

超材料前沿研究一周精选



2026年5月18日-2026年5月24日

索引:

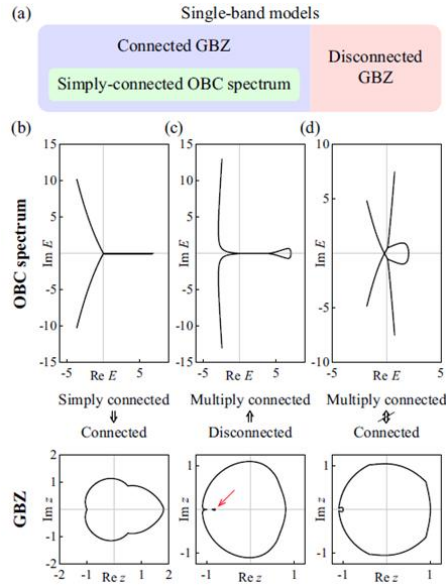
- 1、一维模型中广义布里渊区的拓扑
- 2、室温下超薄半导体中可控流体的热弹性热传输
- 3、KNdSe₂ 中晶体电场激发显著声子手性
- 4、三维自由形状热隐身斗篷

1、一维模型中广义布里渊区的拓扑

能带结构是理解周期性系统行为的重要工具，而非厄米效应的引入极大拓展了其研究范围。对于非厄米能带结构，广义布里渊区（generalized Brillouin zone, GBZ）取代了传统布里渊区（Brillouin zone, BZ），并为系统中可存在的模式提供了基本描述。对于单带模型，人们通常假设 GBZ 在拓扑性质上类似于传统 BZ，即它是在复数 z 平面中围绕原点的一条单一闭合环路。此外，已有研究进一步猜想，对于单带模型，GBZ 始终保持连通。

近日，斯坦福大学范汕洄教授研究团队，展示了一般非厄米一维模型中广义布里渊区（GBZ）所具有的丰富拓扑特征。作者证明并讨论了一组充分条件，用于保证单带模型中 GBZ 的连通性。当这些条件被破坏时，可以显式构造出非连通的 GBZ；在多带模型中，其连通分支的数量甚至可以超过能带数目。作者进一步利用这种新颖的 GBZ 拓扑，展示了一种反直觉效应：对于具有子晶格对称性的双带开边界谱，其线隙可以闭合，而点隙拓扑却保持不变。该结果挑战了目前对非厄米系统中能带和能隙的理解，并强调有必要进一步研究与 GBZ 相关的拓扑效应，包括拓扑不变量和开边界编织等问题。

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



文章链接: <https://doi.org/10.1103/7cnd-r7q4>

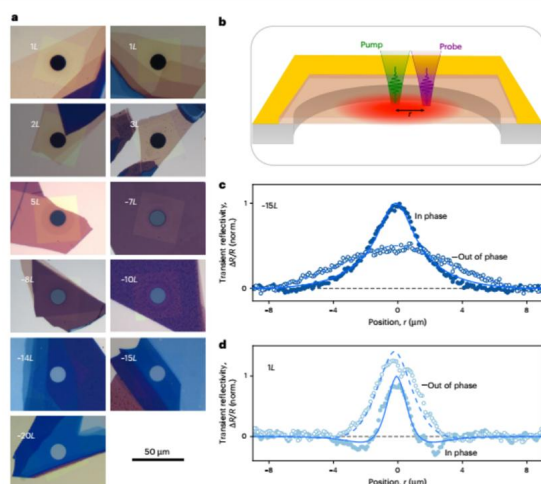
2、室温下超薄半导体中可控流体的热弹性热传输

随着人工智能、高性能芯片以及柔性电子技术的快速发展，器件尺寸不断缩小、功耗持续攀升，如何高效调控热运输已成为制约新一代电子器件性能与稳定性的关键科学问题。传统热传导理论主要基于傅里叶扩散模型，即热量总是从高温区域向低温区域扩散。然而，在低维半导体材料中，由于声子平均自由程显著增加、非局域输运增强，热输运可能偏离经典扩散规律，呈现出更复杂的非扩散行为。其中，声子流体力学输运（hydrodynamic heat transport）因涉及“第二声”等特殊现象，近年来备受关注，但相关实验通常需要极低温条件，室温下的直接观测极为困难。与此同时，热输运与晶格应变之间的耦合作用——即热弹性效应（thermoelastic effect）——长期以来也缺乏实验验证，尤其是纳米尺度非均匀应变场诱导的“反常热流”现象，更停留在理论预测阶段。因此，如何在室温条件下实现对非扩散热输运的主动调控，并揭示热流、声子与应变之间的耦合机制，已成为凝聚态物理与热管理领域的重要前沿方向。

