

超材料前沿研究一周精选



2026年7月1日-2026年7月5日

索引:

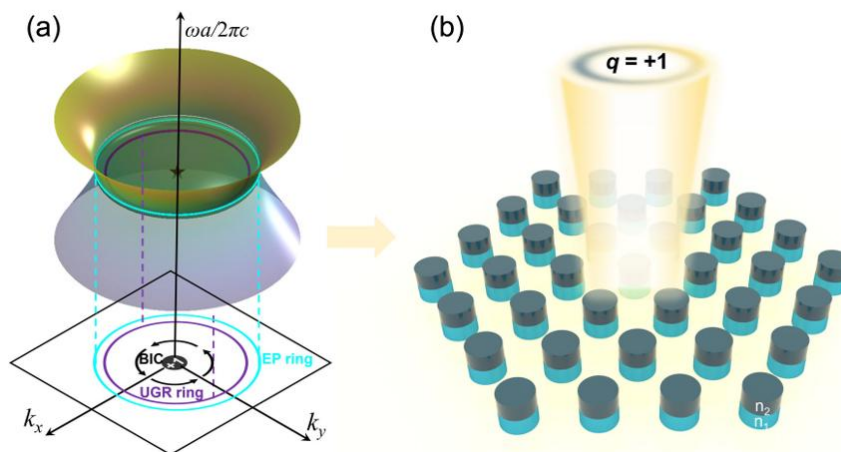
- 1、各向同性带间耦合诱导的单向导模共振连续环
- 2、由光驱动能带反转在 SnTe 中诱导的 Floquet 拓扑态
- 3、时间复用型全可重构光子处理器中实现量子 C-NOT 门
- 4、基于片上超构光学的自旋选择性手性发光与非相干聚焦
- 5、非线性非厄米趋肤效应中的局域反转与谐波生成
- 6、通过氧化物薄膜压印动态不对称应变到基板上
- 7、一种天然可编程超材料调控复眼的三维曲率
- 8、利用熵设计高性能热电器件

1、各向同性带间耦合诱导的单向导模共振连续环

动量空间中的拓扑偏振奇点，如连续域束缚态（BIC）、圆偏振态（C点）和单向导模共振（UGR），是近年来光子学的重要研究方向。BIC作为开放体系中的非辐射共振模式，具有极高Q因子和拓扑电荷，可增强光物质相互作用并用于涡旋光束、发光增强和非线性转换。通过破缺不同对称性，BIC可演化为C点或UGR。UGR具有受拓扑保护的单向辐射特性，是实现片上定向发射的重要机制。已有研究主要实现离散UGR，通常来源于各向异性耦合；而连续UGR环需要严格的各向同性带间耦合，尚未被充分探索。

近日，清华大学宋清华教授研究团队，利用六角晶格双层圆柱结构，在动量空间中实现了连续的单向导模共振（UGR）环。初始状态下，体系保持面外镜面对称性，横电（TE₁）模式与横磁（TM）模式相互正交，带间耦合被禁止；同时，TM模式在 Γ 点表现为拓扑电荷为+1的连续域束缚态（BIC），且两种模式在 Γ 点附近均具有各向同性等频轮廓。通过引入上下层折射率扰动破缺面外镜面对称性，体系产生各向同性带间耦合，从而形成连续UGR环。值得注意的是， Γ 点处TM模式的BIC在该对称性破缺下仍保持稳定。结合UGR环的单向辐射特性与BIC的拓扑性质，可产生单向涡旋光束，并可通过调控UGR环半径实现涡旋光束半径的可调控制。

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



文章链接:

