

超材料前沿研究一周精选



2026年3月9日-2026年3月15日

索引:

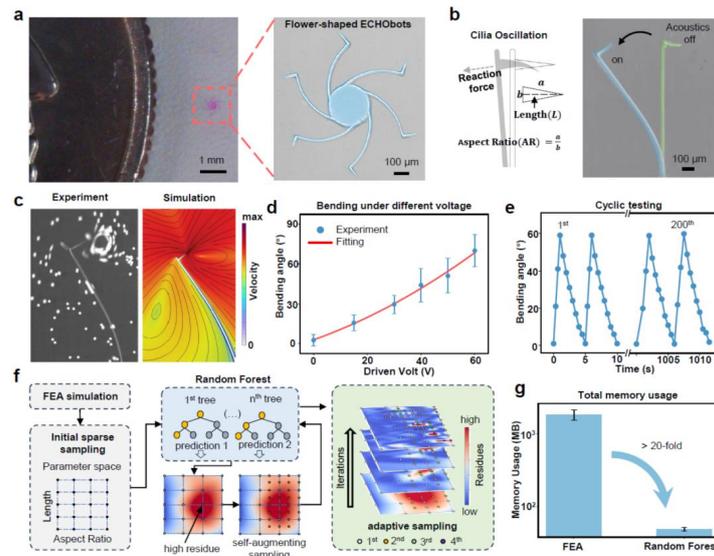
- 1、机器学习驱动的工程化纤毛设计赋予声学微机器人混合操作能力
- 2、表面声波诱导的迷你能带生成
- 3、仿生蜂窝工程克服气凝胶包覆相变复合材料的机械-热平衡
- 4、通过直写式打印构筑柱廊结构聚二甲基硅氧烷热界面材料的优化热传导通道
- 5、高阶斯格明子与反斯格明子的磁力显微镜特征
- 6、用于自旋逻辑应用的全 VDW 异质结构中通过拓扑对称性破缺实现的极性可调无场室温自旋轨道转矩切换
- 7、非阿贝尔 Hatano - Nelson 模型在电路中的实现
- 8、零增益零损耗超材料中的非厄米非布洛赫效应

1、机器学习驱动的工程化纤毛设计赋予声学微机器人混合操作能力

近年来，微机器人在靶向治疗、微创手术、环境修复、微装配和微尺度检测等领域取得显著进展，尤其在生物医学中展现出传统手术难以实现的高精度干预能力。然而，复杂动态环境下稳定而精准的控制仍是其走向实际应用的核心瓶颈。现有光热、磁驱动、化学驱动和生物混合驱动等方式各具优势，但分别受限于组织穿透浅、磁场衰减、环境依赖强及控制困难等问题。声驱动微机器人因可利用声振动与声流在受限流体环境中实现精确操控而备受关注，但现有声学微机器人多局限于简单结构以及线性或旋转运动，难以实现复杂形变与功能重构。尽管机器学习已开始用于声学微机器人的导航与群体控制，但在结构与精细形变调控方面仍研究不足，因此亟需结合 AI 与纤毛仿生结构以加速高维设计优化并提升系统功能多样性。

近日，杜克大学的 Tony Jun Huang 团队，提出了一类新型声学微机器人——ECHObots，通过几何调谐纤毛结构与共振诱导力耦合，在单一设计中实现定向弯曲、可控旋转以及复杂形态变换，可完成弯折、旋转、开启和闭合等多种操作。其设计引入自增强机器学习与有限元分析融合框架，可在高维几何空间中快速预测和优化共振特性，相比传统有限元迭代显著降低计算时间与内存消耗，同时保持较高精度。进一步结合柔顺机构设计后，ECHObots 能够实现可逆且多样的形态重构，如软体机械臂开合和多段驱动，从而突破传统声学微机器人仅能直线或旋转运动的限制，构建出一个可编程、可扩展、适用于生物医学、微制造及环境监测等多场景的多功能微驱动平台。相关工作发表在《Nature Communications》

上。(刘帅)

