尺寸方向不断演进。然而,器件尺寸的持续缩小使局域热积累问题日益突出。在实际芯片中,热失效往往并非发生于整个器件,而是起源于亚微米甚至纳米尺度的“热点(hotspot)”区域。过高的局域温度不仅会导致器件性能下降,还会加速材料老化并引发失效,因此高效散热已成为制约下一代电子与光电子器件发展的关键瓶颈。近年来,二维材料因其优异的热学性能受到广泛关注。其中,六方氮化硼(hBN)兼具高达数百 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的面内热导率、优异的电绝缘性以及良好的光学透明性,被认为是极具潜力的新型热扩散材料。尽管已有研究证明 hBN 能够提升大面积器件的整体散热能力,但其对于纳米尺度局域热点的实际散热效率仍缺乏直接实验验证,特别是在电子互连和纳米光电子器件等典型应用场景中的作用机制尚不明确。因此,探索 hBN 在纳米热点散热中的作用规律,对于突破芯片热管理瓶颈、推动高性能电子与光电子器件发展具有重要意义。

近日，荷兰埃因霍温理工大学 Klaas-Jan Tielrooij 课题组利用高质量单晶 hBN 薄片及 hBN/石墨烯/hBN 异质结构，系统研究了其在电子芯片和光子芯片纳米热点散热中的作用机制。研究人员首先以宽度仅约 30 nm 的金纳米互连线为模型电子器件，通过无聚合物污染的“hot pick-up”转移技术构筑 hBN 散热层，并利用器件自身电阻变化实现局域测温。实验发现，引入 hBN 后，纳米金线的温升速率降低约 40%，击穿电流密度提高约 30%，显著增强了器件承受高功率工作的能力。数值模拟进一步表明，hBN 对于尺寸低于数百纳米的局域热点具有最佳散热效果，其高面内热导率能够有效将热量沿二维平面快速扩散。随后，研究团队将该策略拓展至六方 SiGe 纳米线光电子器件。通过微区光致发光谱提取载流子温度，发现 hBN 覆盖后纳米线工作温度大幅下降：在相同光激发条件下，裸纳米线温度可升高至约 700 K，而被 hBN 完全包覆后温度始终保持在 150 K 以下，降温幅度高达 500 K。研究表明，hBN 不仅能够发挥优异的横向热扩散能力，还能通过其柔性贴附特性显著提升粗糙纳米结构界面的热边界导热能力，使界面热导提高最高约 5 倍。该工作首次系统揭示了 hBN 在纳米尺度电子与光电子器件中的局域散热机制，为下一代高功率密度芯片、片上光源以及集成光电子器件的精准热管理提供了新的解决方案，也为二维材料在先进热管理领域的应用开辟了新的方向。

研究成果发表在《Nano Letter》上（张琰炯）。



文章链接：<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c05376>

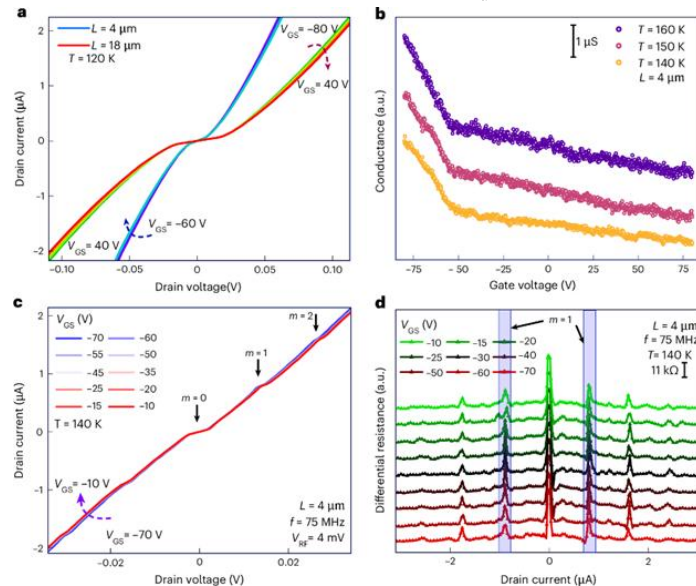
4、电子-晶格凝聚体中电荷的巨栅极响应

随着传统 CMOS 器件不断向低功耗和高集成度方向发展，如何突破经典场效应晶体管（FET）的几何电容极限，已成为新型电子学研究的重要课题。在常规半导体器件中，栅极电场能够调控的载流子数量受到几何电容的严格限制，因此器件性能提升越来越依赖于复杂的结构设计和材料优化。近年来，人们逐渐将目光转向关联电子体系，希望借助电子之间的集体行为实现远超传统单粒子模型预期的电场响应。电荷密度波（charge density wave, CDW）作为一种典型的电子-晶格凝聚态，由电子密度周期性调制与晶格畸变共同形成，兼具能隙、凝聚态和集体输运等特征，与超导体在物理机制上存在诸多相似之处。由于许多 CDW 材料能够在接近室温甚至高于室温的条件下稳定存在，因此被认为是构筑新型低功耗电子器件的重要候选体系。然而，尽管已有研究实现了对 CDW 相变温度、阈值电场

