



2023 年第 2 期
总第 47 期
2023 年 7 月 5 日
编辑：夏孟华

浙江大学极端光学技术与仪器全国重点实验室

TEL: 0571-87951432

本期目录

激光直写 ：刘旭、匡翠方 液态双光子引发剂实现高速、高精度飞秒激光直写光刻.....	1
激光直写 ：刘旭、匡翠方 千束飞秒激光并行直写纳米光刻技术与系统..	2
成像算法 ：刘旭、匡翠方 基于结构光与深度学习的光片荧光显微镜单帧图像自聚焦方法.....	3
自由曲面 ：吴仍茂 边缘发射激光二极管自由曲面精准控光技术.....	4
波导显示 ：李海峰、吴仍茂 基于偏振体光栅和透镜的单像源双目波导显示.....	4
微纳光纤 ：郭欣、童利民 氧化硅微纳光纤高功率连续光传输.....	5
先进材料 ：王作佳 变形超表面的非局域效应波束调控.....	6
先进材料 ：李强 彩色辐射保温织物.....	7

先进材料：高飞、陈红胜 | 表面等离激元系统中极化选择的非简并高阶拓扑态.....7

先进材料：高飞、林宏焘、陈红胜 | 隐藏在耦合厄密拓扑波导中反宇称时间对称.....8

新闻速递：沙威 | “光伏器件仿真设计平台”正式上线.....9

激光直写

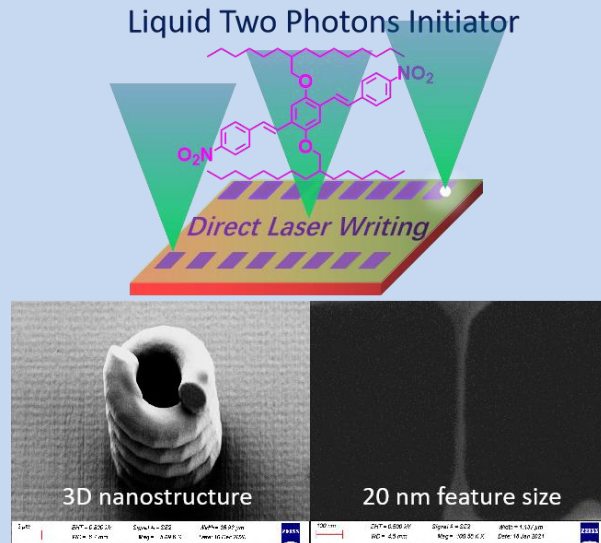
液态双光子引发剂实现高速、高精度飞秒激光直写光刻

基于双光子聚合的直接激光直写 (DLW) 是一种新兴的微纳 3D 制造技术。双光子引发剂 (TPI) 是双光子光刻胶的关键成分，对光刻胶的直写精度、速度都具有重要影响。然而，TPI 通常在光刻胶中表现出极低的溶解性，导致光刻胶的灵敏度低，无法实现快速、高精度加工，严重阻碍了其在 DLW 中的应用。

最近，刘旭教授团队与黄宁研究员团队合作提出了一种通过分子设计获得液态 TPI 的策略。液体 TPI 与光刻胶树脂具有良好的相容性，溶解度可达 2.0wt%，数倍优于商业化双光子引发剂-7-二乙氨基-3-噻吩基香豆素。同时，这种液体 TPI 还表现出优异的双光子吸收截面 (64GM)，使其能够有效地吸收飞秒激光，并产生丰富的活性物种来引发聚合。值得注意的是，该光刻胶激光直写的线阵列和悬浮线的最小特征尺寸分别可达 47nm 和 20nm，与电子束光刻技术相当。此外，液体 TPI 光刻胶可在高速 (1.045 m s^{-1}) DLW 下，制造多种高质量 3D 微结构和大面积 2D 器件。本研究对推进激光直写双光子光刻胶提高优异的双光子引发剂，并为 DLW 的未来发展铺平道路。



研究成果在线发表于《ACS Applied Materials & Interfaces》期刊上。【Chun Cao, Ning Huang* Cuifang Kuang,* Xu Liu, and *et. al.*, High-Precision and Rapid Direct Laser Writing Using a Liquid Two-Photon Polymerization Initiator, *ACS Applied Materials & Interfaces* (2023). DOI: [10.1021/acsami.3c06601](https://doi.org/10.1021/acsami.3c06601)】浙江大学匡翠方教授为共同通讯作者。



