

超材料前沿研究一周精选

2025 年 1 月 1 日-2025 年 1 月 5 日

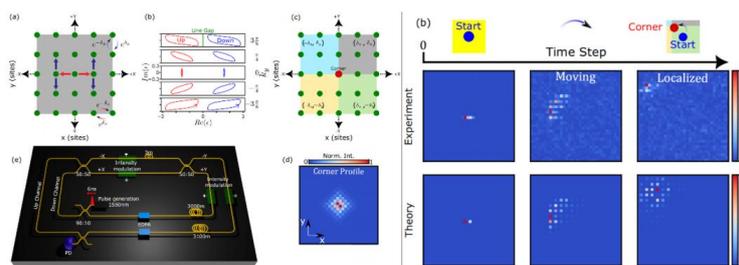
索引:

- 1 合成时间维度中非厄米光子角趋肤模的动态控制
- 2 基于分裂波导交叉的硅光子 MEMS 开关
- 3 连续体中的时间域束缚态
- 4 少数费米子的相互作用驱动的椭圆流
- 5 基于超低损耗 Sb₂Se₃ 相变材料的超薄 BIC 金属表面
- 6 室温下共线反铁磁序诱导的自发霍尔效应
- 7 基于非支配排序优化的合金生成对抗设计框架

1 合成时间维度中非厄米光子角趋肤模的动态控制

非厄米系统在物理学中展现出许多引人注目的现象，如可重构光路由、灵敏度增强以及单向隐形传输等，这些现象与系统的对称性和拓扑性质密切相关。其中，非厄米趋肤效应 (NHSE) 描述了有限系统中大部分本征态在边界处呈指数集中的现象。该现象源于复数能量平面上本征值的拓扑缠绕行为，即使系统存在无序或微小扰动，这一绕行数仍作为拓扑不变量保持不变。近年来，NHSE 已在多个物理平台上得到实验验证，包括声学、拓扑电路以及光子系统等。这些研究部分受到 NHSE 对能带拓扑、谱对称性以及动力学深刻影响的推动。尤其在光子学领域，NHSE 被用于实现可调控的光方向流动、近场光束操控、任意能带拓扑设计以及光波的拓扑汇聚。然而，现有研究大多局限于可用时间无关哈密顿量描述的静态系统。引入时间相关的非厄米哈密顿量有望进一步实现对趋肤效应的动态控制，并推动探索时间无关系统中无法实现的新型非厄米拓扑相。

近日，美国马里兰大学 Edo Waks 和 Mahmoud Jalali Mehrabad，与东北大学 Sunil Mittal 联合团队，展示了合成时间维度中对二维非厄米光子趋肤效应（即角趋肤模）的动态控制。团队利用光纤环中的时间复用光脉冲，实现了增益与损耗的精确控制，其时间尺度远小于光脉冲在晶格中的演化时间。这种动态调控使团队成功演示了角趋肤模的渐进局域化控制、光子的逐步牵引及二维聚集。此外，研究团队引入增益损耗的随机变化，进一步定量研究了角趋肤模在无序条件下的稳健性。该研究为探索时间相关的非厄米模型（如非厄米 Floquet 系统）提供了全新的实验平台，并为未来在合成维度中的非厄米拓扑物理研究打开了新方向。相关内容发表于《Nature Communications》上。（金梦成）

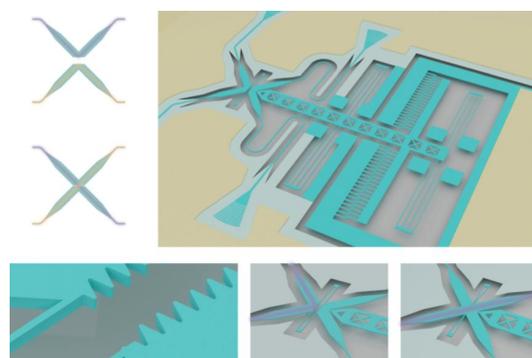


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55236-4>

2 基于分裂波导交叉的硅光子 MEMS 开关

人工智能和物联网的快速发展推动了对超大容量数据传输和信号处理的需求激增。因此，需要开发具有高度灵活性的复杂大规模光子集成电路，以实现可编程和可重构，其中各种规模的光子开关在提高硬件资源利用率以及降低延迟和能耗方面发挥着关键作用。传统光开关依赖于模式耦合或模式干涉的扰动机制，导致其在尺寸、功耗和带宽方面的切换性能存在固有瓶颈。