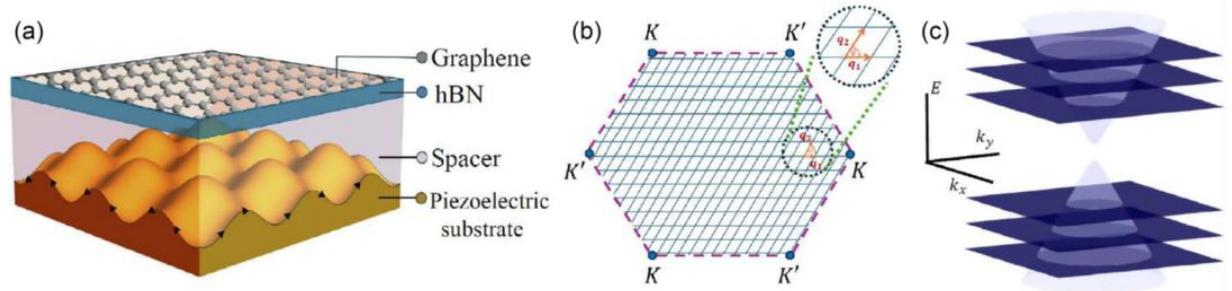


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-70048-4>

2、表面声波诱导的迷你能带生成

调控材料的周期性，是塑造其物理行为的一种强有力手段。典型例子包括光子晶体、声子晶体、光学晶格以及超材料。近年来，能够实现约 10 nm 周期结构的莫尔超晶格逐渐成为一个特别富有成果的研究平台，用于研究平带中的强关联效应与拓扑性质。

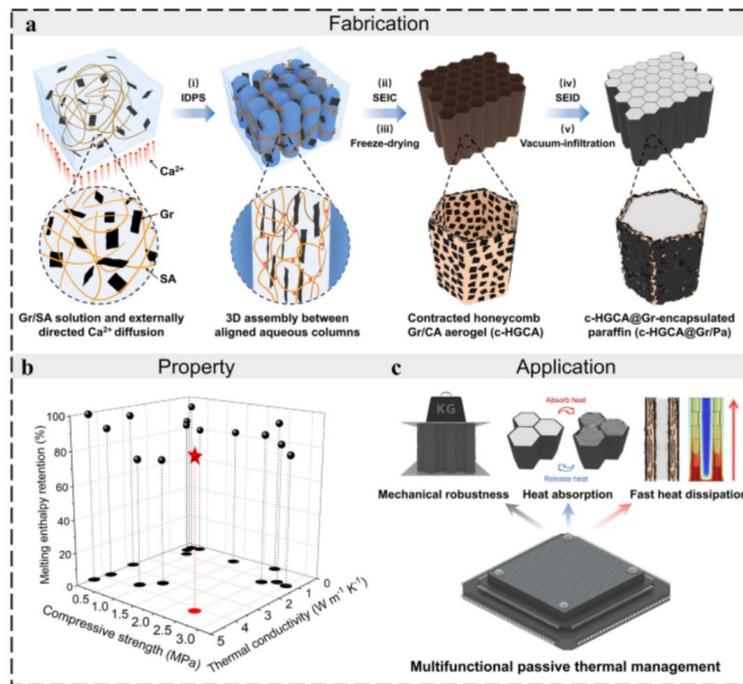
近日，特拉维夫大学 Rafi Bistritzer 教授研究团队，提出并从理论上研究了一类新的周期结构——声电超晶格 (acoustoelectric superlattice, ASL)。其基本构型是在压电基底上放置二维材料，并激发两束沿倾斜方向传播的表面声波；两束声波的干涉会在二维材料中形成可调的超晶格势。ASL 有两个突出优势：其一，可引入一个全新的可调长度尺度，范围从 GHz 表面声波对应的数十纳米一直延伸到电子平均自由程，从而填补莫尔超晶格与光学晶格之间的尺度空缺，并有利于形成狭窄且间距很小的能带；其二，每束表面声波的频率、振幅、相位和传播方向都可独立控制，因此晶格几何与势阱强度可以分别调节，这是莫尔体系难以实现的。此外，ASL 无需扭转堆叠和旋转对准，适用于不适合“撕裂-堆叠”工艺的二维材料，同时还能避免扭角无序和层间起伏对电子结构造成的不可控影响。文中进一步以单谷近似下的有质量石墨烯为例，研究了声电超晶格中的电子结构，而该理论框架也可推广到更广泛的二维材料体系。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。(刘帅)



