

超材料前沿研究一周精选



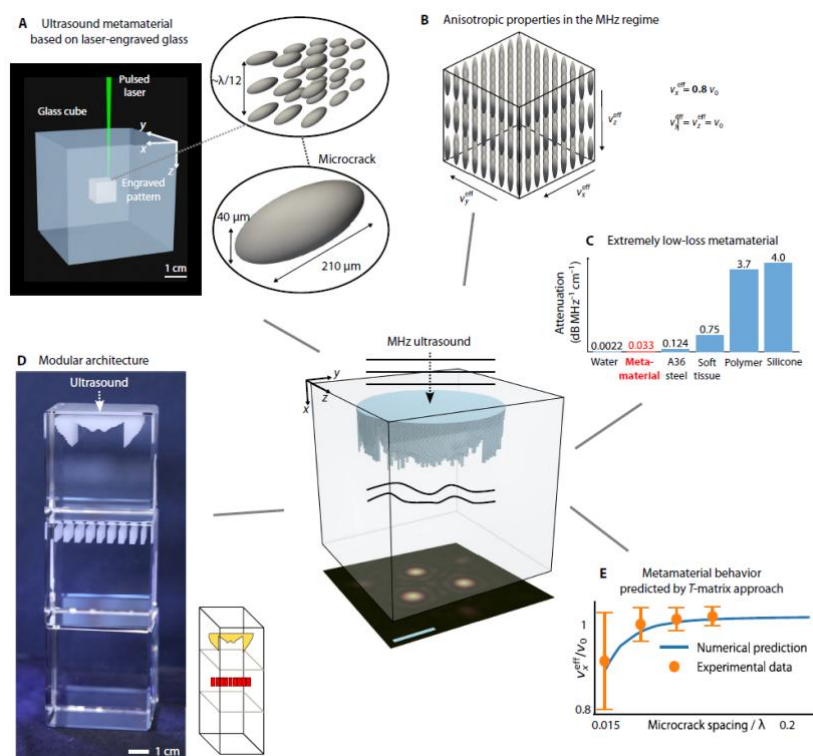
2026 年 10 月 19 日-2026 年 10 月 25 日

索引:

- 1、基于微结构玻璃的兆赫兹频段超声超材料
- 2、反射辅助实现离散波长消色差衍射
- 3、面向耐形变智能电子织物的磁-机械-电化学多功能纤维
- 4、高自旋 Kitaev 模型中的拓扑与平庸价键有序
- 5、蜂窝反铁磁体中声子热霍尔效应的热力学起源
- 6、堆叠调控声子重整化与莫尔半导体超晶格有效热输运

1、基于微结构玻璃的兆赫兹频段超声超材料

精确调控超声波波前在生物医学和工程应用中具有重要意义。兆赫兹超声兼具较强的组织穿透能力和毫米级聚焦精度，广泛应用于医学成像、无创治疗、声流控及工业无损检测等领域。目前，超声波前调控主要依赖有源相控阵和无源相位调制器件。相控阵虽然具有较高的调控灵活性，但随着阵元数量增加，驱动系统的复杂度和成本显著提高；传统聚合物声学透镜及全息器件则存在较大的声学损耗，限制了其在高功率及复杂三维声场调控中的应用。声学超材料通过设计亚波长微结构，能够实现声速、各向异性及色散特性的灵活调控，为超声波前塑造提供更多自由度。然而，现有声学超材料主要工作于低频范围，难以拓展至兆赫兹频段。近年来发展的三维打印超材料虽然提高了空间设计自由度，但仍面临声衰减大、机械与热稳定性不足，以及大尺寸器件制造困难等挑战。因此，开发兼具低损耗、高稳定性和三维可设计性的兆赫兹超声超材料具有重要意义。近日，马克斯·普朗克医学研究所 Oscar Demeulenaere 团队，针对传统超声超材料在兆赫兹频段存在的高损耗和制造困难等问题，提出了一种基于微结构玻璃的低损耗、可扩展三维超声超材料。该方法利用玻璃本身优异的声学、机械及热稳定性，通过亚表面激光雕刻技术，在 BK7 玻璃内部精确构筑亚波长微裂纹阵列，从而实现对材料等效声学参数的调控。研究人员采用 9 ns 脉冲激光制备百微米尺度的微裂纹，并通过折射振动测量技术表征其等效声速和密度，揭示了微结构引起的显著各向异性及频率依赖特性。同时，建立了基于转移矩阵（T 矩阵）的多重散射理论模型，实现了对复杂微裂纹阵列声学响应的准确预测。在此基础上，研究团队设计并制备了声学透镜、光栅、波导及多种声全息器件，实现了兆赫兹超声波前的低损耗调控。此外，通过不同超材料模块的灵活组合，进一步展示了构建复杂三维超声波前调控系统的潜力。相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