以及相结构的电场调控,外加栅压是否能够直接改变 CDW 凝聚态本身所包含的电子数量,始终缺乏明确实验证据。

近日,加州大学洛杉矶分校(UCLA)的 Alexander A. Balandin 教授与加州大学河滨分校 Roger K. Lake 教授团队首次直接证明栅极电场能够显著调控电荷密度波凝聚态中的电子数量,并实现远超传统电容理论预测的巨大电荷响应。研究团队选择经典准一维 CDW 材料 α -TaS₃ 作为研究对象,制备了背栅短沟道场效应器件,并利用射频激励下产生的 Shapiro steps 作为探针,定量测量了 CDW 凝聚态中的载流子浓度。实验结果表明,当栅压由 -75 V 调节至 -25 V 时,CDW 凝聚态电子密度变化量达到 $6.17 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 对应的面电荷调制规模约为 10^{14} cm^{-2} , 远超传统半导体场效应器件能够实现的调控范围。若将这种电荷调制效应等效为一种有效电容,其大小比器件几何电容高出 37-112 倍。研究团队建立了相关电子-晶格凝聚态的理论模型来解释这一现象:外加电场首先引起化学势的微小变化,这种变化进一步影响费米能级附近的电子态密度以及电子-声子耦合强度,从而改变 CDW 能隙和序参量大小。由于 CDW 本质上是一种集体凝聚态,微小的化学势变化可导致大量电子重新分配到凝聚态中,从而产生远超普通载流子积累效应的巨大电荷响应。这种机制不同于传统场效应晶体管通过形成积累层来增加电子数量,而是直接实现了对凝聚态本身的重构与调控。该工作首次实现了对电荷密度波凝聚态电子数量的直接电场调控,证明关联电子体系中的集体自由度能够突破传统几何电容所决定的场效应极限。研究建立了电子-晶格凝聚态量子电容的新物理图像,为理解关联电子材料中的电场调控机制提供了重要实验依据,也为发展基于 CDW 材料的新型低功耗逻辑器件、存储器和振荡器开辟了新的研究方向。

相关内容发表于《Nature Electronics》上。(侯玥盈)



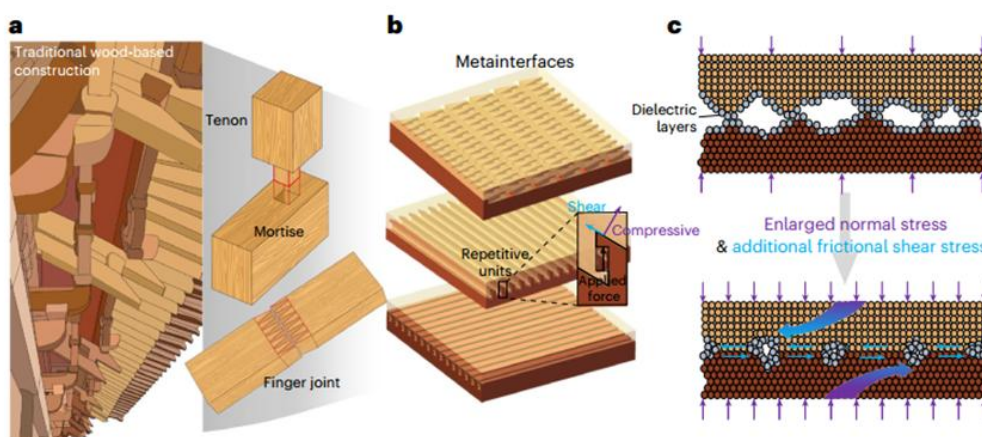
文章链接: <https://www.nature.com/articles/s41928-026-01636-x>

5、可改善电子和热传输的类木制结构界面

随着人工智能、高性能计算、电动汽车和先进通信技术的快速发展,电子器件的功率密度持续攀升,界面传输效率已成为制约系统性能提升的重要瓶颈。由于材料表面不可避免地存在微纳尺度粗糙度和空气间隙,真实接触面积通常远小于名