3、仿生蜂窝工程克服气凝胶包覆相变复合材料的机械-热平衡

相变材料 (Phase Change Materials, PCM) 由于能够在相变过程中吸收大量潜热, 在不消耗额外能量的情况下实现温度调控, 被认为是电子器件热管理中极具潜力的解决方案。研究人员通常采用多孔骨架材料对 PCM 进行封装, 例如气凝胶、泡沫或多孔碳材料等。这类骨架结构不仅能够限制液态 PCM 的流动, 还可以通过构建导热网络提升整体热导率。然而, 在气凝胶封装 PCM 体系中长期存在一个难以调和的“机械-热导权衡 (mechanical-thermal trade-off)” : 为了提高热导率, 往往需要引入高导热的碳材料或石墨烯网络, 但这些网络通常依赖弱的范德华作用或 $\pi-\pi$ 堆叠形成, 结构刚性较低, 导致材料整体机械强度不足; 而如果通过构建刚性骨架 (如树脂结构或高密度骨架材料) 来提升力学性能, 又会显著降低材料的热导率。

针对上述挑战, 北京科技大学张海龙教授团队提出了一种仿生蜂窝结构工程策略, 成功实现了气凝胶封装相变复合材料中机械性能与热导性能的协同提升。该团队通过离子单向扩散诱导相分离 (Ion-Diffusion-Induced Phase Separation, IDPS) 机制构筑了石墨烯/海藻酸钙蜂窝气凝胶骨架, 并在此基础上发展出“双网络解耦设计”, 即通过蜂窝结构承担机械载荷, 同时通过石墨烯网络构建连续导热通道, 从而突破传统材料中的性能耦合限制。具体而言, 在材料制备过程中, Ca^{2+} 离子从溶液界面单向扩散进入海藻酸钠溶液, 引发界面快速交联并诱导各向异性相分离。在这一过程中, 体系首先形成富水相囊泡结构, 随后在持续的离子扩散与表面张力作用下, 囊泡逐渐转变为紧密排列的水柱阵列。水柱之间的挤压作用将海藻酸钙凝胶与石墨烯纳米片排挤到柱间区域, 最终形成具有六边形蜂窝拓扑结构的凝胶网络; 界面张力进一步在柱壁处形成类似泡沫 Plateau 边界的稳定结构, 从而构建长程有序的蜂窝骨架。经冷冻干燥后, 该结构被完整保留下来, 形成石墨烯/海藻酸钙蜂窝气凝胶, 其中海藻酸钙交联网络构成高强度承载骨架, 而石墨烯纳米片则以“砖-砂浆 (brick-and-mortar)” 形式嵌入蜂窝壁中。随后, 研究团队通过溶剂蒸发诱导收缩 (SEIC) 过程提高骨架密度, 使气凝胶在 20% 应变下的比强度达到 $19.2 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并通过溶剂蒸发诱导沉积 (SEID) 方法在蜂窝壁表面沉积连续石墨烯层, 建立高效导热网络。当石蜡相变材料被真空浸渗进入蜂窝孔道后, 形成的复合材料同时表现出优异的热学与力学性能: 材料热导率达到 $4.18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 较纯相变材料提升超过 15 倍, 同时在相变后仍保持 2.49 MPa 的压缩强度, 并实现 83.9wt% 的相变材料负载量和 $199.0 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高熔化焓。其物理机制在于: 蜂窝结构中的垂直通道既充当液态 PCM 的容纳空间, 又作为承载柱抵抗外部压缩载荷, 而蜂窝壁上的连续石墨烯网络则形成贯通的热传导路径, 使热量能够快速从热源沿骨架传递并在 PCM 中均匀扩散。实验表明, 该复合材料在 CPU 散热测试中可将芯片峰值温度降低约 $10.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 显著提升电子器件的热稳定性。该研究通过结构仿生与多尺度网络设计, 实现了机械支撑、快速导热和高效储热三种功能的协同集成, 为极端热机械环境下电子器件被动热管理材料的设计提供了一种新的结构工程策略。相关内容发表于《Advanced Materials》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202515304>