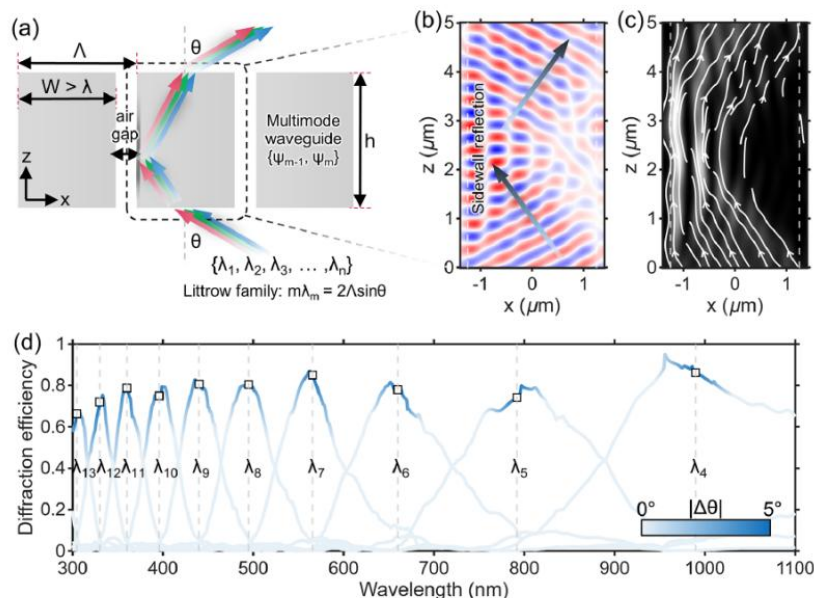
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aef0666>

2、反射辅助实现离散波长消色差衍射

折射、衍射和反射是调控光传播方向的三种基本机制。其中，衍射能够通过空间结构赋予光离散动量，广泛应用于光束偏转、波长路由和波导耦合等领域，但其出射角度随波长变化，且偏转角度越大，色散越显著。相比之下，反射遵循与波长无关的几何光学定律，具有天然的消色差优势。目前，平面衍射光学器件主要采用两种策略抑制色差：一是通过调控超构单元的相位、群延迟及群延迟色散，实现连续宽带消色差，但受时间-带宽积限制，难以兼顾大孔径、高数值孔径和宽带宽；二是利用超构光栅设计，使不同波长的光通过不同衍射级次沿相同方向出射。然而，后一种方法仍存在严重的能量泄漏问题，单通道衍射效率通常难以超过 20% - 30%。因此，如何在单一无源光学器件中同时实现大角度偏转、离散消色差和高衍射效率，仍是亟待解决的关键挑战。