近日，西班牙加泰罗尼亚纳米科学与纳米技术研究所 K. J. Tielrooij 课题组联合巴塞罗那自治大学、加拿大麦吉尔大学等团队，在超薄 MoSe₂ 与 MoS₂ 半导体中，首次在室温条件下实验观测到一种全新的“流体-热弹性耦合”热运输机制（hydro-thermoelastic transport）。研究人员利用具有纳米级空间分辨率的时空泵浦-探测热反射技术，对悬空二维半导体中的热扩散过程进行了实时成像，发现当材料厚度降低至单层极限后，热扩散行为会显著偏离经典傅里叶定律：热量传播范围明显收缩，有效热扩散率甚至下降近一个数量级。进一步理论分析表明，这种异常现象来源于两种机制的协同作用：一方面，二维材料中的声子呈现类似流体的黏滞输运行为，使热流扩散受阻；另一方面，超快脉冲加热会在晶格中产生非均匀应变场，从而诱导一种“由冷区流向热区”的反常热弹性热流。研究团队建立了基于第一性原理参数的流体-热弹性耦合模型，并成功复现实验结果。该工作不仅首次在室温下验证了二维半导体中的声子流体力学输运，还首次实验观测到纳米尺度非均匀应变诱导的反常热弹性热流，为理解低维材料中的非

平衡热输运提供了全新视角。研究还表明，这种热输运行为可以通过材料厚度以及连续/脉冲加热方式主动调控，为未来二维电子器件、光电子器件以及热电系统中的热管理与热流操控提供了新的设计思路。

相关内容发表于《Nature Physics》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-026-03297-1>

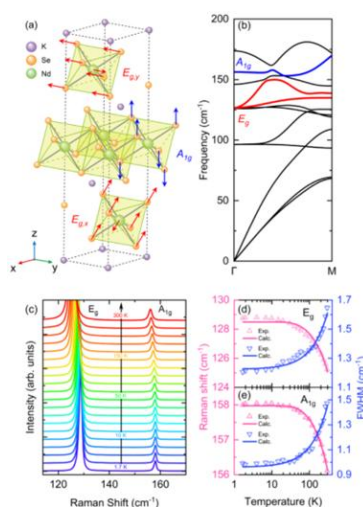
3、KNdSe₂ 中晶体电场激发显著声子手性

近年来，手性声子（chiral phonon）因其携带角动量、能够与电子自旋及磁性自由度耦合，而成为凝聚态物理和量子材料研究中的前沿热点。传统意义上的手性声子通常来源于晶格本征的拓扑结构或反演对称性破缺，例如石英、二维过渡金属硫族化物等体系。然而，这类体系中的声子磁矩往往极其微弱，其本质受限于离子的巨大质量，因此实验中难以实现显著的手性响应。近年来，研究人员逐渐意识到，如果能够通过电子自由度向晶格高效转移角动量，便有望突破传统机制的限制，实现“强手性声子”。其中，稀土材料中的晶体电场（CEF）激发由于同时具备局域性、合适的能量尺度以及明确的角动量跃迁规则，被认为是激活强手性声子的理想候选机制。但长期以来，这种由 CEF 激发驱动的声子手性仍停留在理论预测阶段，缺乏直接实验证据。如何在真实材料中实现强耦合、观测可分辨的手性声子，并揭示电子角动量向晶格转移的微观机制，已成为当前磁振子、拓扑声子以及量子信息领域的重要研究方向。