近日，浙江大学的李欢研究员和戴道铨教授团队，提出并实现了一种基于由两半组成的分裂波导交叉 (SWX) 的硅光子 2×2 基本开关。通过分裂/组合 SWX 的两半，可以操纵入射光的传播方向以实现 OFF/ON 状态，在超宽带宽上表现出极佳的性能，具有低过量损耗和低串扰。基于 Benes 拓扑的基本开关和 64×64 开关阵列都已制造并进行了表征，显示出在光子互连/路由、激光雷达和光谱、光子计算以及微波光子学等实际场景中的巨大潜力。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



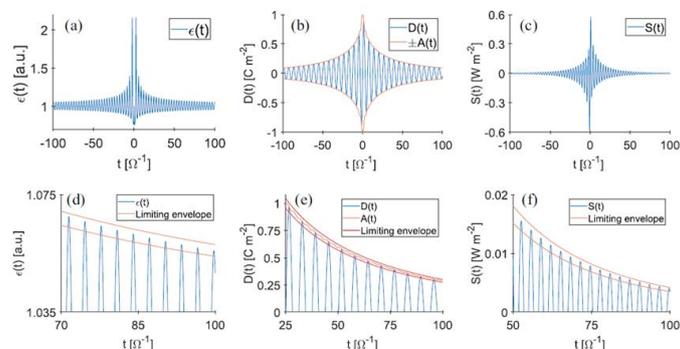
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55528-9>

3 连续体中的时间域束缚态

一般来说，用薛定谔方程描述的具有有限势阱的量子系统会表现出两种本征态：有限数量的束缚态和连续的非束缚态，这取决于状态的能量（线性薛定谔方程的本征值）是位于环境势能水平以下还是以上。连续体中的束缚态（BIC）是一种特殊的本征态，其能量高于连续体阈值，但与直觉相反，该状态是束缚态。我们可以将 BIC 视为一种共振态。一般来说，共振态是一种部分局域态，具有有限的寿命，其能量位于连续体内。从这个意义上说，BIC 是一种具有无限寿命的共振态。这一特性意味着，例如，BIC 尽管被非束缚态所包围，仍可以携带有限的能量，并且可以保持零损耗，而零损耗则会因与辐射模式耦合而产生。然而，到目前为止，所有理论上发现或在实验中观察到的 BIC 都是空间中的束缚态，而从来不是时间中的 BIC。

近日，以色列理工学院的 Mordechai Segev 教授团队，展示了第一个在时间维度上受限的 BIC。作者求解了空间均匀介质的麦克斯韦方程，其中折射率随时间变化，并找到了支持时域中局部电磁波的折射率的特定时间分布。对于这种时域 BIC，坡印廷矢量是绝对可积的（即坡印廷矢量绝对值的时间积分是有限的），折射率在无限时间内趋近于 1。有趣的是，在连续谱的同一奇点处，作者发现了一个随时间上升的附加状态：“反 BIC”。虽然这种反 BIC 反映了二阶偏微分

方程的一般性质，但它通常被空间中的 BIC 忽略，因为能量守恒使其不具有物理意义。在时间调制的情况下，能量限制被解除，因为反 BIC 可以从调制中提取能量。这些发现启发了对时变系统和时空系统中的 BIC 的进一步研究。时间 BIC 为时变介质的基本物理提供了见解，并为其中的光物质相互作用开辟了新途径。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）