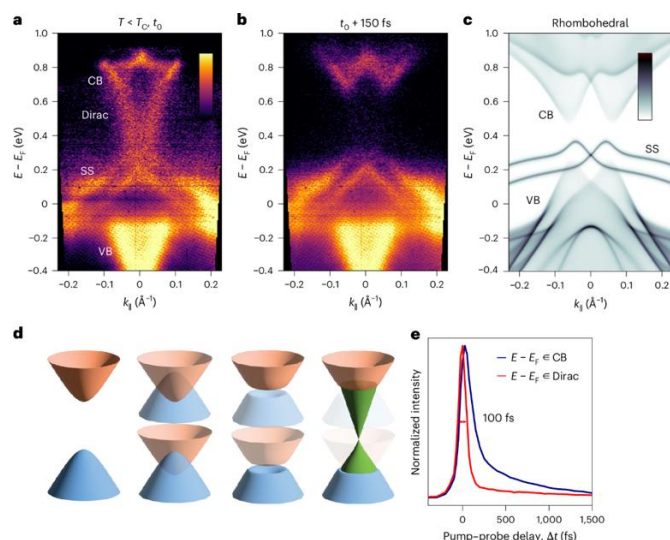
<https://doi.org/10.1103/qlgy-fj7k>

2、由光驱动能带反转在 SnTe 中诱导的 Floquet 拓扑态

Floquet 工程是一类极具前景的研究范式，它利用光场调控固体中的电子结构，进而实现具有定制化功能的非平衡物态。时间分辨角分辨光电子能谱能够以动量分辨的方式，直接探测强光场作用下材料的瞬态电子结构，因而成为观测此类效应的核心手段。2016 年，该技术成功捕捉到半导体 Bi_2Se_3 中的 Floquet-Bloch 态，并证实光场诱导的能带相互作用可形成避免交叉能隙。与此同时，寻找具有新颖拓扑性质的材料一直是凝聚态物理的重要方向，这类材料在自旋电子学和量子计算领域展现出巨大潜力。上述两条研究线索交汇于一个根本性问题：能否利用相干光场驱动，使材料从平庸态转变为拓扑态，即实现所谓的 Floquet 拓扑绝缘体？2011 年，理论工作曾提出在强自旋-轨道耦合的直接带隙半导体中生成此类拓扑相的方案，然而其实验验证迄今尚未取得突破。

近期，弗里堡大学 F. Chassot 教授、C. Monney 教授与西波希米亚大学 J. Minár 教授团队合作，报道了飞秒光脉冲在极性半导体 SnTe 中诱导一种寿命极短的拓扑态，该态在平衡基态中并不存在，且仅在光激发能量接近材料带隙时方可实现。研究团队同时观测到能带色散的重整化现象，这为拓扑态相关的 Floquet 态生成机制提供了关键证据。这项工作首次实现了对 Floquet 拓扑态的直接实验观测，并揭示其源于 SnTe 中光致能带反转；尽管该态的完整物理图像仍有待进一步的理论研究加以细化，但本工作已明确展示了按需调控半导体拓扑性质的可行性。

该研究发表于《Nature Physics》。（金梦成）



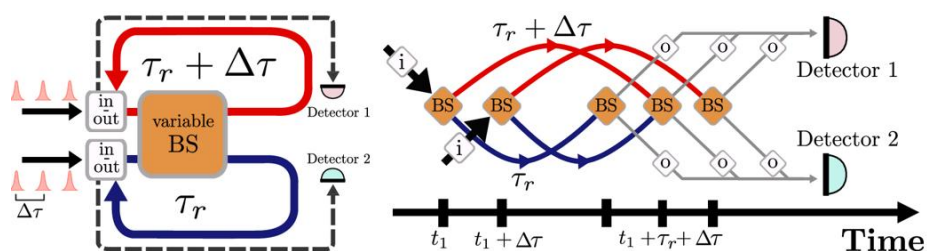
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-026-03341-0>

