

超材料前沿研究一周精选

2025 年 7 月 7 日-2025 年 7 月 13 日

索引:

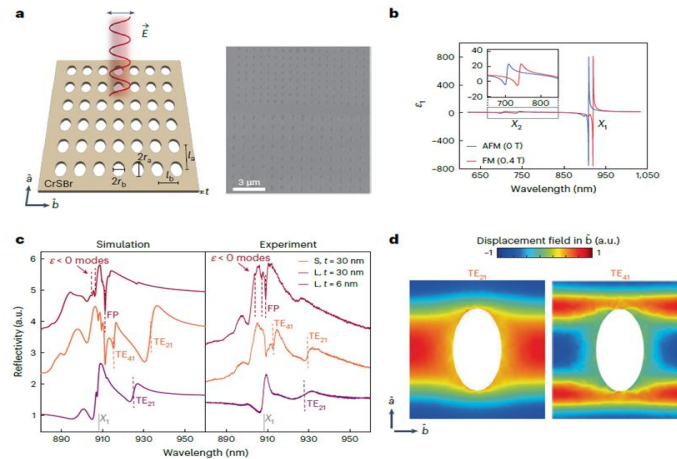
- 1、基于二维磁体的可调谐纳米光子器件与光腔
- 2、半导体腔量子电动力学实现的纳米光子量子斯格明子
- 3、PZT 光学忆阻器
- 4、声子角动量的测量
- 5、用于产生结构声场和远程动态控制的拓扑电荷复用超表面
- 6、基于反铁磁-拓扑绝缘体异质结的偏振可控太赫兹产生
- 7、用于先进热界面材料的氮化硼微米片双向组装

1、基于二维磁体的可调谐纳米光子器件与光腔

在光子学领域,利用新兴量子材料构建光子器件正成为一项极具前景的研究方向。这些材料不仅可作为整体式器件使用,也可集成进复杂结构中,实现如导模共振、激光器、超表面、超薄透镜和镜面等功能。相比传统材料,量子材料具有关联性强、自由度多、易受外场调控等特点,尤其适用于需要原位可调谐性的光子系统。在此背景下,整体式结构尤为重要,它允许光模完全驻留于材料中,从而增强光与物质模态之间的耦合强度。这一设计优于依赖邻近耦合的传统谐振腔结构,后者受限于倏逝场耦合,耦合效率较低。然而,真正实现此类器件仍面临挑战,主要包括缺乏对材料特性的系统表征以及缺少成熟的纳米制造流程。因此,开发基于量子材料的新型可调谐光子器件仍是一项关键而富有挑战性的任务。

近日,麻省理工学院的 Riccardo Comin 团队,利用 CrSBr (一种范德瓦耳斯反铁磁半导体)制备了光子晶体薄膜,并实现了其光学性质的原位调控。借助 CrSBr 在激子共振附近表现出的超高折射率以及其对外部场的高度响应性,实现了对近可见光和红外波段光子模的精确操控,展示了一种全新的纳米光子器件设计范式。所获得的导模共振在光谱中分布紧密,模体积极小,可通过外加磁场实现高度可调,品质因子(Q 因子)超过 1200。此外,这些共振模与激子自由度发生自发混合,形成内禀的强光-物质耦合。该研究结果凸显了量子材料在原位可调光子器件与光学谐振腔开发中的巨大潜力。相关工作发表在《Nature Photonics》上。

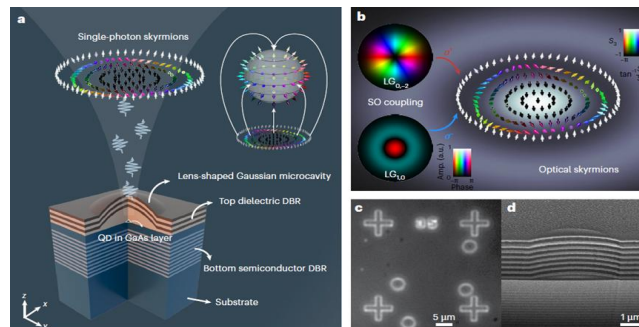
(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01712-2>