近日，浦项科技大学 Junsuk Rho 研究团队，利用深度二元介质光栅这一最简单的周期结构，在单一器件中同时结合衍射与反射两种机制，从而在宽光谱范围内实现色散受抑制的衍射。其中，光栅周期决定了一组离散的衍射级次，使不同波长的光能够分别通过不同级次，以相同的出射角传播。相邻栅条之间的空气间隙则调控侧壁反射的强度，使系统进入一种弱耦合状态；在该状态下，光子能带趋于平坦，主导模态的拍长几乎不随波长变化。上述两种机制协同作用，使多个离散波长的光能够以较高效率被重定向到同一远场方向。作者进一步通过实验验证了这一机制，采用双光子光刻制备了高深宽比二元光栅，并通过角分辨远场测量证实了其性能。

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



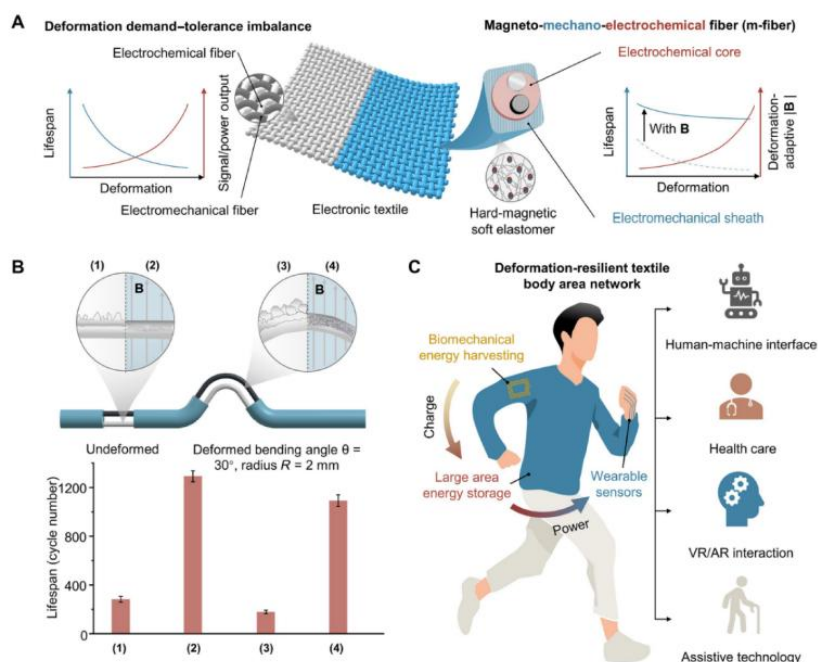
文章链接: <https://doi.org/10.1103/3ss4-c6dw>

3、面向耐形变智能电子织物的磁-机械-电化学多功能纤维

随着柔性电子技术与可穿戴设备的快速发展,电子织物正逐渐成为集成能源供应、健康监测和人机交互功能的重要平台。通过将储能、能量采集及传感等功能引入纺织纤维,传统织物有望转变为具备自主供能与智能感知能力的电子系统。然而,不同功能纤维对机械形变的要求存在根本性矛盾:传感和能量采集器件通常依赖形变实现信号转换,而电化学储能器件则需要稳定的结构以维持性能和使用寿命。尤其对于圆柱形纤维电极,其固有的非均匀电场分布容易引起离子沉积不均、电极枝晶生长及活性材料利用率下降,机械弯曲和拉伸还会进一步加剧这些问题。现有电子织物通常采用不同功能纤维独立制备再组合的方式,难以兼顾机械柔性、储能稳定性与多功能集成。因此,如何利用纤维形变过程中的物理响应改善电化学生性能,并实现能源与传感功能的协同集成,成为推动智能电子织物发展的重要研究方向。

近日,新加坡国立大学的吴昌盛教授研究团队提出了一种磁-机械-电化学耦合的多功能纤维结构,通过磁场调控实现电化学储能与机械响应的协同优化。该纤维采用核壳设计,以锌和二氧化锰电极构成储能核心,并在外层柔性弹性体中嵌入磁性微粒,形成能够随形变改变磁场分布的功能外壳。磁场通过洛伦兹力调节电解质中的离子传输,促进均匀电沉积并抑制枝晶生长,同时改善电极材料的结构稳定性。实验结果表明,与非磁性纤维相比,该结构在未形变状态下的循环寿命提高约 374%,储能容量提升约 61%,且在弯曲形变下仍表现出优异的稳定。该研究为解决柔性储能器件中机械形变与电化学稳定性之间的矛盾提供了新思路,也为自供能健康监测、智能可穿戴设备及柔性电子系统的发展提供了多功能材料平台。