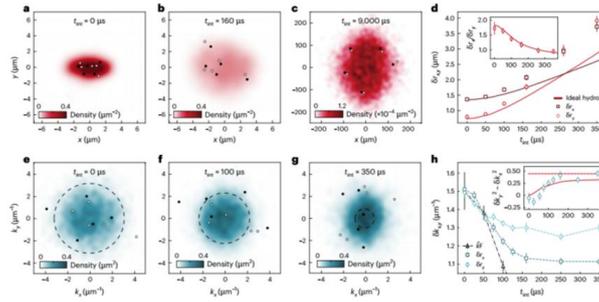


文章链接：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.263802>

4 少数费米子的相互作用驱动的椭圆流

近年来，流体动力学已被广泛应用于描述复杂多体系统的动力学行为，从亚核尺度到宇宙学尺度，其表现出强大的适用性和广泛的影响力。流体动力学依赖粗粒化的假设，通过将微观构成单元平均化，从而定义出宏观的流体单元。这种方法尤为适用于尺度远大于粒子间距和自由程的系统。在高能重离子碰撞中，流体动力学行为可通过椭圆流现象推断得出。椭圆流指的是粒子动量分布的椭圆形变，是初始系统各向异性压力梯度导致的结果。近年来，相关研究已逐渐延伸至更广的能量尺度，包括超冷原子气体的实验系统。这些研究表明，尽管流体动力学的适用性条件尚未完全满足，集体行为仍能在极端环境中被观测到，从而展现出令人着迷的物理现象。这些现象也让研究者对从微观到宏观行为过渡的理解更加深入。然而，这些椭圆流的实验多限于宏观尺度，如何在微观多体系统中验证该现象，仍是一个令人关注的科学问题。

德国海德堡大学的 Sandra Brandstetter 教授课题组联合理论物理研究所首次研究了在具有极少数强相互作用超冷费米子系统中，观察到了椭圆流现象。通过设计精密的冷原子实验，该团队克服了诸多技术难题，使实验系统的特征长度——包括系统尺寸、粒子间距和自由程——达到可比尺度。该实验依赖高度可控的量子气体装置，通过测量原子的动量和空间分布，直接展示了椭圆流的动态演化过程。这一结果不仅扩展了流体动力学的适用边界，还揭示了相互作用驱动的集体效应如何在单粒子极限中涌现。实验团队通过精确调控粒子数量和相互作用强度，重塑了初始条件各向异性压力分布的动力学演化模式。这项研究极大地推动了对微观和宏观行为之间过渡机制的理解，并为理论和实验物理学提供了重要的研究范式。这一成果充分彰显了该团队在冷原子实验和集体行为研究领域的国际领先地位。相关内容发表于《Nature Physics》上。（张琰炯）