2、半导体腔量子电动力学实现的纳米光子量子斯格明子

斯格明子是一种用于描述物理中场或粒子拓扑稳定结构的模型,已在核子、液晶、玻色-爱因斯坦凝聚体及磁性材料等系统中得到验证。磁斯格明子具有高信息存储密度,而光学斯格明子可实现稳定远距离传输。将拓扑结构编码进光子可增加矢量场操控自由度,拓展信息容量,因此在光场中构造斯格明子已成为光学与光子学研究前沿。光学斯格明子最初出现在渐逝波电场和具有轨道角动量的受限电磁场中,随后被拓展到庞加莱光束的 Stokes 矢量、时空脉冲的磁矢量及人工周期结构中的赝自旋等多种形式。尽管已有大量理论与实验进展,微型化、集成化的直接发生方案因其结构紧凑、功耗低、稳定性高而备受关注。同时,探索从经典到量子尺度的光学斯格明子也为发展高维度、强鲁棒性的量子技术带来机遇。然而,目前尚未实现集成平台上具有局域拓扑结构的单光子斯格明子的直接生成。近日,中山大学的喻颖教授、刘进教授团队,利用半导体腔量子电动力学系统,首次实现了纳米光子量子斯格明子的实验生成。通过调控高斯微腔中的光子自旋-轨道耦合,获得了一种极化态呈现斯格明子拓扑特征的受限光学模式。依托显著的腔量子电动力学效应,从一个与高斯微腔确定性耦合的固态量子发射体中,成功产生并探测到单光子斯格明子。该斯格明子的极性可通过 Zeeman 效应翻转发射体的极化方向实现切换。作者还研究了在不同扰动下量子光学斯格明子的拓扑保护特性。该工作揭示了纳米尺度下量子光-物质相互作用的新维度,并有望推动具高维量子比特与大容量量子存储能力的鲁棒光子量子技术的发展。相关工作发表在《Nature Physics》上。(刘帅)

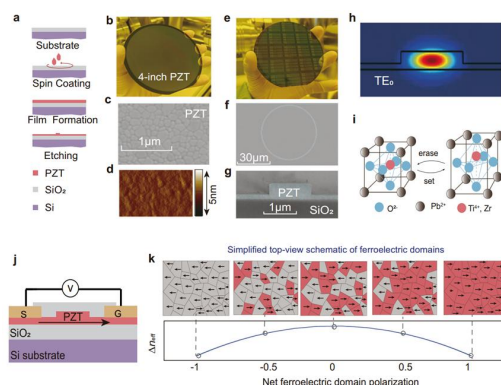


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02973-y>

3、PZT 光学忆阻器

近年来，随着人工智能与神经形态计算的迅猛发展，传统的电子器件正逐步逼近其功耗和速度的极限，迫切需要新的硬件范式来支撑大规模、低能耗的数据处理需求。在这一背景下，光学忆阻器（optical memristor）应运而生，成为融合光子学与电子学的重要技术突破。忆阻器因具备模拟突触记忆和动态调制信号的能力，被寄予厚望用于神经网络计算和高效的存内计算。然而，迄今为止，绝大多数光学忆阻器依赖于相变材料或微机电结构，这类方案虽然在体积或调制深度方面取得了一定进展，但普遍面临非易失性调控难以精确控制、加工复杂、响应速度有限、集成规模受限等挑战。例如，基于相变材料的器件需要高温脉冲驱动，存在循环寿命短和光学损耗大的问题；微机电或磁光忆阻器则面临体积庞大、调制效率低及系统集成复杂的制约。此外，部分铁电材料虽具备较好的非易失性，但其持续保持存储状态需要直流偏置供电，功耗不容忽视。如何在同一平台上兼具高精度非易失性控制与超高速易失性调制，并兼顾低损耗、低功耗与大规模集成潜力，成为制约光学忆阻器走向实用的关键瓶颈。为此，材料学与光电子领域的研究者持续探索新材料体系和新器件结构，试图打破现有技术的局限，构建满足下一代光计算、量子信息和高性能通信所需的核心硬件基础。

