

超材料前沿研究一周精选

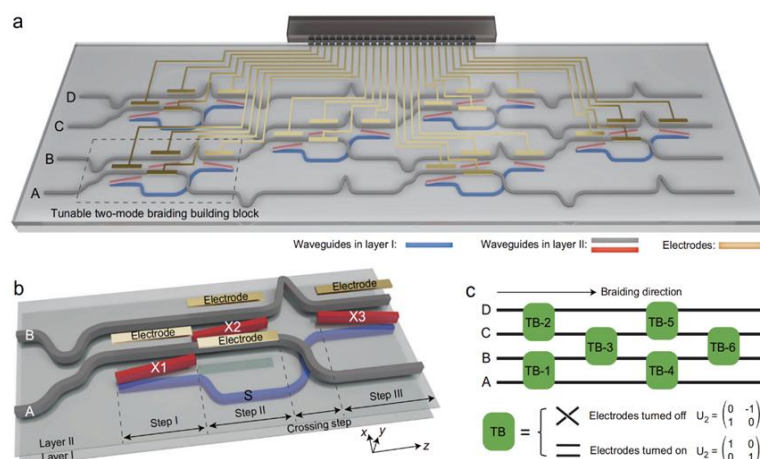
2025 年 7 月 28 日-2025 年 8 月 3 日

索引：

- 1、可重构的非阿贝尔集成光子学
- 2、基于漏波双曲极化激元的平面尾波结构
- 3、声学超材料中反螺旋边界态的观测
- 4、一种柔性热界面材料作为固态冷却的热开关
- 5、基于结点粒子的双各向异性元表面的拓扑驱动设计
- 6、高陈数莫尔带中的量子反常霍尔晶体

1、可重构的非阿贝尔集成光子学

非阿贝尔物理是当代物理学中的核心课题之一，广泛应用于基本粒子相互作用、凝聚态物理和拓扑量子计算等领域。非阿贝尔系统的特征在于其对称操作一般不对易（即群元素不可交换），由此带来诸如非阿贝尔统计和编织等独特物理现象。特别是，非阿贝尔任意子的编织过程遵循非阿贝尔 holonomy 机制，通过全局效应产生几何相矩阵，从而对噪声等局部扰动具有免疫力。近年来，非阿贝尔编织的思想被不断拓展到超越费米子系统的各种物理体系，相关的非阿贝尔 holonomy、非阿贝尔规范场、非阿贝尔拓扑绝缘体等新现象与应用也纷纷出现。光子学由于多自由度和高可控性，已成为研究非阿贝尔物理的理想平台。并且光子系统可以通过构造和调控自由度实现非阿贝尔规范场。另一方面，非阿贝尔几何相矩阵为光子学带来了新的应用前景，比如在光学计算和量子信息处理中，可以直接用来实现宽带、鲁棒的片上矩阵操作。相比传统依赖动力学相位与谐振效应的集成光子器件（如定向耦合器、环形谐振腔等），非阿贝尔 holonomy 依托系统的拓扑结构，可以实现宽带、抗扰动的新一代光子芯片。然而，为了推动非阿贝尔集成光子学的实用化发展，系统不仅要可扩展，还须具备可重构性。虽然近年来已经在多种平台上初步实现了非阿贝尔效应和可扩展的集成结构，但“可重构”的目标仍未实现，极大限制了算法编程、片上复杂操作和实际应用的发展。近日，吉林大学王希斌教授和张旭霖教授团队提出并实验实现了一种可重构非阿贝尔集成光子芯片设计方案。具体而言，研究团队在双层聚合物平台上，设计了多组可调谐双模编织单元，并通过热光效应（即电极加热调控波导折射率）灵活调控系统哈密顿量，从而调制 holonomy 诱导的几何相矩阵。通过独立调控各个编织单元，能够在同一芯片上实现多模光子模式的可重构非阿贝尔编织操作。作为概念验证，实验制作的四模非阿贝尔编织光子芯片，可通过不同的调制方式灵活生成多达 24 种属于 B_4 群的酉矩阵（即 S_4 的所有排列）。该调控机制有望推广至更多类型的非阿贝尔光子器件，为其多样化应用奠定基础。相关内容发表于《Nature Communications》上。（金梦成）