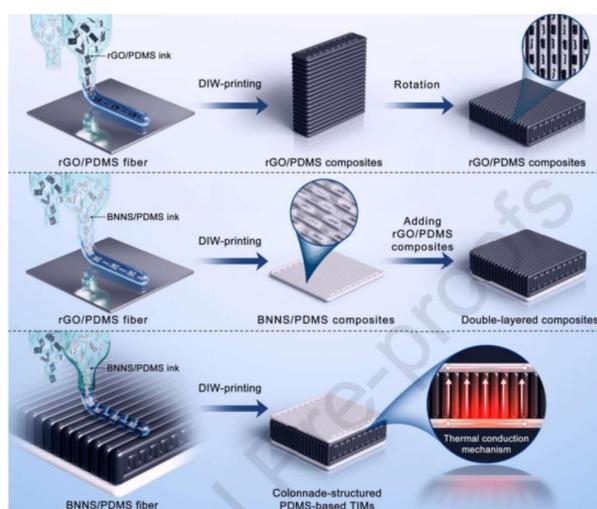
4、通过直写式打印构筑柱廊结构聚二甲基硅氧烷热界面材料的优化

热传导通道

热界面材料 (Thermal Interface Materials, TIMs) 被广泛应用于芯片与散热器之间, 用于填充界面间隙并降低界面热阻, 从而促进热量从电子器件向外界环境的快速传递。然而, 传统聚合物基 TIMs 通常依赖于填充高导热填料 (如石墨、金属或氮化硼等) 来提高导热性能, 这类材料虽然可以在一定程度上提升热导率, 但仍面临一系列关键科学与工程问题: 首先, 聚合物本身热导率较低, 而填料在基体中的随机分散会导致热传导路径不连续, 使得声子或电子在界面处频繁散射, 严重限制整体导热性能; 其次, 在高填料含量条件下材料的加工性能和机械柔韧性往往下降, 同时可能影响电绝缘性能; 此外, 大多数 TIM 结构仅能实现单一方向的导热增强, 例如仅在面内方向或厚度方向提升热导率, 难以同时实现热量在平面扩散与垂直传导的协同优化, 从而限制了整体散热效率。近年来, 如何通过设计具有明确空间取向的导热路径, 使热量能够在材料内部实现“横向扩散—垂直传输—最终散热”的协同过程, 被认为是提升热管理效率的重要方向。

针对这一问题, 西北工业大学顾军渭教授和南洋理工大学周琨教授团队提出了一种柱廊结构 (colonnade structure) 热界面材料设计策略, 通过构筑协同取向的热传导网络, 实现聚合物基 TIMs 中热量在多方向上的高效传输。研究团队利用直接墨水书写 (Direct Ink Writing, DIW) 三维打印技术, 以聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 为基体, 将六方氮化硼纳米片 (BNNS) 和还原氧化石墨烯 (rGO) 分别构建为不同取向的导热层, 从而形成具有柱状通道结构的复合热界面材料。具体而言, 在打印过程中, 通过剪切诱导与结构设计使 BNNS 填料在柱廊结构的水平方向 (面内方向) 高度取向排列, 从而构建高效的横向热扩散网络; 与此同时, 在结构的中间层引入 rGO/PDMS 复合层, 使 rGO 片层沿厚度方向取向排列, 形成

贯通材料上下界面的垂直热传导通道。通过这种结构化设计，材料内部形成了类似“横向热扩散通道 + 垂直导热桥梁”的协同热传导体系。实验结果表明，这种柱廊结构显著降低了聚合物基 TIM 中填料界面处的热阻，并有效减少了聚合物基体参与导热的比例，从而显著提升整体热导率。当 BNNS 和 rGO 填料含量均为 20 wt% 时，该材料的面内热导率达到 $6.30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，而厚度方向热导率达到 $2.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，明显优于传统随机结构或单一取向结构的热界面材料。同时，由于 BNNS 具有优异的电绝缘特性，该复合材料仍保持高电阻率与优良的电绝缘性能，满足电子器件封装需求。此外，柱廊结构还赋予材料良好的热稳定性与被动辐射冷却能力，在 LED 散热测试中表现出显著的温度降低效果，证明其在实际电子热管理中的应用潜力。相关内容发表于《Science Bulletin》上。(张琰炯)