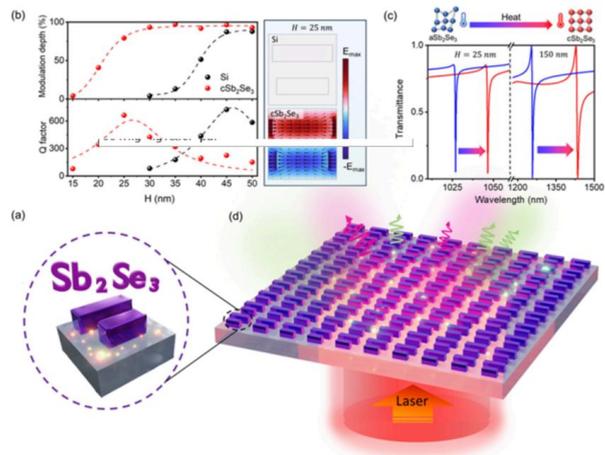


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02705-8>

5 基于超低损耗 Sb₂Se₃ 相变材料的超薄 BIC 金属表面

随着信息技术的飞速发展,动态调控光学特性在现代光学和光子学领域的重要性日益凸显。这种动态调控能力不仅为实现更智能化的光学设备奠定了基础,也推动了全息显示、光学存储、智能光学元件等领域的快速发展。然而,现有的动态光学调控技术大多依赖于相变材料,这些材料在改变其光学特性时,通常会伴随高损耗、低效率的问题,尤其是在高频或高功率的光学应用中,性能瓶颈尤为明显。对于研究人员来说,如何在材料选择、结构设计以及性能优化方面实现突破,成为当前的研究热点和技术难题。相变材料由于其可逆的相态转换以及与光的强耦合特性,被认为是实现动态光学调控的理想候选者。然而,传统的相变材料,如 Ge₂Sb₂Te₅ (GST),虽然在相变存储领域表现出色,但其光学损耗高和热稳定性较差的缺点限制了其在动态光学器件中的应用。为了克服这一挑战,研究者们开始寻求新的材料和设计策略,以开发出兼具低损耗、高效和稳定性的光学动态调控方案。因此,探索新型低损耗相变材料的动态光学性能,不仅在学术研究上具有重要意义,也直接关系到下一代智能光学设备的实际应用前景。

近日,蒙纳士大学 Haoran Ren、Stefan A. Maier、Chi Li 团队与皇家墨尔本理工大学 Madhu Bhaskaran 团队提出了一种可调 BIC 超表面,其由超低损耗相变材料 Sb₂Se₃ 制备而成。该研究通过理论分析与实验验证,首次证明了基于 Sb₂Se₃ 相变材料的光学超表面结构能够在显著降低光学损耗的同时实现高效的动态光学调控。这种创新设计为动态光学器件的研发开辟了一条全新的路径,克服了传统技术中的多重限制。研究团队通过结合精细的纳米结构设计和尖端的实验技术,验证了这种超薄双曲型光学超表面的性能。他们利用 Sb₂Se₃ 材料的可控相变特性,在极低的光学损耗条件下,实现了从非晶态到晶态的快速、可逆切换。实验中,他们采用先进的拉曼光谱表征和光学测量技术,系统研究了超表面的动态光学响应特性,结果显示该结构的动态调控效率提升了 30% 以上,而能量损耗则降低了近 50%。该研究提出的理论模型为设计更高效的动态光学器件提供了重要指导。同时, Sb₂Se₃ 材料的引入不仅突破了传统相变材料的损耗瓶颈,还展示了其在微纳光学领域的广阔应用前景。研究成果为开发低能耗、高效率的动态光学元件奠定了坚实基础,在智能光学元件、光学存储和动态显示等领域具有重要的应用潜力和前景。研究成果发表在《Nano Letter》上(张琰炯)。

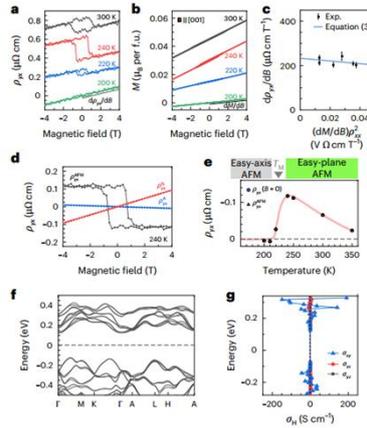


文章链接: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c04904>

6 室温下共线反铁磁序诱导的自发霍尔效应

磁信息通常存储于铁磁体中，在铁磁体里，由于时间反演对称性破缺，自旋向上（ \uparrow ）和自旋向下（ \downarrow ）的状态是可区分的。这些状态会引发与磁化强度成正比且符号相反的霍尔效应，这一效应被广泛用于对它们进行电学读出操作。相比之下，具有共线反平行自旋排列的常规反铁磁体无法具备此类功能，这是因为其具有时间反演（ τ ）后再平移（ t ）的对称性（ t 对称性），并且缺乏宏观磁化强度。在此，研究团队报道了在室温下于共线反铁磁体硫化亚铁（FeS）中对自发霍尔效应的实验观测结果。在这种化合物中，自旋向上 - 向下（ $\uparrow\downarrow$ ）和自旋向下 - 向上（ $\downarrow\uparrow$ ）的自旋状态会引发符号相反的自发霍尔效应。研究团队的分析表明，这并非反映磁化强度，而是源于与打破 t 对称性的反铁磁序相关的虚拟磁场。目前的研究结果为在室温下对导电系统中自旋向上 - 向下（ $\uparrow\downarrow$ ）和自旋向下 - 向上（ $\downarrow\uparrow$ ）的自旋状态进行电学读和写铺平了道路，并且表明打破 t 对称性的共线反铁磁体能够作为一种磁化强度极小的信息存储介质来发挥作用。