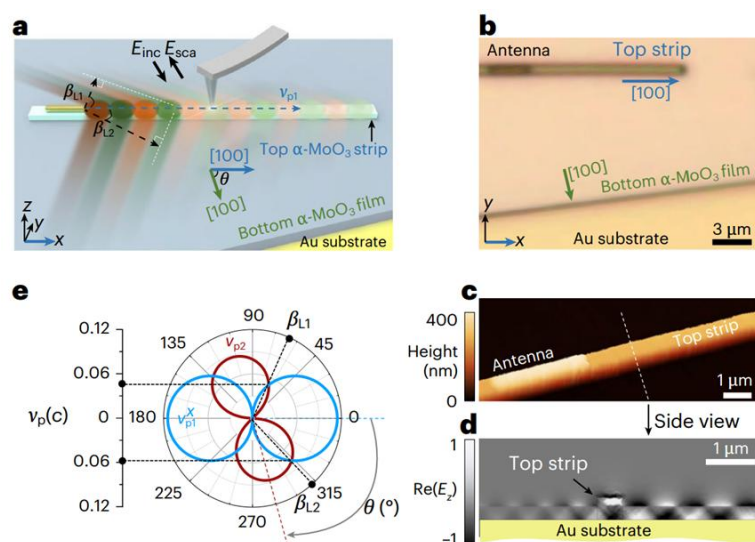


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62481-8>

2、基于漏波双曲极化激元的平面尾波结构

在光子技术迈向纳米尺度的过程中,人们一直在寻找兼具强场局域性与远程传播能力的波动模式,以推动片上光学器件的高度集成化。极化激元(polaritons)作为光与物质相互耦合后的准粒子,因其在纳米尺度内的超强场增强效应,近年来成为新一代光子学研究的焦点。其中,超各向异性材料中产生的“双曲极化激元”(hyperbolic polaritons)更因其拥有极高的光学密度态和低耗散损耗而引发广泛关注,展现出在红外成像、超分辨率成像、局域光场增强等领域的巨大潜力。然而,正因其极强的空间局域性,双曲极化激元通常局限于其激发源附近,难以有效跨越器件界面传播,严重制约其在芯片内部实现长距离连接与多器件互联的可能性。对此,传统微波领域中用于远场辐射的“漏波”(leaky waves)提供了灵感。这类波动模式可在导波过程中释放能量形成方向性明显的辐射束流,类比于船只航行在水面上形成的“开尔文尾迹”。若能将极化激元的强局域性与漏波的远程方向性结合起来,或许能开启一种全新的片上能量传输方式。

近日,国家纳米科学中心胡海副研究员,上交大戴庆教授团队以及纽约市立大学Andrea Alù教授等,成功实现了一种基于泄露型双曲极化激元的“极化尾迹波”(polaritonic wakes, PWs)。研究团队提出并验证了一种“混维范德瓦耳斯异质结构”平台:在各向异性的 α -MoO₃底膜上构造一个纳米级的 α -MoO₃条带波导,两者晶轴呈一定角度错配(即扭转异质结构),在该结构中激发出快速传播的波导极化激元。这些极化激元在传播过程中向底部薄膜泄露能量,形成沿面内传播、方向性强的干涉条纹,即二维尾迹波。这一现象可类比为二维空间中的Cherenkov辐射,是将传统漏波概念推广到双曲极化激元领域的重要尝试。更为重要的是,团队实现了对尾迹波传播方向、波前形状和频率模式的精确调控。通过改变条带与底膜的晶轴夹角,研究人员可在左右两个方向形成非对称的尾迹波,实现方向选择性控制;通过设计具有梯度厚度的波导结构,还首次演示了尾迹波的“加速”和“减速”行为,呈现出凹形或凸形的波前演化。进一步的实验证明,这种结构在单一入射频率下即可实现多模激发,为片上多通道通信提供了新思路。相关内容发表于《Nature Materials》上。(张琰炯)

