

# 超材料前沿研究一周精选



2025 年 12 月 1 日-2025 年 12 月 7 日

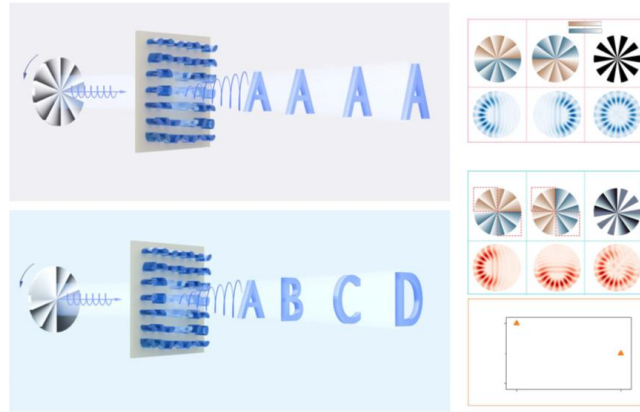
索引:

- 1、不连续轨道角动量超表面全息术
- 2、基于多维复用声学超表面的轨道角动量与频率依赖的高容量加密全息图
- 3、涡旋微波激射器的拓扑辐射
- 4、量子斯格明子的拓扑偶极子
- 5、通过构建层间声子桥对电子器件进行有效的热管理
- 6、单晶 Au 中的弹道输运极限
- 7、基于狄拉克质量工程的手性谷边界态

## 1、不连续轨道角动量超表面全息术

超表面由亚波长人工结构阵列组成，具有尺寸小、分辨率高等优势，使光学器件进入平面化时代。凭借强烈的光-物质相互作用，超表面能够同时调控相位、振幅与偏振等多种自由度，从而推动全息显示等多维复用技术的发展。近年来，偏振、波长、入射角及空间维度等多种复用方式不断被提出。其中，轨道角动量(OAM)复用因理论上可提供无限正交通道，成为实现大容量信息全息的关键手段。然而，传统的 OAM 复用通常依赖方位对称的编码方式，使得只需输入常规 OAM 模式便可轻易解码，信息安全性大幅下降。此外，每个通道均由单一的拓扑荷数(TC)编码，解码不同图像需使用不同 TC 的涡旋光束，显著增加了多通道全息的复杂性。

近日，清华大学深圳国际研究生院宋清华副教授团队，提出一种利用单束入射光的轨道角动量多路复用全息方法：通过在方位角方向编码不连续拓扑荷，有效打破传统 OAM 的旋转对称性，使得仅需旋转入射光即可选择不同全息通道。研究证明，通过合理设计方位分布的 TC，不连续 OAM 在不同旋转角下可实现自正交，通道间串扰极小。此外，多组不连续 OAM 还可在同一器件上复用，进一步提升通道容量。为此，作者引入改进的加权 Gerchberg-Saxton 算法生成全息相位，并以几何相位超表面实现编码。由于不连续 OAM 的特殊性，其加密全息图无法被常规连续 OAM 解码，从而显著提升信息安全性。本方法为大容量、高安全性的光信息传输、光通信网络及量子通信与大数据光子技术提供了新的解决方案。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



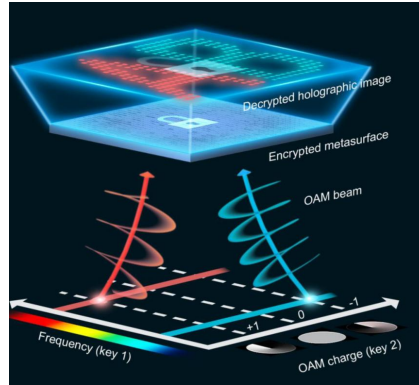
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65722-y>

## 2、基于多维复用声学超表面的轨道角动量与频率依赖的高容量加密

### 全息图

声学全息技术能够精确记录与重建目标的全波信息，在脑成像、粒子操控等领域展现巨大潜力。然而，传统声学全息通常依赖大型、昂贵且结构复杂的相控阵，其换能器尺寸受限于波长，导致空间带宽积和分辨率受限。近年来，具备超常声学特性的超材料与超表面为高自由度、低成本的波前调控提供了新途径，使声学全息在复杂声涡结、任意气泡空化场等方向取得重要进展。然而现有声学超表面多只能生成单一固定全息图，信息容量与灵活性不足，且易被简单入射波解码。频率复用虽可提升容量，但受带宽与串扰限制。光学领域常用的自旋与偏振复用无法应用于声学，使可用通道更为有限。轨道角动量（OAM）作为独立自由度，已在光学与微波中用于高效复用，但直接移植到声学会因声波长较长而尺寸不可行。目前缺乏可同时调控 OAM 与频率的声学机制，使实现高容量、高安全性的多维声学全息仍面临挑战。