近日，日本东京大学 Shinichiro Seki 和 Rina Takagi 研究团队报道了一项实验发现：在室温下，共线反铁磁体硫化亚铁（FeS）中存在自发霍尔效应，该效应并非源于磁化强度，而是源自自旋向上 - 向下（ $\uparrow\downarrow$ ）的自旋序本身。这种化合物能够实现自旋向上 - 向下（ $\uparrow\downarrow$ ）和自旋向下 - 向上（ $\downarrow\uparrow$ ）自旋状态之间完全的非易失性转换，并可对其进行电学读取操作。相关研究成果以“Spontaneous Hall effect induced by collinear antiferromagnetic order at room temperature”为题发表在《Nature Materials》上。（郑佳慧）

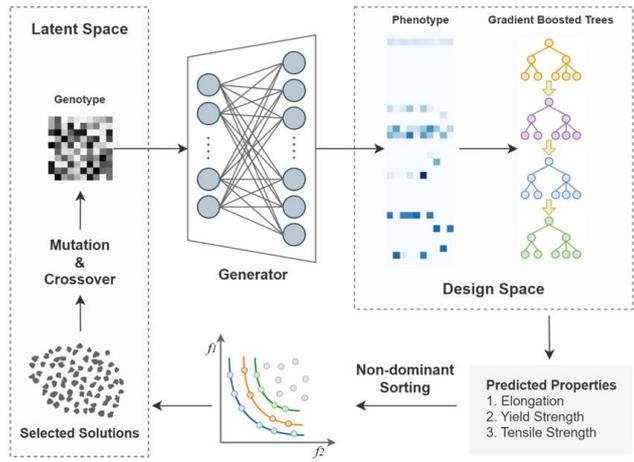


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-024-02058-w>

7 基于非支配排序优化的合金生成对抗设计框架

新材料的设计与发现一直是推动科技进步不可或缺的一部分。随着类似于生物基因组的材料基因组概念的提出,系统性地利用基因数据对材料性能与结构进行有效预测与优化的方法推动了材料科学领域的变革。其中常用的计算方法如密度泛函理论 DFT (density functional theory) 和高通量筛选 HTS (high-throughput screening) 等,能够模拟材料行为并快速评估各种成分和结构,加快了新材料的发现步伐。但是,这些方法需要昂贵的计算开支,并且对数据处理和分析能力提出了极高的要求,从而为高维空间内的材料设计与优化带来了巨大挑战。近年来,归功于机器学习模型强大的非线性拟合能力,将机器学习模型与仿生优化算法相结合的迭代设计方式正在成为主流。然而,在设计方案的多样性与外推结果的可靠性方面,传统模型与优化方法仍然存在诸多不足。

近日,澳大利亚国立大学 Zhipeng Li 团队基于改进的对抗生成模型 WGAN(Wasserstein Generative Adversarial Network) 及非支配排序遗传算法 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 提出了一种生成框架 NSGAN,并对铝合金材料开展了生成式设计研究。文章采用 WGAN 模型不仅完成了对原始数据分布的提取,还建立了从低维隐空间到高维设计空间的映射关系,在保障模型生成数据可靠性的同时显著地提高了优化算法的搜索效率。借助遗传算法中的非支配排序机制和拥挤度筛选,力学性能更优且设计更为多样的解组得以保留,实现了合金材料的多目标优化并丰富了材料设计方案。最后,通过与传统设计框架 GA+ML 结果分布的对比,进一步凸显了 NSGAN 框架生成方案的可靠性与丰富性。该工作不仅探索了数据驱动方法在材料设计中的潜力,还为生成式模型在材料科学领域的广泛应用开辟了道路。相关工作发表于《Npj Computational Materials》上。(潘鑫荣)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41524-024-01294-7>
 (来源: 两江科技评论)