在这一背景下，浙江大学戴道铎教授团队携手中国科学院大学杭州高等研究院邱枫研究员，成功研发出首个基于铅锆钛酸铅（PZT）薄膜的光学忆阻器，实现了在同一器件上非易失性存储与超高速易失性调制的功能双重性。该工作利用 PZT 材料优异的铁电特性，通过电场驱动铁电畴结构，实现了无需持续偏置即可稳定维持的非易失性折射率调控，折射率变化幅度高达 4.6×10^{-3} ，可持续超过 10 万次循环。同时，器件在低于阈值电压时可依托 Pockels 效应，达到 48Gbps 的亚纳秒级高速调制，能耗低至 432 飞焦耳/比特，调制效率约 42 pm/V。这一功能双重性在此前的铁电光学器件中尚属首次报道。更为重要的是，研究团队开发了基于溶胶-凝胶工艺的晶圆级低温制备流程，实现了大面积高均匀度的 PZT 薄膜制备，器件整体光损耗仅 1.9 dB/cm，并具备与 CMOS 工艺兼容的潜力。基于该平台，研究者进一步构建了多功能光子集成电路，包括马赫-曾德干涉仪（MZI）、法布里-珀罗腔（FP cavity）、光开关矩阵和多通道可编程滤波器等，展示了高集成度和应用灵活性。实验表明，这些器件不仅能在非易失性模式下精准配置光路和补偿相位误差，还可在易失性模式下进行高比特率信号调制，极大简化了复杂光网络的校准与控制。相关工作发表在《Nature Communications》（张琰炯）。

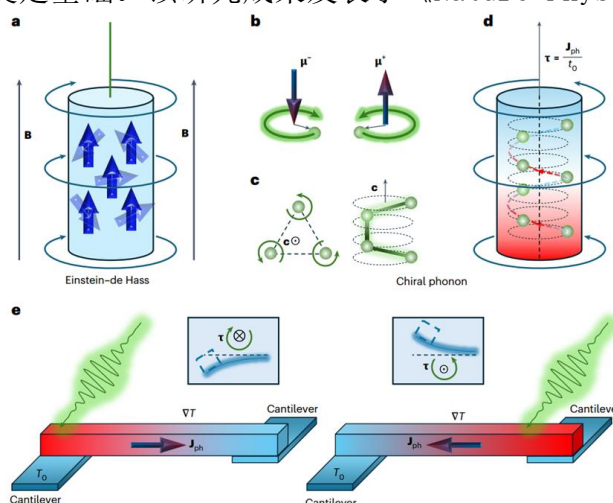


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61536-0>

4、声子角动量的测量

在凝聚态物理中，角动量与拓扑量子态（如手性超导、量子自旋液体及手性准粒子）的涌现密切相关。理论预测指出，作为微观晶格激发的声子可携带有限角动量，并赋予材料特定物理性质。然而，声子角动量此前始终缺乏直接实验证据。研究动机源于对 Einstein - de Haas 效应的拓展思考：该经典效应揭示了铁磁体中自旋角动量与宏观机械旋转的守恒关系。受此启发，理论提出在非中心对称手性晶体（如碲）中，热梯度破坏时间反演对称性可诱导声子角动量，进而通过机械力矩实现宏观守恒，此现象被称为声子 Einstein - de Haas 效应。探测这一效应不仅可验证基础量子理论，还为操纵手性声子、探索新型量子态及开发角动量相关器件提供新途径，对暗物质探测、声子磁矩调控和量子信息转换具有潜在应用价值。