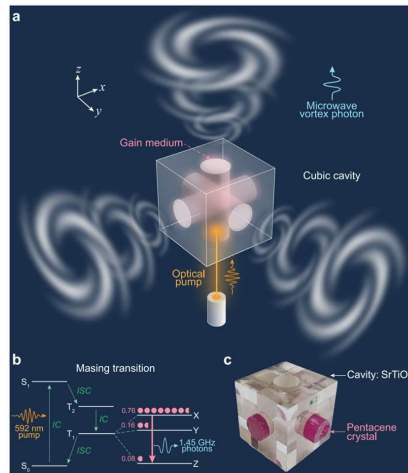
近日，南京大学刘京京博士、梁彬教授、程建春教授团队，提出一种多维复用声学全息机制，将轨道角动量作为新的调控维度，并与频率复用相结合，使不同全息图案分别存储于不同的 OAM/频率通道中，从而显著提升声场的信息容量。为实现该方案，作者设计了一种同时具备 OAM 与频率选择性的双复用声学超表面，首次实现高容量、高安全性的声学 OAM 全息。由于 OAM 模式与频率的正交性，每个全息图案只能通过特定的 OAM 与频率组合解码，从而实现“双密钥”式的强安全性。为满足实际构建需求，作者开发了具有幅度—相位解耦调控能力的超表面单元，可在任意工作频率下实现独立调制，进而在亚波长尺度恢复高容量、多通道的声学全息信息。通过数值模拟与实验，分别展示了四个阿拉伯数字和四个英文字母的成功重建，结果与设计一致，验证了该机制在成像质量、信息容量与保密性方面的显著优势。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66793-7>

### 3、涡旋微波激光器的拓扑辐射

涡旋作为复杂场中的拓扑奇点，能够显著拓展波的空间自由度，在高容量通信、超分辨率成像及粒子捕获等领域具有重要应用价值。近年来，多种平面结构如超表面、光子晶体和连续域束缚态等已在光学频率成功实现涡旋生成，然而在微波频段，其对应器件——涡旋微波激光器——尽管在低噪声量子源与传感方面潜力巨大，却尚未被系统研究。传统微波激光器广泛应用于深空通信、天文学观测及量子精密测量等领域，但其辐射场通常局限于拓扑平凡模式，缺乏对涡旋结构等多维自由度的调控能力。因此，如何在亚波长尺度、三维空间内实现具有拓扑奇异性的相干微波发射，成为当前拓扑物理与微波光子学交叉领域的一项重要挑战。近日，瑞士洛桑联邦理工学院的 Romain Fleury 副教授研究团队提出并实验验证了一种基于亚波长立方介电腔体的多方向涡旋微波激光器。该器件采用钛酸锶立方腔作为谐振结构，内部填充五苯掺杂对三联苯晶体作为增益介质，在室温下通过光泵浦实现粒子数反转并激发微波频段的受激辐射。研究显示，该腔体本征模式在六个表面法线方向均支持拓扑偏振奇点，形成环形电场分布及中心强度为零的极化涡旋，其极化角绕奇点呈现连续  $2\pi$  卷绕，拓扑电荷为  $\pm 1$ 。通过在腔体上方引入手性超表面，该结构进一步实现了自旋简并解除，将矢量偏振涡旋转化为携带轨道角动量的相位涡旋，从而在实验上观测到具有非平凡拓扑电荷的微波脉冲辐射。时间域与频率域测量结果表明，该微波激光器具有低阈值、窄线宽及多方向同时辐射的特性，且在重复脉冲激励下表现出良好的时间稳定性与空间相干性。该工作首次在微波频段实现了体积式、多方向的拓扑涡旋相干源，不仅拓展了拓扑光子学在微波领域的应用范围，也为结构化波前调控、量子传感与通信系统中多维自由度操控提供了新的平台与方法。该文章发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