该研究成果发表于《Science Advances》。(刘梦洋)



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aef4338>

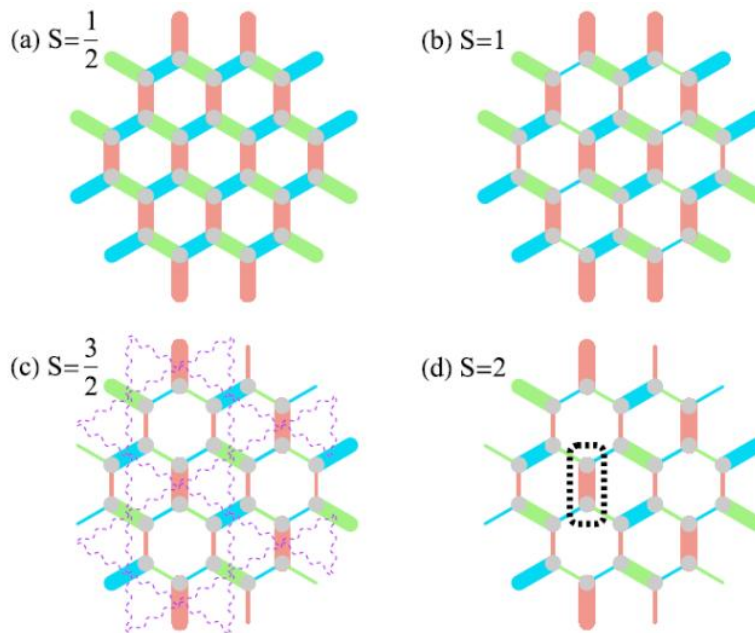
4、高自旋 Kitaev 模型中的拓扑与平庸价键有序

量子自旋液体是一类具有特殊量子关联的物质状态，其基态不存在传统磁有序，并可能表现出长程量子纠缠和拓扑序等性质。与之不同，价键固体通过形成空间分布不均匀的自旋关联，产生自发的晶格平移对称性破缺。长期以来，量子自旋液体与价键有序之间的竞争及共存关系一直是凝聚态物理的重要研究课题。

Kitaev 模型凭借独特的自旋相互作用和局域守恒量，为探索这一问题提供了理想平台。尽管自旋二分之一的 Kitaev 模型已被证明能够支持量子自旋液体，但当自旋量子数增大时，体系的基态性质仍存在诸多争议。特别是，不同自旋体系是否形成价键有序，以及这种对称性破缺能否与拓扑序共存，尚缺乏统一认识。此外，传统数值方法受到有限尺寸效应和计算精度的限制，难以准确区分不同量子相，因此亟需更加可靠的理论分析与数值计算手段。

近日，比利时根特大学的何宇驰博士研究团队采用高精度二维张量网络方法，系统考察了自旋为 1、3/2 和 2 的蜂窝晶格 Kitaev 模型。研究发现，三种体系均通过形成价键有序使原胞扩大为原来的三倍，但对应的量子相具有显著差异：自旋 1 体系形成不具有拓扑序的六角形晶格元胞有序态，自旋 3/2 体系形成具有拓扑序的二聚体有序态，而自旋 2 体系则形成拓扑平庸的二聚体有序态。这表明晶格平移对称性破缺并不必然排斥拓扑序，两种不同类型的量子有序可以在同一体系中共存。进一步的理论分析表明，自旋量子数的整数与半整数特征及其对应的局域守恒量约束，是决定体系拓扑性质的重要因素。该研究不仅揭示了高自旋 Kitaev 体系中价键有序与拓扑序之间的复杂关联，也为受挫量子磁体中对称性破缺和拓扑量子相的精确识别提供了新的数值研究思路。