近日，美国橡树岭国家实验室的 Hu Miao 博士和 Jiaqiang Yan 研究员研究团队与美国田纳西大学的 Yang Zhang 助理教授合作，首次在原型手性半导体碲晶体中实现声子角动量的直接观测。实验采用精密微悬臂梁装置：将左旋、右旋及多晶碲样品固定于悬臂梁，通过 532 nm 激光照射产生轴向热梯度以打破时间反演对称性。角动量守恒要求晶体产生补偿性机械扭矩，其方向取决于晶体手性及热梯度方向。测量结果表明：左旋与右旋单晶的悬臂梁扭矩符号相反；反转热梯度或切换晶体手性均使扭矩符号翻转；多晶样品因无净手性声子流则无此效应。低温下观测到 $10\text{--}11\text{ N}\cdot\text{m}$ 量级的扭矩，与理论模型预测一致。当温度升至远高于德拜温度时，声子角动量淬灭，扭矩响应消失。该现象与热膨胀效应存在本质区别——后者在悬臂梁上产生同向响应。理论计算进一步证实，扭矩符号规则符合声子角动量守恒要求，且其数量级与基于玻尔兹曼方程和弛豫时间近似的角动量密度估算相符。此项突破性发现为手性声子的存在提供了确凿证据，建立了声子角动量与宏观力学响应的直接关联，为拓扑声子学、手性量子态调控及角动量介导的量子转换技术奠定基础。该研究成果发表于《Nature Physics》。（刘梦洋）



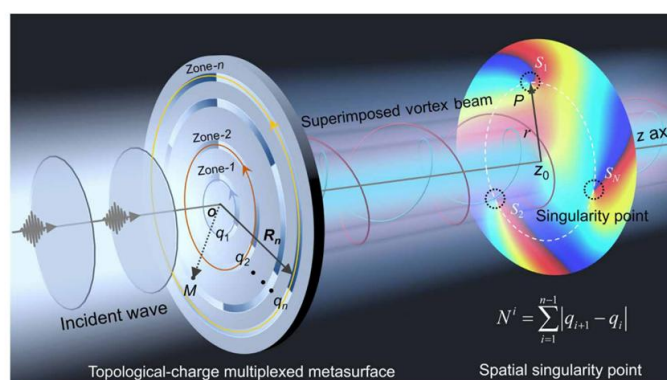
文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41567-025-02952-3>

5、用于产生结构声场和远程动态控制的拓扑电荷复用超表面

结构化声场在先进声学技术中具有关键地位，其核心价值在于通过精准控制声波的时空演化特性实现创新应用。声学涡旋作为典型代表，凭借其螺旋波前携带的

轨道角动量及相位奇点特性，在微粒操控、水下通信、生物医学传感等领域展现出独特优势。然而现有声涡旋生成技术面临双重瓶颈：传统单通道超表面受限于单一中心相位奇点，难以满足多线程操作与高容量通信需求；而多通道复用方案虽可通过叠加涡旋产生多个奇点，但普遍采用混合静态设计，一旦制备完成则空间奇点分布即固定化，缺乏实时动态调控能力。这种静态特性严重制约了声镊多目标操控、动态声编码等前沿应用的发展。突破多空间奇点按需生成与实时操控的技术壁垒，成为推动结构化声场应用的关键挑战。

近日，苏州大学的蒋建华教授、徐亚东教授、高雷教授研究团队与南京航空航天大学的伏洋洋教授团队合作，创新性提出拓扑电荷复用超表面架构，通过在单层器件上集成多个同心环形拓扑电荷分区实现突破。每个分区独立编码特定拓扑电荷值并构建离散化相位梯度，相邻分区产生的涡旋场发生相干干涉，在空间诱导形成离轴相位奇点，理论解析与实验证实：奇点数量严格遵循相邻拓扑电荷代数差绝对值规律。其核心突破在于引入机械旋转调控机制——当独立扭转各分区时，几何相位变化实现远程奇点动态操控。基于亥姆霍兹谐振单元设计的超表面原型在 3430 Hz 工作频率下，通过精密电机控制系统验证了奇点生成与旋转动力学特性，实测数据与理论预测偏差小于 5%。该技术首次在统一平台实现多奇点空间编程与实时动态控制双重功能：其干涉机制突破传统中心奇点限制，显著提升声场信息容量；非接触式动态操控为多粒子并行捕获、高速声通信编码提供全新解决方案；揭示的拓扑电荷-运动量化规律为波场调控建立普适理论框架。数值模拟进一步证实该平台在微粒三维捕获与多通道操作中的优越性能，其物理机制可拓展至电磁波、弹性波等多物理场领域，为集成化智能波控器件发展开辟道路。该成果发表于《Science Advances》。（刘梦洋）