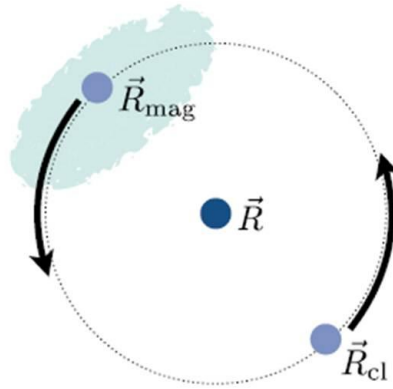
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65787-9>

#### 4、量子斯格明子的拓扑偶极子

磁斯格明子作为二维磁体系中的纳米级自旋漩涡,凭借拓扑保护带来的抗扰动性、纳米尺度尺寸及电场、磁场、光激发等多途径调控特性,被视为下一代高密度信息存储、量子逻辑器件的核心候选单元。但长期以来,学界对其量子动力学的核心基础问题存在诸多困惑:在量子涨落的影响下,斯格明子的拓扑偶极矩是否仍能保持守恒?这一问题直接决定了斯格明子的量子行为,也是此前相关理论存在矛盾的关键根源。

近日,德国卡尔斯鲁厄理工学院的 Sopheak Sorn、Markus Garst 团队通过经典场论、量子场论及线性自旋波理论的多层严格推导,首次在量子层面证实二维磁斯格明子的拓扑偶极守恒定律,同时建立起该体系与量子霍尔效应、分形子理论的深层关联,为拓扑自旋物理领域提供了新的理论基石。研究团队揭示核心机理:斯格明子的拓扑偶极矩与系统线性动量严格耦合,平移不变性保障其守恒;量子涨落下无反常现象,拓扑荷密度满足分数量子霍尔效应的核心代数;而自旋波涨落与准经典自旋纹理运动完全抵消,从微观涨落角度巩固了守恒结论。这一核心发现带来两大关键突破:一是破解了长期存在的斯格明子质量争议,明确拓扑偶极对应的集体坐标有效质量严格为零,此前争议的“有限质量”实为经典部分的运动特性,而非整体拓扑行为;二是建立起跨领域关联,斯格明子的拓扑荷密度满足分数量子霍尔效应的 Girvin-MacDonald-Platzman 代数,且其“单粒子固定、偶极子可动”的特性与分形子理论高度契合,为分形子现象的实验观测提供了理想平台。该研究不仅统一了此前矛盾的理论表述,更搭建起拓扑自旋物理、量子霍尔效应与分形子理论的交叉桥梁,为拓扑量子器件的研发与新奇拓扑现象的探索奠定了关键理论基础。相关研究内容发表于《Physical Review X》。(刘磊)





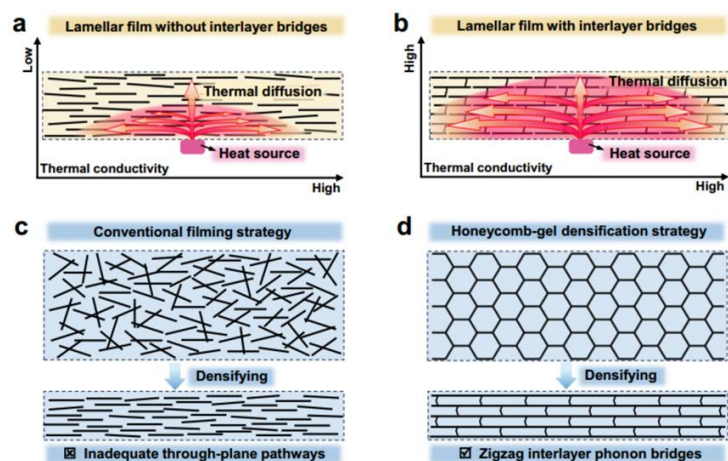
文章链接: <https://doi.org/10.1103/sxgs-38c3>

## 5、通过构建层间声子桥对电子器件进行有效的热管理

随着现代电子设备的快速发展,尤其是微型化、高集成度和高功率密度设备的普及,热管理技术已成为提升设备性能、保障安全性及延长使用寿命的关键技术之一。随着计算能力和功能集成度的不断提高,电子设备内部热量的产生也越来越集中,导致局部过热问题日益严重。如果无法有效散热,不仅会降低设备的性能,还可能引发严重的安全隐患。为了避免这些问题,基于层状结构的热管理材料