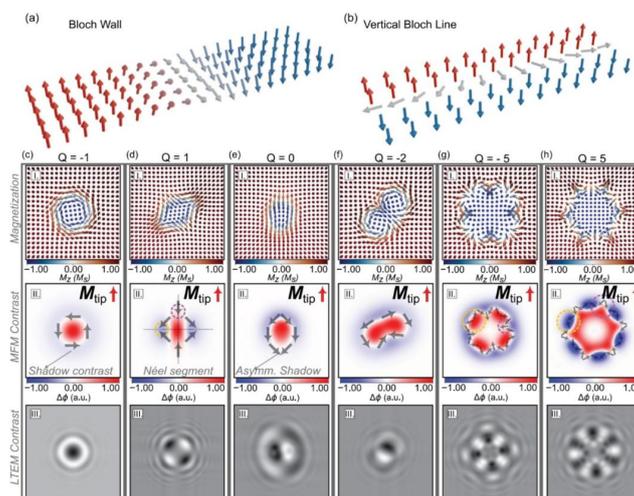
文章链接: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2026.03.011>

5、高阶斯格明子与反斯格明子的磁力显微镜特征

拓扑非平庸的自旋纹理，特别是具有高阶拓扑数的斯格明子与反斯格明子，因其在未来自旋电子学器件中的潜在应用而受到广泛关注。这些结构通常起源于磁畴壁中的垂直布洛赫线，具有高于 ± 1 的整数拓扑电荷。然而，迄今为止，这类高阶自旋纹理仅在铁磁性多层膜中通过洛伦兹透射电子显微镜被观察到。该方法要求将样品生长在超薄电子透明膜上，不仅增加了样品制备的复杂性，也限制了其与自旋电子学器件的集成。此外，洛伦兹透射电子显微镜所获得的图像衬度往往难以明确对应特定的拓扑电荷，导致对自旋纹理的识别存在歧义。因此，发展一种能够清晰识别并区分高阶拓扑自旋纹理的可靠表征技术，对于推动该领域的基础研究与实际应用至关重要。

近日，奥地利维也纳工业大学的 Sabri Koraltan 博士研究团队系统探讨了利用真空条件下操作的磁力显微镜识别与区分高阶斯格明子与反斯格明子的可行性。通过微磁模拟，研究首先揭示了具有不同拓扑电荷的自旋纹理在磁力显微镜下的特征衬度：高阶斯格明子在其边界内部呈现局域化的引力信号，而高阶反斯格明子则在其边界处出现由排斥力导致的衬度局域化。基于这些理论预测，研究进一步在 Co/Ni 多层膜中进行了实验验证。磁性表征显示该体系具有适宜的垂直各向异性，利于高阶自旋纹理的形成。洛伦兹透射电子显微镜观察确认了样品中存在多种自旋纹理，在此基础上，磁力显微镜成功捕捉到垂直布洛赫线以及拓扑电荷

$Q = -1, -2, -4$ 的斯格明子和 $Q = +1, +3$ 乃至更高阶的反斯格明子，其实验图像与模拟结果高度吻合。研究表明，基于磁荷分布差异，磁力显微镜能够提供与拓扑电荷直接关联的独特衬度特征，从而实现对不同自旋纹理的定性区分，为高阶拓扑自旋纹理在信息存储与类脑计算等领域的应用探索提供了重要的实验基础与表征手段。该研究成果发表于《Advanced Functional Materials》。（刘梦洋）



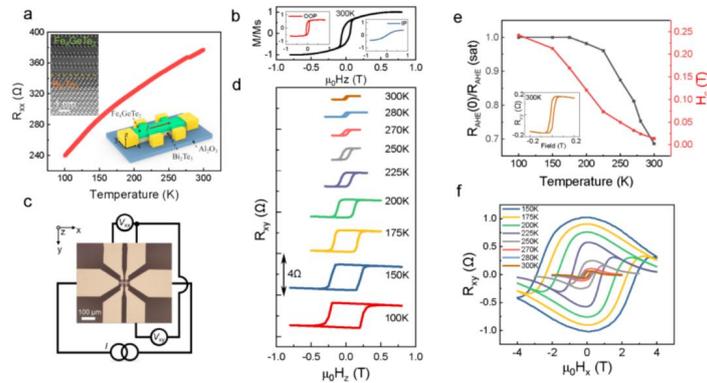
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202525716>