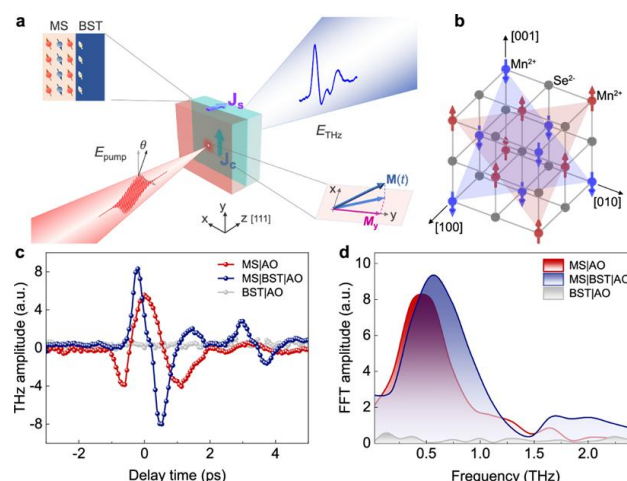


文章链接：<https://doi.org/10.1126/sciadv.adw1701>

6、基于反铁磁-拓扑绝缘体异质结的偏振可控太赫兹产生

反铁磁材料（AFM）具有很强的交换耦合作用，使其拥有超快时间尺度（THz 量级）的自旋动力学。其总磁矩为零以及在外磁场下的稳定性，使反铁磁体成为下一代高密度、高速、低能耗自旋电子学器件的重要候选材料。将 AFM 与拓扑绝缘体（TI）形成异质结，可以获得高效的自旋-电荷转换（SCC）、新颖的手性自旋输运、交换偏置和几何霍尔效应。然而此前关于 AFM/TI 结构主要集中在静态调控上，尚未在超快（THz）领域展开探索。传统的自旋电流和自旋翻转多依赖于外磁场或电场调节，相比之下，超快光激发由于其速度快、能效高、无需额外场辅助即可实现强控制的优势，成为了新的替代方案。近年来，超快 THz 发射光谱

学已成为研究自旋与电荷动力学的有力工具,已有少数关于 THz 自旋电流及电荷动力学的研究,但成功实现太赫兹发射的体系仍屈指可数。AFM/TI 结构有望同时实现快速的自旋动力学和高效的自旋-电荷转换,甚至无需外加磁场。然而,但由于缺乏晶格匹配的材料体系,目前未能实现基于 AFM/TI 的 THz 超快发射。近日,中国科学院物理研究所的赵继民,滕静研究员团队成功在 Al₂O₃ 衬底上生长出了 MnSe/(Bi, Sb)Te₃ 的 AFM/TI 异质结结构,在室温无外磁场条件下通过超快近红外光(800nm)激发诱导出瞬态磁化,实现了超快 THz 脉冲发射。实验发现,该 THz 发射由两种机制主导,分别是:由瞬态磁化产生的磁偶极辐射,以及自旋-电荷转换驱动的电偶极辐射(即自旋电流注入 TI 层,通过逆 Rashba-Edelstein 效应转化为电流,发射 THz)。同时,通过改变激发光的偏振角度,能在 1 - 3 THz 频段实现 THz 偏振态从线偏振到椭圆、圆偏振的过渡,且圆偏振度接近理想值。该结构通过超快操控反铁磁有序状态与拓扑表面态的耦合,为调控 THz 发射频率、强度和偏振提供了独特平台,并展现出对外磁场的高度鲁棒性、低能耗以及超快可控性,是未来高速、自旋操控的 THz 光源与探测器的有力候选。相关内容发表于《Nature Physics》上。(侯玥盈)