(f-TMMs)在散热领域得到了广泛关注。它们通过提高面内热导率,有效促进点热源的热扩散,防止设备因局部过热而发生热故障,成为解决设备热散管理问题的重要手段。然而,传统的层状热管理材料虽然在面内热导率上表现优秀,但其面外热导率较低,限制了整体热扩散能力。面内热导率的提升已被广泛研究,但面外热导率的提升却未受到足够重视。实际上,面外热导率直接影响到热量沿层间方向的吸收与扩散,而这一过程对提高整体热扩散效率至关重要。因此,如何克服面外热导率较低的瓶颈,提升材料的双向热导率,已成为目前热管理材料研发中的一项重要挑战。

为了解决上述问题,郑州大学刘春太教授,刘宪虎副教授,冯跃战副教授课题组联合华中科技大学陶光明教授课题组提出了一种创新的蜂窝状凝胶致密化策略,通过在层状结构中构建连续的交错面外声子桥,实现双向热传导通道的构建。该策略利用了芳纶纳米纤维(ANF)与硼氮化物纳米片(BNNS)作为基础材料,并通过单向冰冻铸造和凝胶化的处理方法,在蜂窝状框架中构建了长程热传导通道,成功地突破了传统材料仅在面内传热的局限性,显著提升了材料的面内和面外热导率。在实验中,经过蜂窝凝胶致密化处理的ANF/BNNS薄膜在面内热导率上达到了26.16 W/mK,在面外热导率上也达到了5.43 W/mK,相比于传统的随机凝胶致密薄膜,其热导率分别提高了488.9%和503.3%。此外,课题组还发现该材料具有优异的日间被动辐射冷却特性。在100 mW/cm<sup>2</sup>的模拟太阳光照射下,所制备的蜂窝状ANF/BNNS薄膜能够实现高达10.2° C的温度降低,显示了其在热散管理中的巨大潜力。该材料在电子设备的热管理应用中表现出优异的热稳定性和循环使用性能,能够有效避免局部过热,延长设备的使用寿命。该研究的成果不仅在热管理材料的设计和应用上提供了新的思路,也为未来电子设备的热管理技术提供了重要的参考。研究成果发表在《Nature Communications》上。(张琰炯)



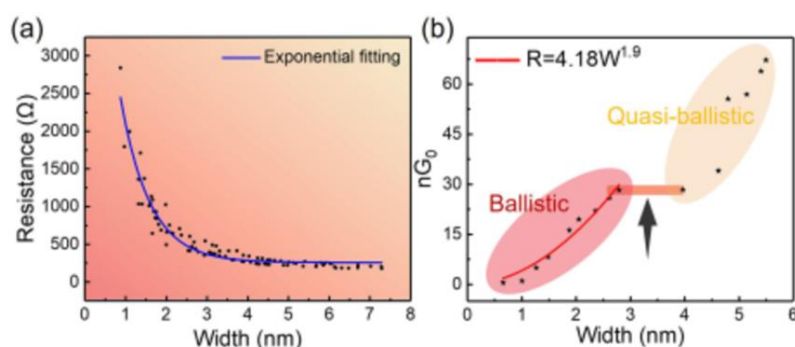
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65554-w>

## 6、单晶 Au 中的弹道输运极限

随着电子设备尺寸不断减小，量子电导效应逐渐显现，这一现象对于下一代存储器和量子计算至关重要。量子导电效应最早在 1990 年发现，并在 2005 年提出了量子导电原子开关（QCAS），这一开关以其高度可控的量子导电性、高开关速度和低能耗等优势，在非易失性存储器和逻辑运算电路领域受到广泛关注。随着技术的进步，量子导电效应在金属、半导体和纳米材料中的应用不断扩展。然而，量子导电设备的工作原理依赖于物理机制中的弹道传输，这一过程在原子尺度上尤为重要，且受到尺寸效应的影响。为深入理解导电材料的行为，研究表明金属材料的导电行为可以分为三种阶段：扩散传输、准弹道传输和弹道传输。当前，材料尺寸达到纳米级或更小，电子的散射事件减少，弹道传输的贡献开始主导，然而当尺寸继续减小时，弹道传输的行为与准弹道传输的过渡点尚未被完全理解，因此研究这些尺寸下的物理过程对于设计新一代量子导电设备至关重要。