该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



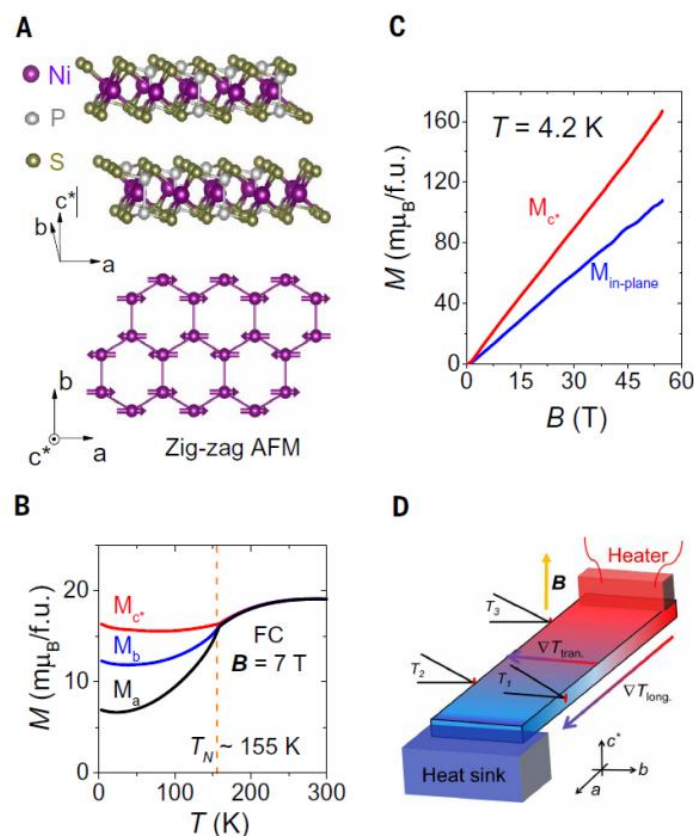
文章链接: <https://doi.org/10.1103/7q3l-xxsd>

5、蜂窝反铁磁体中声子热霍尔效应的热力学起源

热霍尔效应是指在外磁场作用下，材料中的纵向热流产生横向温度梯度，是研究固体中能量传输与微观相互作用的重要手段。传统观点认为，声子不携带电荷和自旋，难以像电子一样产生霍尔响应。然而，近年来，研究人员在多种绝缘体中观测到显著的热霍尔效应，表明晶格振动也能够参与复杂的横向热输运过程。尽管相关实验不断涌现，声子为何能够在磁场下产生横向热流，以及这一响应究竟源于外部散射还是材料内部的本征机制，仍存在争议。尤其在磁性范德华材料中，磁有序、晶格振动与磁振子之间可能发生耦合，为理解声子热霍尔效应提供了新的研究方向。因此，寻找能够将横向热输运与明确的磁性参数直接关联的材料体系，并揭示其中的微观耦合机制，对于深入认识磁性绝缘体中的热输运具有重要意义。

近日，华中科技大学李亮教授/朱增伟教授/李小康副研究员与法国巴黎高等物理化学学院 Kamran Behnia 教授研究团队采用单加热器、三热电偶方法，同步测量 NiPS_3 的纵向和横向热导率。实验发现，纵向热导率在约 25 K 达到峰值，而 14 T 磁场下的横向热导率峰值达到 $-1636 \text{ mW} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，且两者峰值出现在相同温度附近。更重要的是，研究人员对五个不同单晶样品进行比较后发现，纵向热导率基本一致，但横向热导率的峰值相差约 10 倍，并与面内磁化各向异性显著相关，而非与声子平均自由程相关。这一结果不支持单纯依赖外部散射解释的机制，指向材料内部的本征热霍尔响应。结合声子色散与磁振子能谱分析，团队进一步发现， NiPS_3 中存在声子与磁振子能带交叉，磁有序引起的能带折叠为两者杂化创造了条件，可能通过打开能隙产生具有横向输运特征的混合激发态。该研究将声子热霍尔响应与磁各向异性及磁振子—声子耦合联系起来，为理解磁性绝缘体中的本征横向热输运提供了重要实验依据，也为进一步探索磁性量子材料中的热流调控机制开辟了新方向。