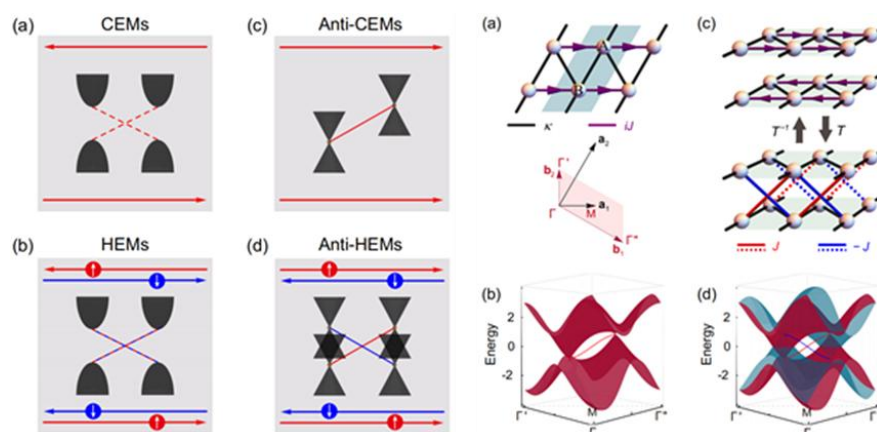


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-025-02280-0>

3、声学超材料中反螺旋边界态的观测

近年来,将凝聚态物理的基本概念引入人工晶体,极大推动了拓扑保护现象的研究进展。其中,受能带拓扑保护的单向传输特性尤为引人注目,例如:手性边缘模式 (CEMs) 和螺旋边缘模式 (HEMs)。CEMs 通常出现在如量子霍尔效应等时间反演对称性破缺的二维系统中,沿平行边界反向传播;HEMs 则出现在时间反演对称性守恒的系统中,如二维量子自旋霍尔效应,表现为两组自旋相关的反向传播边缘态。这些模式因其拓扑保护和对缺陷、无序的鲁棒性,具有广阔的应用前景。在此基础上,研究者理论提出了反手性边缘模式 (anti-CEMs),其最大特征是在两个平行边界上沿同一方向传播,打破了传统边缘态“反向传播”的认识。这一新型边缘态仅存在于无能隙体系中,在光子和电路等平台已获得实验验证。更进一步,理论上还预言了结合自旋自由度的反螺旋边缘态 (anti-HEMs),即一对时间反演相关的反手性边缘态,为调控波场和信号传输带来了新的可能性。然而,受限于模型复杂性和实验实现难度,anti-HEMs 仍未被直接观测。

近日,武汉大学邱春印教授团队提出了一种简洁而通用的反螺旋模型设计方案,并首次在声学超材料中实现了 anti-HEMs 的实验观测。具体来说,受声学赝自旋双层结构的启发,团队设计了由两个时间反演对称、彼此解耦的反手性层组成的晶格模型,每一层定义了上/下赝自旋,内部耦合为虚数形式。通过相似变换,将体系转化为仅包含实数层间耦合的模型,这一方案非常适合声学实验实现。实验中,通过相位调控实现对不同赝自旋的选择性激发,在动量空间和实空间均清晰观测到反螺旋边缘态的能谱特性和同向传播行为。所有实验数据与理论模型高度一致。这一成果不仅证实了反螺旋边缘态的存在,也为单向边缘输运和波场调控提供了新的物理机制和技术路径。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。(金梦成)