6、用于自旋逻辑应用的全 VDW 异质结构中通过拓扑对称性破缺实现的极性可调无场室温自旋轨道转矩切换

自旋轨道转矩器件因其在构建低功耗、高速度、非易失性存储器和逻辑系统方面的潜力，成为满足现代信息技术发展需求的重要候选技术之一。然而，传统基于重金属和普通铁磁材料的自旋轨道转矩异质结构面临界面粗糙度大、自旋透明度低等问题，限制了器件的功耗表现。全范德华异质结构因其原子级平整的界面和优异的自旋透明性，被认为是克服上述瓶颈的有效途径。然而，现有的全范德华体系通常仍需要外部磁场的辅助以打破对称性，实现磁矩的确定性翻转，这严重阻碍了其在半导体芯片上的集成应用。已有研究表明，通过结合垂直磁各向异性和面内磁各向异性层，可以在无需外场的情况下实现自旋轨道转矩翻转，并进一步通过调控面内各向异性方向实现翻转极性的可调性，为自旋逻辑器件的构建提供了新思路。尽管如此，如何在晶圆尺度上实现兼具室温工作、无外场翻转和极性可调的全范德华异质结构，依然是该领域面临的关键挑战。

近日，北京航空航天大学的天晓教授研究团队在分子束外延技术的基础上，成功制备了晶圆尺度的全范德华 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Fe}_4\text{GeTe}_2$ 异质结构，并在室温下实现了极性可调的无外场自旋轨道转矩翻转。研究发现， Bi_2Te_3 与 Fe_4GeTe_2 之间的界面耦合效应诱导了 Fe_4GeTe_2 的垂直磁各向异性，同时其本征的面内磁各向异性分量未被完全抑制，二者共存于同一铁磁层中。面内分量提供了等效的内建对称性破缺场，使得无需外部磁场即可实现确定性磁矩翻转。通过调控面内分量的方向，磁翻转的极性可被灵活控制，临界翻转电流密度低至约 $1.55 \times 10^6 \text{A/cm}^2$ 。微磁学模拟进一步揭示了其磁动力学过程。基于该器件的特性，研究进一步在单

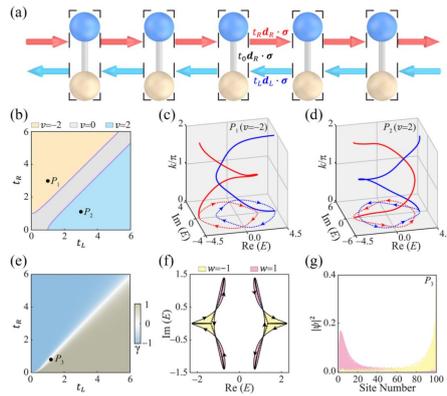
个器件中实现了全部 16 种布尔逻辑功能的可重构操作，展示了其在低功耗、高集成度自旋逻辑应用中的巨大潜力。该研究为构建全电场控制、室温工作的范德华自旋轨道矩器件提供了新路径，推动了二维自旋电子学向实用化方向发展。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41467-026-70590-1>