3、时间复用型全可重构光子处理器中实现量子 C-NOT 门

在构建量子计算机的诸多物理范式中，光子量子计算=凭借高环境隔离度、长相干时间以及单比特状态易于操纵等独特优势，一直是备受关注的前沿路线。其中，受控非门（C-NOT）因其能够产生量子纠缠，是构建通用门型量子电路不可或缺的基石。然而，光子天然不发生相互作用的物理特性，使得双比特量子门的实现面临巨大挑战。传统方案通常依赖复杂的空间路径或极化编码，导致硬件元件数量随系统规模呈几何级数增长，芯片的规模化扩展极为困难；而此前的时间编码方案，要么无法摆脱对多空间模式的依赖，要么受限于静态光学元件而缺乏快速重构与前馈控制能力。

近日，德国帕德博恩大学 Federico Pegoraro 教授团队在基于快速电光调制器的时间复用实验平台上实现了光子 C-NOT 门，该平台可通过编程动态配置为时域光学干涉仪。研究采用的架构将单一空间模式与时间复用量子比特相结合，不仅展现出向多模式乃至多量子比特扩展的潜力，还具备完全且快速的动态重构能力。利用该平台，研究团队成功推进了相关线性光学方案的落地，并通过高精度重建 C-NOT 门真值表验证了其工作性能，实验结果与理论预期高度吻合。此外，该研究进一步证明了该系统兼具执行双比特 C-NOT 操作与单量子比特任意旋转的高灵活性。通过在时域上动态组合这些基本门单元，团队成功构建出能够全决定性生成四种贝尔态的量子电路。这一系列实验结果表明该时间复用 C-NOT 门的强纠缠制备能力，更展示了全可重构时间复用方案作为通用光量子计算平台的卓越适用性与发展前景。

该研究发表于《Nature Communications》。（金梦成）



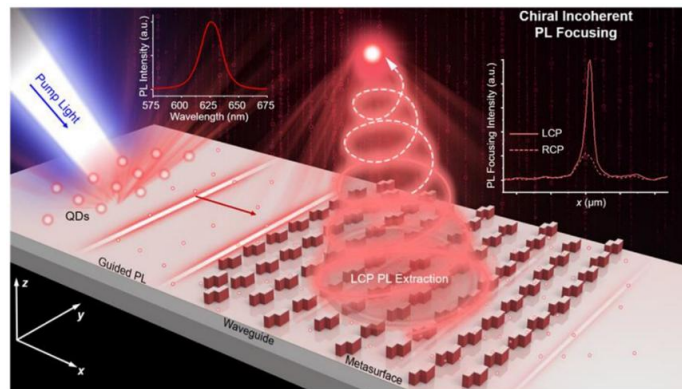
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-74861-9>

4、基于片上超构光学的自旋选择性手性发光与非相干聚焦

手性是自然界中普遍存在的重要特征,在化学分析、生命科学与药物筛选等领域具有基础意义。光子学中的手性光致发光因能够携带圆偏振信息,已成为手性传感、生化检测、微型圆偏振光源、量子信息处理和光学加密的重要资源。近年来,自由空间超表面已经能够通过精细调控光场与物质相互作用来增强发光强度并控制发光方向与手性。然而,面向可扩展集成光子系统时,发光材料通常被集成在波导与纳米结构阵列中,光致发光需要先在片上传播,再与超构单元耦合并辐射到自由空间,使高圆二色性发射和手性相位调控难以直接套用自由空间方案。因此,发展可在集成平台中同时实现高选择性手性发光和波前塑形的办法,是推动下一代手性光子芯片的关键动机。

近日,武汉大学李仲阳教授、时阳阳博士研究团队提出并实验实现了一种片上手性发射超表面平台,将量子点发光层、氮化硅波导和具有平面手性的硅超构单元结合起来,使非相干光致发光在片上传播后被选择性耦合到自由空间。通过同时打破超构单元的面内镜面对称性和二重旋转对称性,该平台实现了圆偏振选择性的单向发光,在实验中获得较高圆二色性,同时保持较窄的发散角和较大的衍射角。进一步地,研究利用超构单元的空间位移引入迂回相位机制,使非相干导模光致发光不仅能被筛选出特定自旋分量,还能被塑造成手性聚焦光场。该工作的重要意义在于把空间相干性工程、自旋选择性和手性波前调控压缩进同一片上结构中,显著扩展了发光型集成超表面的功能边界,为紧凑圆偏振光源、片上手性传感以及新型光子集成电路提供了可扩展的实现路径。