义接触面积，导致界面电阻和热阻显著增加。这不仅会造成额外的焦耳热损耗，还会引发局部过热、降低器件可靠性，甚至带来安全隐患。长期以来，研究人员主要通过提高接触压力、优化界面材料或开发高性能导热介质来改善界面传输性能，但这些方法往往受到材料脆性、加工成本以及可靠性等因素限制。值得注意的是，人类数千年前创造的榫卯结构和指接结构等传统木工连接技术，通过特殊几何设计实现了载荷均匀分布和高效力学连接，为现代界面工程提供了新的启发。如果能够将传统木工结构中的力学设计理念引入电子器件界面，有望从根本上改善电子和声子的跨界面输运过程，为下一代高功率电子器件和先进热管理技术开辟新的发展方向。

近日，东南大学郝梦龙教授/钟文琪研究员联合加利福尼亚大学伯克利分校 Chris Dames 等组成的研究团队创新性地提出“木工启发超界面(metainterface)”概念，将传统榫卯和指接结构引入电子与热管理界面设计之中，通过几何结构诱导接触力放大和界面应力由压缩向剪切转化，实现电子与热量跨界面的高效传输。在电连接方面，团队设计了燕尾榫、钥匙榫和挂钩榫等多种榫卯式电连接器。其中性能最佳的燕尾榫结构电接触电阻仅为 $8.6 \mu\Omega$ ，仅为商业电连接器的约三分之一，并接近永久焊接接头水平；在 500 A 大电流模拟电动汽车超快充实验中，其最高温度仅为 62°C ，显著低于商业连接器的 $80 - 90^\circ\text{C}$ 水平，同时经过 5000 次插拔循环后性能仍保持稳定。在热管理方面，研究团队借鉴木工指接结构设计出微米尺度“指接热界面”，通过机械加工即可在金属表面构筑周期性指状阵列结构。实验表明，该结构在经历热循环后界面热阻可降低至 $2.3 \text{ K} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ，达到目前先进导热界面材料的领先水平。当应用于大功率 LED 芯片散热时，相比传统导热垫、导热硅脂和石墨导热纸等方案，可使芯片工作温度进一步降低 44°C 。进一步的显微结构表征和数值模拟表明，界面剪切应力能够有效破坏表面氧化层，促进真实接触面积增加，并诱导金属间局部“冷焊接”现象形成，从而显著降低电子和声子的界面散射。该研究首次系统揭示了传统木工结构背后的力学原理在现代电子与热管理领域的应用潜力，为高性能电子封装、电动汽车快充系统以及先进散热技术的发展提供了全新的界面工程设计思路。相关内容发表于《Nature Electronics》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41928-026-01622-3>