相关内容发表于《Science》上。（张琰炯）



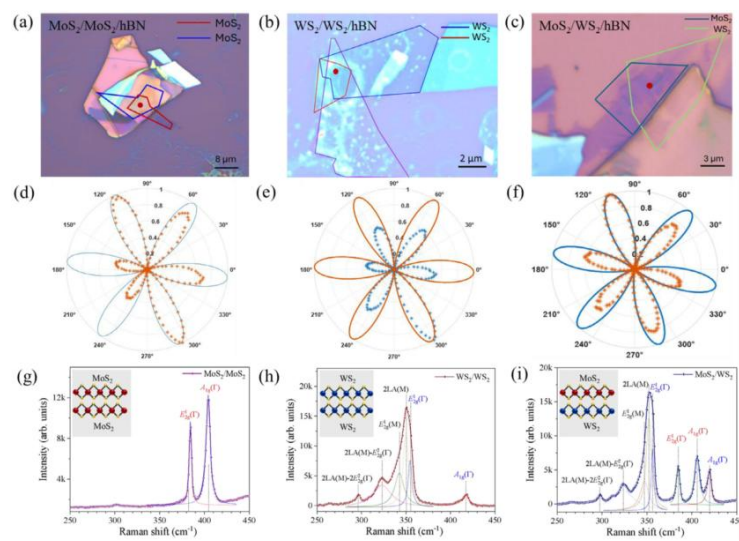
文章链接: <https://doi.org/10.1126/science.adt1992>

6、堆叠调控声子重整化与莫尔半导体超晶格有效热输运

随着二维半导体与莫尔量子材料的快速发展,层间扭转和堆垛结构已成为调控电子态、激子行为及声子动力学的重要手段。在过渡金属硫族化合物中,相邻原子层之间的相对取向不仅能够改变层间耦合,还会影响晶格振动、声子散射以及光激发条件下的热量耗散。尤其在莫尔异质双层结构中,层间电荷转移和激子形成可能引入额外的电子-声子耦合通道,使拉曼光谱中的声子频移不再仅由温度引起的常规非 342 谐效应决定。这一现象给基于拉曼峰位的温度测量带来了新的挑战:如何区分常规声子软化与界面耦合引起的异常频移,并准确评估光激发条件下的热输运和散热能力,已成为莫尔器件热管理领域亟待解决的问题。

近日,圣地亚哥州立大学 Sanjay K. Behura 助理教授研究团队对扭转 $\text{MoS}_2/\text{MoS}_2$ 、 WS_2/WS_2 同质双层以及 MoS_2/WS_2 异质双层开展了变温拉曼、变激光功率拉曼测温 and 光致发光测试。结果发现,两种同质双层的拉曼活性声子随温度升高呈现常规软化,而 MoS_2/WS_2 异质双层中的 WS_2 面外振动模式却出现反常硬化,温度系数达到 $+0.00700 \pm 0.00029 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。光致发光结果进一步表明,异质双层中存在层间激子通道,提示界面电子耦合能够引起超出常规非谐衰减机制的声子重整化。研究团队还利用不同激光聚焦条件下的拉曼测温,提取与声子模式相关的有效热输运参数,并构建物理约束的神经网络框架,实现不同温度与激发功率下拉曼光谱的重建和光热工作条件的优化。该研究强调,莫尔异质界面能够同时影响声子频率与光激发热耗散,进行定量拉曼测温时必须区分界面诱导的声子重整化与真实温升,为莫尔量子器件的热设计和光热表征提供了新的研究思路。

相关内容发表于《Advanced Functional Materials》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.79055>

（来源：两江科技评论）