该文章发表于《Advanced Functional Materials》。(刘梦洋)

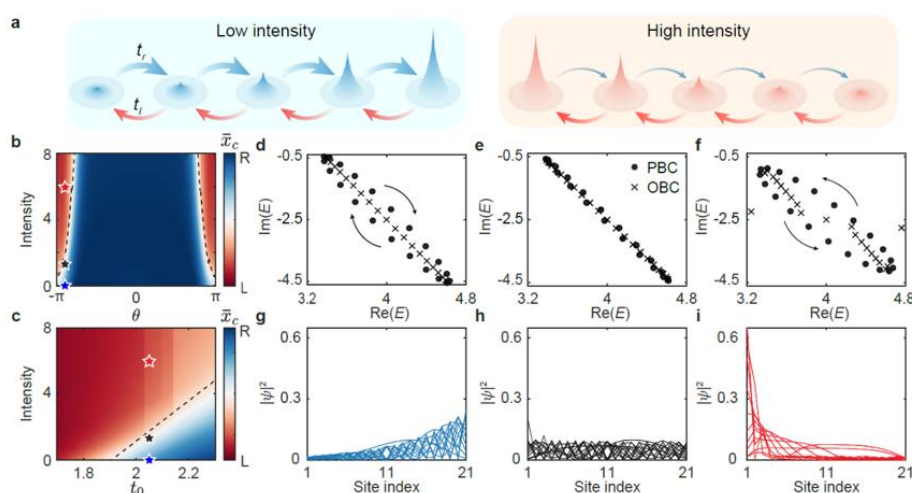


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.76732>

5、非线性非厄米趋肤效应中的局域反转与谐波生成

拓扑光子学为电磁波的鲁棒调控提供了重要路径,但传统拓扑能带理论主要建立在线性、厄米系统之上。当系统中存在增益、损耗或非线性响应时,能带拓扑的定义与物理图像都会发生显著变化。非厄米系统中的典型现象是非厄米趋肤效应,即大量本征模在开放边界处聚集,其根源来自点能隙拓扑;而非线性又可通过输入强度改变材料响应,诱导孤子、频率转换和拓扑相变等现象。此前研究多将非厄米性与非线性分别考察,对二者同时作用下的点能隙拓扑调控仍缺乏实验认识。

因此，探索非线性是否能够驱动不同非平庸点能隙相之间的转变，并进一步控制趋肤模的空间局域方向，成为理解非线性非厄米拓扑物理的一项关键问题。近日，浙江大学的杨怡豪研究员和香港中文大学的薛昊冉助理教授研究团队构建了具有饱和型非互易耦合的非线性 Hatano–Nelson 模型，并在微波超材料平台中实现了这一机制。通过由放大器与变容器件组成的耦合单元，体系的非互易耦合随输入功率变化，从而使低功率下局域于一端的电磁模式在高功率下反转到另一端，实现了由非线性驱动的非厄米趋肤效应局域反转。实验中，端口响应测量与近场扫描均验证了这一空间分布变化。进一步地，该研究观察到趋肤模诱导的三次谐波信号，并发现谐波场同样继承了基频趋肤模的局域反转特征，显示出非线性频率转换与非厄米拓扑之间的内在联系。研究还扩展到非线性非互易 SSH 模型，展示了点能隙与线能隙拓扑相变的同步调控，为可重构波操控、非互易传输和拓扑增强频率转换提供了新的设计思路。该文章发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）