7、非阿贝尔 Hatano-Nelson 模型在电路中的实现

非厄米体系因其复能谱和开放系统特性，近年来成为拓扑物理的重要研究方向。与传统厄米体系主要关注本征态拓扑不同，非厄米系统中的复能谱本身也可呈现出丰富的拓扑结构，例如复能带的编织以及由谱绕数刻画的非厄米趋肤效应。围绕这些现象，人们已经在声学、光学和电路等平台上开展了大量研究，并观测到多种新颖的非厄米拓扑行为，例如：非厄米能带的编织结构和非厄米皮肤效应。迄今为止，大多数关于非厄米物理的研究仅限于无规范场或具有阿贝尔规范场的系统。然而，非阿贝尔规范场由于具有内部自由度之间的不对易性，在拓扑物理中同样具有重要地位。近年来，非阿贝尔物理在任意子、拓扑荷、模态编织等方向展现出诸多独特现象。特别是，具有自旋或赝自旋自由度的非阿贝尔规范场，已被证明能够显著改变体系的能带结构与输运特性。然而，已有大多数非厄米实验研究仍主要局限于无规范场或阿贝尔规范场体系，非阿贝尔规范场与非厄米性耦合后会产生怎样的新拓扑现象，尤其在实验上如何实现，仍有待深入探索。近日，武汉大学刘正猷院士团队提出并实验实现了一种带有非对称 $U(2)$ 规范场的非阿贝尔 Hatano - Nelson 模型。理论表明，该模型的复谱不仅能够形成编织度 $|v|=2$ 的 Hopf 链式结构，还可在非阿贝尔条件下产生具有相反谱绕向的双极皮肤效应。值得注意的是，在传统一维非厄米模型中，实现高阶复谱编织或双极皮肤效应通常需要引入长程耦合；而该工作表明，仅通过最近邻非阿贝尔耦合，就可以同时实现这两类复杂现象，体现出非阿贝尔耦合在非厄米拓扑中的独特作用。团队进一步利用电路平台实现了这一晶格模型。通过设计不同电路元件的连接方式，在实验中构造出具有非互易性的非阿贝尔矩阵耦合；再通过测量电路的导纳矩阵频谱和本征态分布，分别验证了理论预测的复频谱编织和趋肤效应。这项工作不仅将非阿贝尔规范场引入非厄米 Hatano - Nelson 模型的实验研究，也为在人工电路和超材料平台上探索更丰富的非厄米拓扑现象提供了新方案。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》。（金梦成）



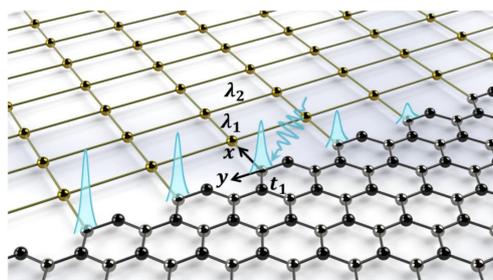
文章链接: <https://doi.org/10.1103/48wx-5gmj>

8、零增益零损耗超材料中的非厄米非布洛赫效应

非厄米 (non-Hermitian, NH) 系统因其区别于传统厄米系统的独特谱性质和输运行为, 近年来受到广泛关注。典型现象包括例外点、非厄米拓扑相以及与非厄米皮肤效应相关的非布洛赫体边对应等。这些现象曾被普遍认为是 NH 系统独有的。并且光学与光子学已被证实是观测 NH 系统丰富物理特性的理想实验平台。不过, 一个更根本的问题随之提出: 如果系统整体完全是厄米的、且不存在显式的增益和损耗, 是否仍然能够产生非厄米效应? 近期研究给出了肯定答案。其关键思想是: 虽然整个系统保持厄米, 但当两个子系统通过界面耦合并发生能量交换时, 若只关注其中一个有效子系统, 其界面动力学仍可能呈现出非厄米特征。特别是, 经过合理设计后, 这种有效界面哈密顿量可以表现出非互易跃迁, 进而支持非布洛赫输运。

近日, 清华大学周济院士团队研究了一种由 Haldane 拓扑晶格与导体晶格耦合形成的异质界面。理论表明, 在这一体系中, 拓扑边缘态与导体热库的耦合作用可在界面上诱导出有效的非厄米自能; 再结合边缘态本身的单向传播特性, 最终使界面有效哈密顿量呈现不对称跃迁, 从而产生非布洛赫传输行为。其典型表现为: 在界面上施加局域脉冲激发后, 响应沿界面向两侧传播时会表现出不同的衰减速率。团队进一步在电路超材料平台上实现了这一结构, 实验结果与理论预测吻合良好, 验证了在零增益、零损耗、整体厄米条件下实现非厄米非布洛赫效应的可行性。这项工作表明, 非厄米效应并不一定要求系统显式包含增益或损耗, 而可以通过界面耦合与有效开放子系统动力学自然涌现, 为非厄米超材料和拓扑波调控提供了新的设计思路。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》。

(金梦成)



文章链接: <https://doi.org/10.1103/r8hh-zz5c>

(来源: 两江科技评论)