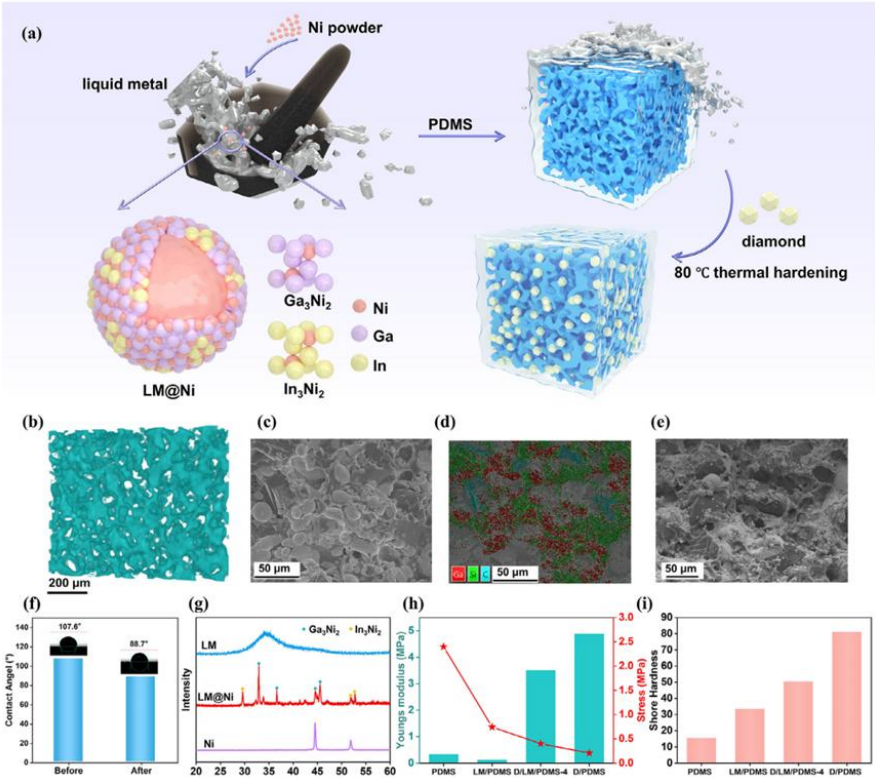
文章链接: <https://doi.org/10.1103/zclg-plnc>

4、一种柔性热界面材料作为固态冷却的热开关

随着电子器件日趋小型化、高集成、高功率密度，热管理问题已成为限制其性能和寿命的关键瓶颈。传统的散热策略如风冷、水冷、热管等，虽然在工程上已被广泛采用，但它们依赖体积庞大的机械结构，难以满足便携、微型、柔性电子器件对热调控的苛刻要求。近年来，仿照电学中“开关”与“二极管”的理念，人们提出热开关、热二极管等概念，期望在无机机械部件的前提下，主动控制热流通断，实现热管理的“智能化”。但目前热开关材料普遍存在响应速度慢、导热率变化幅度小、柔性与导热性难以兼得等技术瓶颈，亟需新型材料体系和调控机制的突破。液态金属材料（Liquid Metal, LM）因其高导热性、良好延展性和响应性成为构建新型热开关的有力候选。然而，液态金属自身的高表面张力导致其与弹性体基底如 PDMS 的润湿性差，容易发生渗漏，不利于器件稳定性与使用寿命。与此同时，利用磁响应纳米颗粒对液态金属进行调控的研究近年来也受到广泛关注，但这类系统通常依赖封闭微通道结构进行封装，增加了器件复杂度，限制了其在柔性器件中的实际应用。如何在柔性、导热、响应速度、结构简洁之间找到理想的平衡点，成为热管理领域的一大挑战。更进一步地，若能将这种主动热调控能力应用于固态制冷系统中，将有望推动无氟环保制冷技术的发展，构建下一代绿色低碳的制冷/热泵解决方案。

针对上述挑战，南方科技大学李保文教授团队提出了一种新型的磁场响应柔性热界面材料（Thermal Interface Material, TIM），实现了无需机械部件的“磁控导热开关”功能。该研究以液态金属（EGaInSn）为导热介质，通过机械研磨引入纳米镍颗粒，构建出表面合金化的 LM@Ni 网络结构，不仅显著改善了液态金属在 PDMS 基底中的润湿性与分散性，同时赋予材料良好的磁响应能力。在此基础上，研究团队进一步引入高热导的金刚石微粒作为填料，与 LM@Ni 协同构建三维导热通道，从而制备出具有高柔性、高导热性与快速响应能力的复合材料 D/LM/PDMS。其中，最佳配比样品的导热率高达 $13.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，远优于市售导热硅脂 Laird-SF840，在 LED 散热、热扩展等应用场景中展现出优异的性能表现。该材料可在外加磁场作用下发生形变，实现导热路径的“接通”与“断开”状态转换，导热率切换比高达 22，真正具备了“热开关”功能。基于此，团队将该材料与镍钛形状记忆合金（NiTi）结合，构建出全固态弹热制冷系统，成功实现无机机械运动部件条件下的热流定向控制。实验显示，在施加 800 MPa