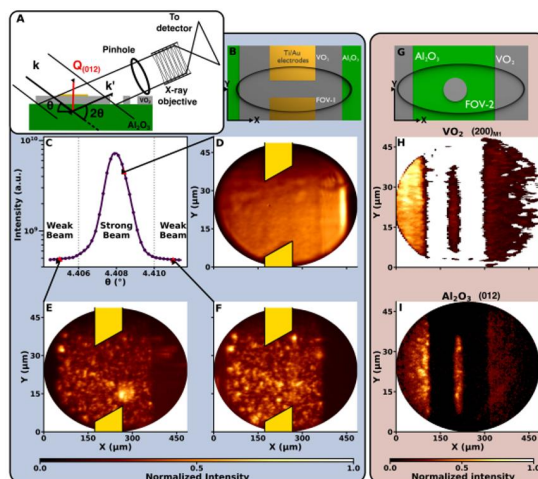


文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41467-026-74610-y>

6、通过氧化物薄膜压印动态不对称应变到基板上

应变工程是调控薄膜材料电学、磁学和相变行为的重要手段。在传统外延薄膜体系中，衬底通常被视为提供晶格匹配和机械约束的“被动平台”，其作用主要是限制薄膜结构并调节薄膜性能。然而，VO₂ 等相变氧化物在金属-绝缘体转变过程中伴随明显晶格结构和体积变化，这些变化是否会反过来影响衬底，并通过衬底反馈调控薄膜相变路径，长期缺乏直接证据。若薄膜的动态结构变化能够传递到衬底深处，衬底就不再只是静态支撑，而可能成为器件中的主动机械耦合介质。这对于理解相变器件、忆阻器、神经形态计算器件中的动态响应具有重要意义。针对这一问题，美国加州大学圣迭戈分校 Alex Frano 教授和 Elliot Kisiel 博士、布鲁克海文国家实验室 Zahir Islam 研究员和 Yimei Zhu 研究员，利用暗场 X 射线显微镜、同步辐射微衍射和原位 TEM 等技术，发现电场诱导 VO₂ 薄膜发生金属-绝缘体相变并形成金属细丝时，会在下方 Al₂O₃ 衬底中刻印出动态非对称应变场。该应变一侧为压缩、一侧为拉伸，幅值达到 ±0.12%，约为热膨胀效应的 3 倍，并可向衬底深处传播超过 70 μm，是 300 nm 厚 VO₂ 薄膜的 230 倍以上。更重要的是，这种衬底应变会反向影响 VO₂ 相变：压缩应变区域促进金属相扩展，而拉伸区域稳定绝缘相，从而决定金属细丝的单向生长。该效应在多

次电压循环中保持稳定，并在 Si 衬底中也被观察到，说明其具有一定普适性。该研究突破了“衬底只是被动约束”的传统认识，提出衬底可作为主动机械耦合介质，为三维集成相变器件和类脑计算硬件提供新的设计思路。相关内容发表于《Science》上。（张琰炯）



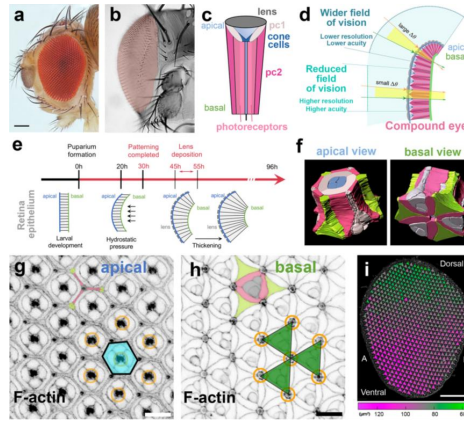
文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adt9347>

7、一种天然可编程超材料调控复眼的三维曲率

形态发生是指生命材料受控成形的过程，对复杂器官的结构组织和功能实现至关重要。昆虫复眼是形态影响功能的典型例子，其由大量小眼单元紧密排列成凸起的穹顶状结构，具有高度精密的光学性能。复眼表面的曲率并非均一，不同区域存在微尺度的局部曲率差异，并且这种差异具有物种特异性。低曲率区域可使更多小眼聚焦于较窄视野，从而提高空间分辨率；高曲率区域则扩大视场。局部曲率与透镜直径共同决定复眼的视觉性能，对捕食、交配和逃避捕食者等行为十分重要。果蝇复眼发育研究最为充分，其视网膜在蛹期受到体内静水压力作用，逐渐形成三维凸杯结构。然而，成年果蝇复眼中精细曲率差异如何在发育过程中由视网膜组织编码，目前仍不清楚。