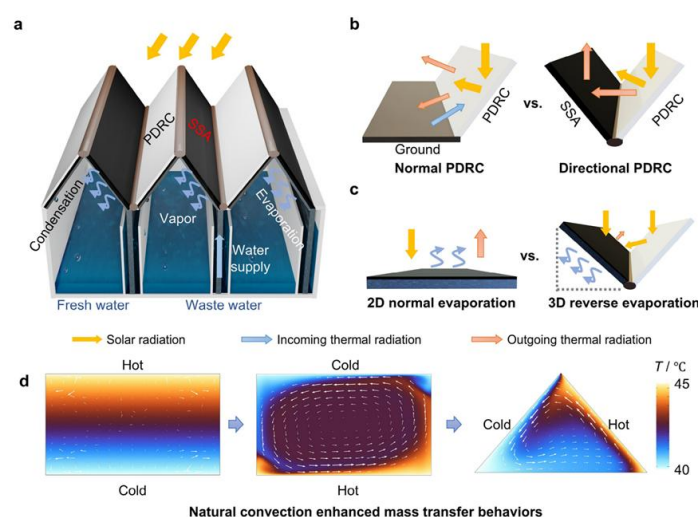
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60060-5>

7、用于先进热界面材料的氮化硼微米片双向组装

在全球水资源日益紧张背景下,如何高效、安全且低成本地获取清洁水源,已经成为国际社会普遍关注的重大课题。据联合国儿童基金会统计,每年有超过三分之二的人口至少在一个月内面临严重的水资源短缺,饮用水安全直接影响人类健康和社会稳定。近年来,借助太阳能蒸发实现被动淡水采集,因其无需外部能源、环境友好等特性,逐步成为科研领域的重要研究方向。然而,尽管已有众多研究在太阳蒸发端实现了较高的水蒸发速率,单级结构下的水收集效率依旧偏低,主要瓶颈在于蒸发-冷凝过程中热质传递的耦合受限及冷凝端的潜热耗散不足。传统方法往往需要将太阳选择性吸收器(SSA)和被动日间辐射冷却(PDRC)垂直朝向天空,才能获得理想的加热和冷却效果,但这种布局缺乏方向性设计,容易导致系统集成效率下降。此外,水汽冷凝过程中,冷凝表面润湿性、几何结构和亚冷却能力密切影响水滴的成核和剥离,而现有研究多集中于局部材料或结构优化,尚缺乏一种系统性集成蒸发与冷凝、兼顾自然对流与方向性辐射管理的高效水收集解决方案。如何突破这一长期制约,是提升被动水收集性能、助力解决

淡水短缺的关键科学问题。

近日，中南大学陈梅洁副教授团队与长江大学李庆教授合作，提出并构建了一种创新性的混合方向性辐射冷却与太阳加热的被动水收集系统，在集成系统层面打破了蒸发与冷凝分隔设计的瓶颈，显著提升了热质传递与水汽循环效率。该研究通过光子学与界面工程协同，实现了蒸发端和冷凝端的光谱选择性调控：在太阳加热端，制备出高太阳吸收率（0.94）、低中红外辐射率（0.07）的柔性 SSA，有效增强光热转换效率；在冷凝端，采用高太阳反射率（0.94）和高远红外辐射率（0.92）的 PDRC 涂层，显著提升冷凝面的热耗散能力。系统创新性地引入 V 形空间布局，将蒸发与冷凝界面反向分布，并通过三维倒置蒸发结构强化自然对流驱动，实现蒸发、运输、冷凝过程的空间解耦与热管理优化。同时，冷凝面设计了超亲水单侧非对称通道，实现了液滴高效定向迁移和快速剥离，有效克服了传统平面或对称通道结构的液滴滞留问题。在室内一倍太阳光照强度下，该系统实现了 $2.62 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ 的水收集率；在室外自然光强（ 715 W/m^2 ）条件下，水收集率达到 $2.76 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ ，显著超过以往报道的单级结构（约 $0.2 - 1.125 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ ）。这一完全无能耗的被动水收集装置，不仅在功能集成与性能指标上均达到国际领先水平，更在材料成本（约 160 元/m^2 ）和工艺简便性方面具备良好的推广前景。相关内容发表于《Advanced Functional Materials》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202507761>

（来源：两江科技评论）