6、范德华间隙褶皱工程实现层状热电材料中的热与电荷输运解耦

在热电材料领域，实现高效的热电转换是缓解能源危机与推动固态制冷技术发展的关键。材料的转换效率由无量纲优值

$$zT = S^2 \sigma T / (\kappa_e + \kappa_l)$$

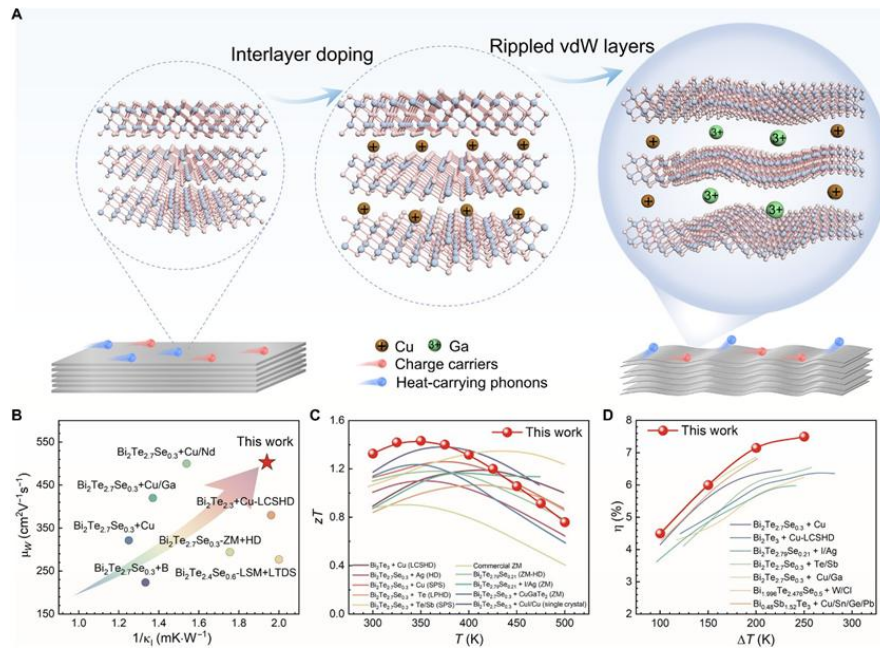
决定，其中高电导率 σ 与高塞贝克系数 S 要求材料具有类似晶体的优良导电

性，而低热导率（包括电子热导率 κ_e 和晶格热导率 κ_l ）则希望其像玻璃一样隔热。然而，这些参数之间通过载流子浓度和能带结构相互关联，使得“电

子晶体-声子玻璃”这一理想行为极难实现。特别是晶格热导率 κ_l 的降低往往依赖于引入大量缺陷或纳米结构，导致载流子迁移率降低，从而牺牲电输运性能。因此，如何在不损害电导率的前提下有效抑制声子传输，成为热电材料研究中的一个核心难题。Bi₂Te₃ 是室温附近最重要的热电材料，其晶体结构由沿 c 轴方向通过范德华力堆叠的五元层构成。这种高度各向异性的层状结构赋予了材料独特的输运性质，但也使得热与电的解耦更加困难。通过纳米结构工程， p 型 Bi₂Te₃ 的峰值 zT 已提升至约 1.4，但同样的策略在 n 型 Bi₂Te₃ 中收效甚微。原因在于 n 型材料的电子输运具有更强的各向异性，缺陷和晶界对电子的散射更为显著，导致其热电性能长期落后于 p 型对应物，成为制约高性能热电模块发展的瓶颈。因此，开发一种不依赖强缺陷散射、能够选择性抑制声子而不影响电子输运的新策略，对于提升 n 型碲化铋的性能具有重要的科学意义与应用价值。

近日，中科院宁波材料所刘国强研究员、张强副研究员、蒋俊研究员与燕山大学梁波教授合作，提出了一种由非均匀局域应变介导的范德华间隙工程策略，通过 Cu 和 Ga 的选择性共掺杂，在 n 型 Bi₂Te₃ 中成功诱导了可控的晶格波纹化，实现了热与电运输的有效解耦。研究团队在 Bi₂Te₃ 的范德华间隙中选择性嵌入 Cu⁺，通过长程库仑吸引稳定层状堆叠并略微扩大 c 轴晶格；进一步引入微量 Ga³⁺ 造成局域电荷不平衡，产生面外应力，驱使五元层发生类似“波纹”或“褶皱”的结构畸变。褶皱的幅度远小于电子平均自由程，对电子输运几乎不产生额外散射；但晶格褶皱破坏了面内平移对称性，显著重整化声子色散，降低了声子群速度，并增强了晶格非谐效应。与此同时， c 轴晶格常数的增大使导带底沿 kz 方向能带变平，态有效质量从 1.74 m_0 提升至 2.25 m_0 ，从而在不降低电导率的前提下提高了塞贝克系数。基于此，优化组分 Bi_{1.997}Ga_{0.003}Te_{2.7}Se_{0.3+0.08 wt% CuI} 在 350 K 时峰值 zT 达到 1.43，为目前 n 型 Bi₂Te₃ 体系的最高报道值之一。由该材料构筑的 17 对 p/n 热电模块在 250 K 温差下实现 7.5% 的转换效率，展示出 n 型 Bi₂Te₃ 热电体系的优异器件性能。该工作首次将“晶格褶皱工程”从二维薄膜衬底诱导扩展到了块体层状材料中，通过层间应力设计实现了声子与电子的协同优化，并揭示了声子重整化的微观机制。该策略同时其他层状热电材料的协同优化开辟了通用设计思路，有望推动低品位废热回收与固态制冷技术的实际应用。

相关内容发表于《Science Advance》上。（侯玥盈）



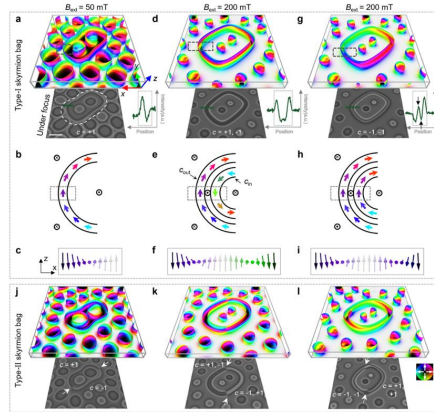
文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aef9733>