近日，伦敦大学学院的 Franck Pichaud、奥拉维德大学 Fernando Casares、塞维利亚大学 Luis M. Escudero 团队，在黑腹果蝇中发现，发育中视网膜的基底表面被组织成一种超细胞三角网格，其中三角形的尺寸按照物种特异性的二维图案分布。利用遗传扰动开展的功能实验，并结合计算建模，支持了这样一种观点：该图案能够引导成年复眼局部曲率的形成。在毛里求斯果蝇发育中的视网膜中也观察到类似图案，表明这一机制在进化上具有保守性。该研究揭示了一种形态发生机制：在具有超材料特性的组织中，精细的三维曲率可以由二维图案进行编程。这一机制为设计形状可编程的三维生物表面提供了框架，并在合成形态发生到临床应用等方面具有广泛意义。

相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



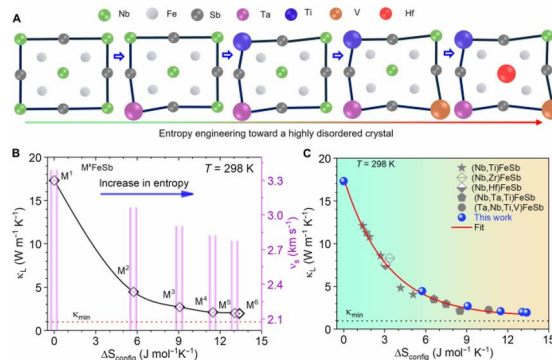
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-74276-6>

8、利用熵设计高性能热电器件

热电材料能够直接实现热能与电能之间的相互转换,在工业余热回收、汽车尾气发电和高温固态能源器件中具有重要应用前景。衡量热电性能的核心指标是无量纲优值 zT ,其提升需要同时获得高功率因子和低热导率。然而,热电参数之间高度耦合:降低晶格热导率往往依赖强无序、缺陷或纳米结构,但这些结构又可能削弱载流子迁移率,损害电输运性能。近年来,高熵工程因能够在晶格中引入多元素化学无序、增强声子散射而成为降低热导率的重要策略。但“熵越高是否一定越好”仍缺乏系统认识。尤其是在半赫斯勒合金这类高温热电材料中,其本身具有较高功率因子和优异热稳定性,但热导率偏高限制了进一步应用。因此,厘清构型熵、晶格热导率和载流子迁移率之间的关系,是设计高性能热电材料的关键。

针对这一问题,美国宾夕法尼亚州立大学 Bed Poudel 教授和 Subrata Ghosh 博士联合波特兰州立大学夏轶教授,以 $NbFeSb$ 半赫斯勒热电材料为模型,在 M 位引入 Nb、Ta、Ti、V、Hf 等元素,构建不同构型熵的 M_xFeSb 合金体系,系统研究熵对热输运和电输运的影响。结果表明,随着构型熵增加,原子尺度化学无序显著降低声子群速度并增强声子散射,使室温晶格热导率从约 $17.3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ 降至约 $2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$,降幅达 88.4%,并趋近约 $1.48 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ 的可实现下限。但研究也发现,过高熵会增强合金无序散射,降低载流子迁移率,因此并非熵越高性能越优。通过在低热导率与高迁移率之间取得平衡, M_4FeSb 在 873 K 实现约 1.25 的 zT ,同时保持较好的硬度和断裂韧性。该工作揭示了高熵热电设计中的“最优熵窗口”,为在低热导率、高电输运和力学稳定性之间实现协同优化提供了重要指导。

相关内容发表于《Science Advance》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aed6943>
(来源: 两江科技评论)