近日，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心张清明课题组联合兰州大学等团队，选择三角晶格稀土化合物 KNdSe₂ 作为研究对象，首次实验观测到由晶体电场激发“激活”的显著手性声子现象。研究人员利用高分辨圆偏振磁场拉曼光谱，在外加磁场条件下观测到材料中 E_g 双简并声子模式发生明显分裂，并呈现出严格的左右圆偏振选择定则，这是手性声子的直接证据。实验结果显示，该声子模式在 9 T 磁场下分裂达到约 3 cm⁻¹，对应有效声子磁矩约 0.4 μ_B，远大于传统拓扑手性晶体中的声子响应。进一步理论分析表明，这一现象来源于 Nd³⁺ 离子的晶体电场激发与 E_g 声子模式之间的强耦合：外加磁场打破时间反演对称性后，不同手性的声子会感受到不等效的电子环境，从而导致左右手性声子能量分裂。研究团队通过建立 CEF-声子耦合微观模型，并结合 Dyson 方程求解，成功定量复现实验中的磁场依赖与温度依赖行为。该工作不仅首次证实了稀土硫族化物中 CEF 激发可以高效激活强手性声子，也揭示了电子角动量向晶

格转移的全新机制，为研究磁-声耦合、手性准粒子以及量子声子调控提供了重要平台。

相关内容发表于《Physical Review Letters》上。（张琰炯）



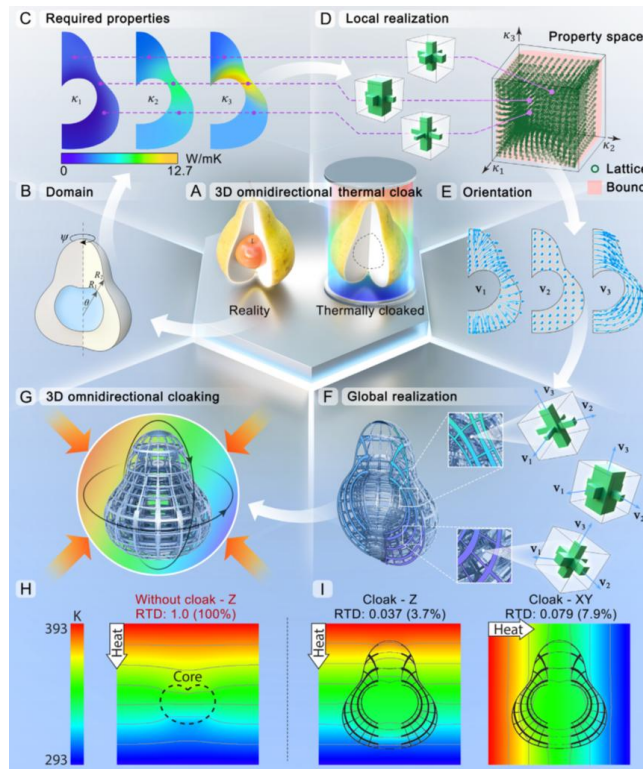
文章链接: <https://doi.org/10.1103/frn1-f3t9>

4、三维自由形状热隐身斗篷

自然界中，乌贼、章鱼等生物常通过伪装躲避捕食者或迷惑猎物，受此启发，物理学家发展了变换理论，预言可实现从任意方向隐藏三维物体的热隐身结构。然而，这类热隐身需要空间渐变且高度各向异性的热导率，工程实现极具挑战。现有热超材料器件大多仍局限于二维规则形状，三维研究多停留在理论和数值模拟，或仅实现球形、椭球等简单几何结构。对于复杂自由形状的三维热隐身，如何构建既满足所需各向异性导热性能，又具备良好连通性、功能稳定性和可制造性的三维微结构，仍是长期难题。尤其在三维中，传统逆向设计方法计算成本高、结构复杂且难以保证整体连通性，因此亟需新的设计与实现策略。

近日，伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的张晓佳教授团队，在三维空间中物理实现了变换理论，构建了具有任意内外几何形状的三维全向热隐身结构。作者利用变换后三维热导率的特殊谱性质，发展了一种新的三维去均匀化方法，并结合结构简单、功能稳定的三维晶格微结构，实现了空间渐变和高度各向异性的等效热导率。所制备的热隐身结构不仅形状复杂、结构简洁，而且具有良好的整体连通性，可在多方向热探测下隐藏不同热导率的三维物体。该结构还能通过金属 3D 打印和模具浇注高效制造，并在实验中验证了三维全向热隐身效果。进一步地，作者将三维去均匀化方法与球谐函数和横向各向同性正则化相结合，实现了人脸等超复杂几何形状的三维热隐身，为三维热超材料及其他导电系统的设计提供了可行路径。

相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-73167-0>
 (来源: 两江科技评论)