7、中心对称范德瓦尔斯磁体中偶极型斯格明子袋的多样化观测

磁性斯格明子因其拓扑保护特性、独特的自旋动力学行为以及在自旋电子学和信息存储中的应用前景而备受关注。近年来，研究兴趣逐渐从传统斯格明子扩展至具有更复杂内部结构的拓扑磁孤子，其中斯格明子袋因能够容纳多个内部斯格明子并携带可调拓扑荷而成为重要研究对象。然而，目前实验实现的斯格明子袋主要集中于由 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用稳定的非中心对称体系，其形态种类和调控自由度仍较为有限。相比之下，中心对称磁体中不存在固定手性约束，偶极相互作用与磁各向异性的竞争有望产生更加丰富的拓扑磁结构。但迄今为止，这类偶极型斯格明子袋的实验研究仍十分有限，其形成机制、稳定条件以及可能存在的复杂形态尚缺乏系统探索。

近日，南开大学的付学文教授、华南理工大学的郑风珊教授和华南师范大学的侯志鹏研究员研究团队，以中心对称二维范德瓦耳斯磁体 $\text{Cr}_{1.6}\text{Ti}_{0.03}\text{Te}_2$ 为平台，结合洛伦兹透射电子显微镜观测与微磁学模拟，实验上构建并系统表征了一系列偶极型斯格明子袋。结果发现，这些结构不仅具有不同的环数和旋转手性，还包含对应的拓扑平凡态以及由多个环路和多个内部斯格明子组成的复杂复合构型。进一步研究表明，不同斯格明子袋的稳定性、磁场响应及湮灭过程均由偶极相互作用与垂直磁各向异性之间的竞争决定，而中心对称体系所具有的手性自由度则赋予其远超传统 DMI 体系的结构丰富性。该工作显著拓展了实验可获得的斯格明子袋家族，为复杂拓扑磁结构的静态与动力学研究提供了新的实验基础，也为未来多态、自适应自旋电子器件的发展提供了新的设计思路。

该研究发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）



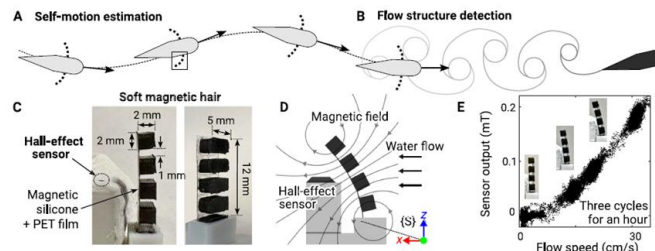
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.73589>

8、仿生流体传感器使水下机器人能够估测运动并检测流动结构

海洋生物利用水动力传感器感知水流，通过柔软突出结构的偏转和振动，将流动信息转换为电信号。例如，鱼类通过毛状胶状结构感知速度和压力梯度，海豹用长须追踪周围目标。这种感知使它们能够在低光或远距离环境下监测自身运动和环境流动，支持鱼群游动、自组织波动、沿涡旋校准身体、追踪猎物等行为。相比之下，水下自主航行器（AUV）现有技术感知能力不足，声学多普勒速度计、声学多普勒流速剖面仪体积大、价格高、近表面测量受限；粒子图像测速和视觉、压力、电磁传感易受环境影响。仿生传感启发研究者开发小型轻便、低成本的传感器。两类仿生流感测方法包括：一是模仿生物压力感受器阵列，通过压力分布估测速度，但需复杂数据处理；二是模仿生物机械感受器，直接测量流速，同时捕捉流动波动，可获取环境额外信息。已有研究优化了传感器的灵敏度、带宽、模块化和抗噪性，并开始用于水下机器人运动估测。然而，要达到生物级感知仍面临挑战：传感器需设计简单、低成本；能区分运动方向，少量传感器即可跟踪复杂运动；机械特性应允许同时感知自身运动和外部流动振荡。

近日，加利福尼亚大学圣迭戈分校的 Myungsun Park 团队，为应对这些挑战，提出了一种小型轻量的软磁毛发流动传感器，可通过其机械偏转测量水流的速度、方向和振荡。作者在水下机器人上测试了这些传感器的能力，用于估测机器人前向、横向（角向）速度及姿态。当机器人游动时，传感器还能够通过识别特征频率检测上游物体的尾迹。本文所展示的仿生水动力感测方法，可实现自适应且高效的水下探测。

相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aed2847>

（来源：两江科技评论）