应力条件下，该系统可实现最大 1°C 的冷却温差与最高 $81\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的冷却功率，展现出应用于微型热泵和可穿戴热管理系统的广阔前景。相关内容发表于《Advanced Functional Materials》上。（张琰炯）



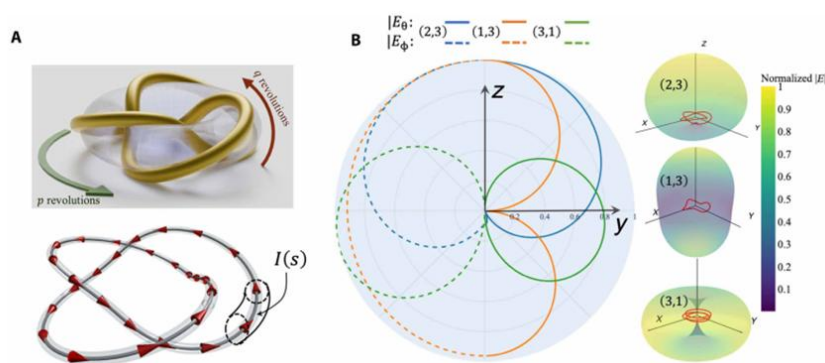
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202512421>

5、基于结点粒子的双各向异性元表面的拓扑驱动设计

双各向异性超表面因其独特的电磁场耦合特性——电场可诱导磁极化、磁场可诱导电极化，已成为调控电磁波与物质相互作用及自旋轨道现象的强大平台。其中，具有破缺镜面对称性的手性双各向异性超表面，在量子光子学、拓扑光子学及量子信息处理等领域备受关注，其诱导自旋依赖电磁场分布的能力尤为重要。在微波与毫米波频段，此类超表面通过定制电磁波的偏振、相位和振幅，实现了非对称传输、偏振转换及异常折射等新颖功能。然而，传统设计通常依赖多层架构或复杂的谐振器几何优化，设计过程繁琐且缺乏普适性。利用材料的拓扑特性为设计单层高效双各向异性超表面提供了新思路。纽结粒子因其固有的数学拓扑结构天然具有手性几何特征，其拓扑特性在连续变形下保持不变，且不同纽结构型可产生丰富的电磁响应，为突破传统设计瓶颈提供了物理基础。

近日，以色列特拉维夫大学的 Yarden Mazor 研究团队系统论证了利用纽结粒子的内在拓扑特性实现单层双各向异性电磁调控的创新方法。研究首先建立了纽结粒子的电磁辐射模型，揭示了其三维导线构型能同时激发平衡的电响应与磁响应。通过多极子分析，研究发现特定拓扑家族的纽结粒子无需复杂优化即可实现近乎完美的偏振旋转功能，其本质源于拓扑特性赋予的强手性双各向异性行为。这一发现形成了基于几何参数的简明设计规则：纽结绕数直接决定了电磁响应的平衡性，取代了传统的数值优化流程。为验证理论，研究团队采用先进 3D 打印技术实现了全三维纽结粒子超表面原型，并通过简化平面设计成功制备了基于印刷电

路板（PCB）的低损耗版本。两种实现方案均展示了高效的偏振旋转功能，其中 PCB 版本因低损耗基板性能更优。实验测量与数值模拟高度吻合，证实即使几何构型经平面化简化，只要保持核心拓扑绕数不变，其关键的双各向异性电磁功能得以保留。该工作不仅建立了从微观极化率张量到宏观有效表面磁化率的统一描述框架，揭示了拓扑特性驱动电磁响应的物理机制，更重要的是，它提供了一条基于几何拓扑原理设计单层高性能双各向异性超表面的普适路径，显著降低了先进电磁功能的实现复杂度。此项研究成果发表于《Science Advances》。（刘梦洋）