近期，南方科技大学韩晓东教授课题组通过开发一套创新的电机耦合微机电系统（MEMS）设备，解决了传统电学测量中加热效应和两电极测量限制等问题，成功在透射电子显微镜（TEM）下进行原子分辨率的电学测试，研究了金单晶（Au）纳米线在不同尺寸下的电阻变化。研究者们通过 MEMS 技术实现了纳米级至原子级的实时电学信号采集，并结合高分辨率电子显微镜图像，实现了 Au 线从数百纳米到原子级的电导宽度曲线测量，揭示了电导由准弹道传输向弹道传输的转变。实验结果表明，当 Au 线的宽度减小至约 2.5 nm 时，电子的传输概率急剧下降，从而实现了弹道传输的界限的定量描述。该研究首次明确了金单晶材料在室温下的弹道传输尺寸临界值，即约为 2.5nm，并发现超出此尺寸后，电子散射开始显著增加，导致传输概率大幅下降。研究团队通过实时观测电导变化并结合透射电子显微镜图像，详细探讨了从扩散传输、准弹道传输到弹道传输的过渡过程。这一发现不仅为量子导电设备的设计提供了重要的尺寸限制依据，同时也为未来量子存储器和逻辑电路的开发奠定了坚实的理论基础。相关内容发表于

《Physical Review Letters》上。（张琰炯）

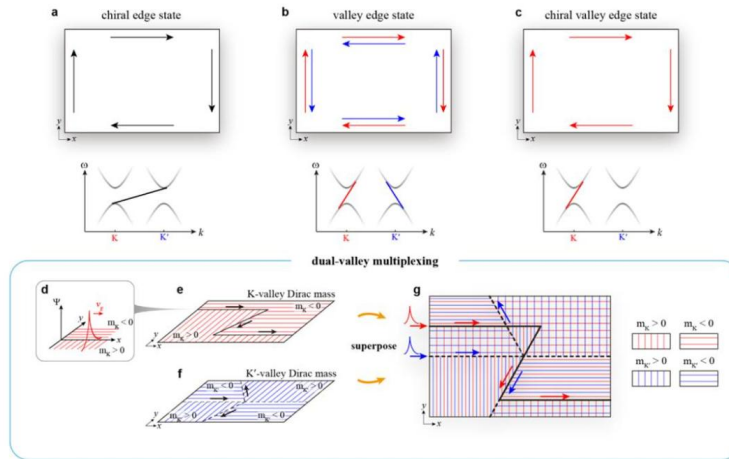


文章链接: <https://doi.org/10.1103/h82y-wds1>

## 7、基于狄拉克质量工程的手性谷边界态

谷电子学作为一种新兴的信息处理平台,利用能带结构中的谷自由度进行信息编码和存储,因其高能效和高速处理潜力而受到广泛关注。然而,由于缺陷诱导的背散射不可避免,谷极化波在传输过程中容易发生谷间散射,导致谷去极化,这严重限制了谷电子器件的实际应用。另一方面,拓扑量子霍尔绝缘体支持单向手性边界态,这些状态由于时间反演对称性破缺而具有非互易性,能够完全免疫背散射,不受缺陷和界面变形的影响。尽管如此,传统的手性边界态通常跨越整个布里渊区,缺乏谷依赖特性,无法直接用于谷偏振控制。因此,将手性边界态的鲁棒性与谷自由度相结合,不仅有望解决谷去极化问题,还能在拓扑网络中扩展可用自由度,为下一代信息处理技术开辟新路径。

近日,中山大学的董建文教授、陈文杰教授和新加坡南洋理工大学的张柏乐教授研究团队,提出了一种基于狄拉克质量工程的通用方法,实现手性谷边界态。在晶体格中,谷可被视为低能有效质量狄拉克准粒子,其拓扑性质由狄拉克质量决定。通过调控单个谷的狄拉克质量,该研究能够选择性地将手性边缘带限制在特定谷周围,从而赋予其谷依赖性。这些手性谷边界态集成了单向传播和谷极化特性,继承了量子霍尔相和谷霍尔相的优点。通过动量空间和实空间中狄拉克质量的精确工程,该研究进一步引入了谷复用功能,允许对不同谷偏振波进行独立和任意控制。为验证这一机制,研究团队在拓扑光子晶体中实现了两个关键器件:光子谷复用器和谷锁定波导交叉。实验结果表明,这些器件能够实现低串扰信号路由和鲁棒传输,显著提升了光子芯片的集成密度和性能。该研究不仅解决了谷电子学中背散射诱导去极化的根本问题,还为拓扑光子学和谷电子学的融合提供了新框架,有望在通信、计算和高密度集成领域产生广泛影响。该研究发表于《Nature Communications》。(刘梦洋)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66126-8>  
 (来源: 两江科技评论)