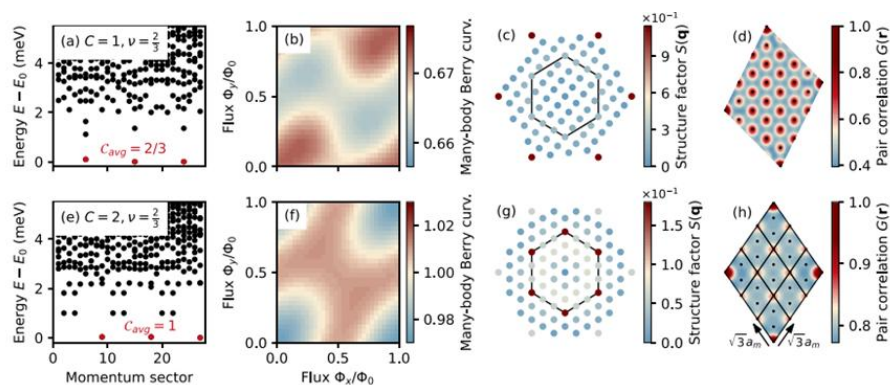
文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adx3657>

6、高陈数莫尔带中的量子反常霍尔晶体

近年来，莫尔材料的发展为探索强关联与拓扑交织的新型量子物态提供了理想平台。其中，分数量子反常霍尔效应在石墨烯及过渡金属硫化物异质结构中的理论预测与实验实现引发了广泛关注，这类分数量子反常霍尔态可在零磁场下实现量子化电导与任意子激发。然而，现有理论工作主要聚焦于陈数（ $C=1$ ）的能带，对更高陈数能带中拓扑物态的研究存在显著空白。实验上，多层石墨烯体系在分数填充因子（如 $\nu=2/3$ ）处观测到整数量子化霍尔电导，暗示了陈数 $C=2$ 的能带中可能存在自发破坏平移对称性的拓扑晶体态——即量子反常霍尔晶体（QAHC）。这种态结合了量子霍尔效应与电荷密度波特性，其高陈数能带中的稳定性机制超越了传统朗道能级物理的框架。因此，探究高陈数莫尔能带在奇数分母填充下 QAHC 的形成条件与鲁棒性，对理解超越朗道范式的拓扑物态具有迫切的理论与实验意义。

近日，瑞典斯德哥尔摩大学的 Emil J. Bergholtz、Liu hui 和 Raul Perea-Causin 研究团队，通过精确对角化计算，系统论证了在 $\nu=2/3$ 填充的陈数 $C=2$ 莫尔能带中量子反常霍尔晶体的存在性与稳定性。研究首先基于手性极限下的扭曲双层-三层石墨烯理想模型，发现该体系存在三重简并基态，其平均陈数为 1，并伴随显著的 K 点电荷序调制，形成具有整数量子霍尔电导的 QAHC 相。该结果与实验中观察到的量子化电导现象一致。更重要的是，该相在更接近实验条件的扭曲双层石墨烯（TDBG）非理想模型中同样稳定存在。研究进一步扫描了实验可控参数空间，确定 QAHC 在 $\theta \in [1.2^\circ, 1.45^\circ]$ 和 $U \in [50, 70]$ meV 范围内具有最大能隙，对应位移场 0.18 - 0.26 V/nm，为实验制备提供了明确指导。机制分析表明，QAHC 的稳定源于空穴激发的有效动能，该动能由量子度规涨落诱导的能带色散所贡献，而 $C=2$ 能带独特的量子几何性质对此起关键作用。这一发现不仅为多层石墨烯体系中的实验观测提供了理论解释，更揭示了相互作用诱导的动能

重正化在驱动拓扑晶体相中的核心角色，为探索超越传统分数量子霍尔态的新型关联拓扑物态开辟了新路径。该论文发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62224-9>
 (来源: 两江科技评论)