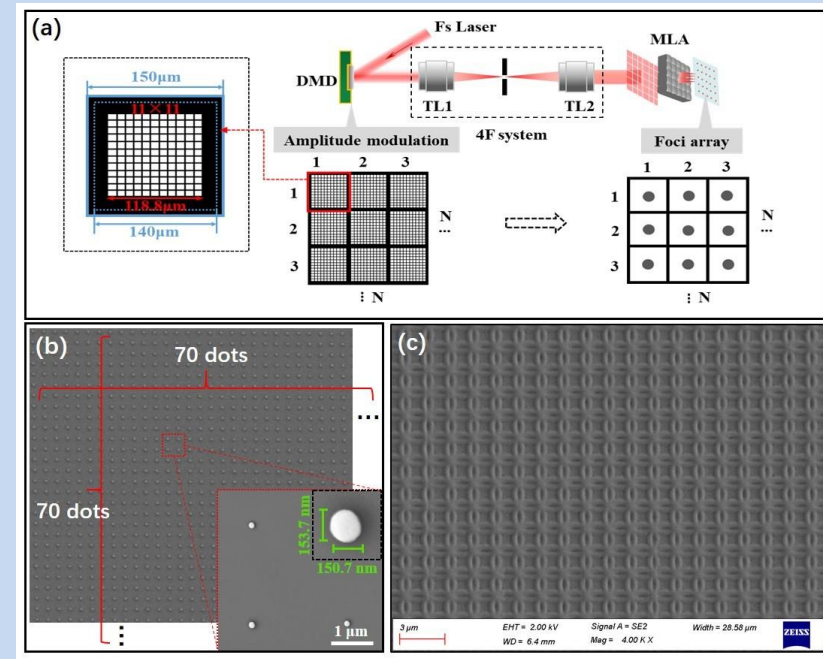
激光直写

千束飞秒激光并行直写纳米光刻技术与系统

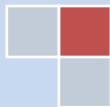
双光子激光直写 (Two-photon lithography, TPL) 技术在三维加工方面具有独特优势,但其较低的加工效率一直是限制其产业化应用的关键因素。目前商用 TPL 产品均基于单光束扫描刻写,即便采用最快的扫描设备,加工大面积三维结构也要耗费几小时甚至几天。基于多光束并行刻写可以有效提升刻写通量,但目前的并行 TPL 技术,包括

基于多光束干涉、微透镜阵列、衍射分光元件、空间光调制器和数字微镜阵列,均难以在保证大量(成百上千)光束并行的同时确保其焦点质量及均匀性,因此所能实现的结构精度只能到微米量级,且由于缺乏对各子焦点的独立调控能力,往往只能刻写周期性重复结构。

最近,刘旭、匡翠方教授团队提出了一种基于数字镜像阵列 DMD 和微透镜阵列 MLA 的飞秒双光子直写方法,该方法可以产生数千个



基于千束飞秒激光并行直写纳米光刻系统。(a) 千束独立调控激光光束产生及调制方案;(b) 70×70 焦点阵列一次曝光刻写的点阵结构,均匀性大于 90%,单点尺寸小于 200 nm;(c) 采用 70×70 焦点阵列并行画圆(直径 2.1 μm)刻写的四叶草图案。



具有独立开关和强度调谐能力的飞秒激光焦点，并以 0.83% 的调节精度将上千个焦点的强度均匀性提升至 98% 以上，同时以大面积点阵结构的高通量并行刻写进行验证，其结构均匀性达到 90%，单点尺寸均在 200 nm 以下(小于 $1/4 \lambda$)。该多焦点并行直写技术将加工通量提升上千倍的同时，还具备高精度、高灵活性、任意复杂大面积结构快速灵活加工的潜力，可为传感器、芯片研发等领域对高端加工技术的需求提供新的解决方案。

研究成果发表在《optics express》期刊上。【Yang S, Su C, Gu S, *et al.* Parallel two-photon lithography achieving uniform sub-200 nm features with thousands of individually controlled foci. *Optics Express*, 2023, 31(9): 14174-14184. DOI: [10.1364/OE.483524](https://doi.org/10.1364/OE.483524)】浙江大学匡翠方教授为共同通讯作者。

成像算法

基于结构光与深度学习的光片荧光显微镜单帧图像自聚焦方法

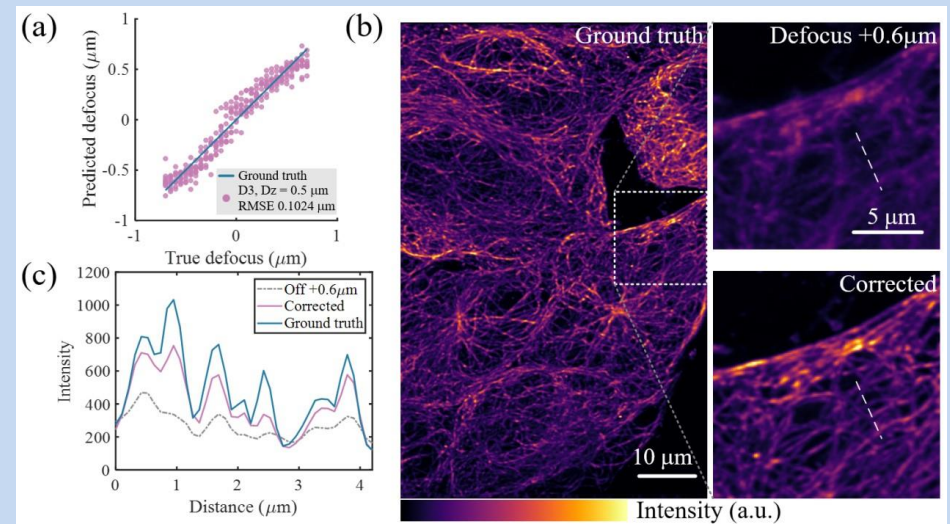
光片荧光显微镜(LSFM)是进行活细胞长时程成像的热门工具。然而，由于各种因素的影响，在这过程中，LSFM 容易发生离焦问题，导致成像质量下降。目前，常见的 LSFM 离焦监测方案需要拍摄多张图像，存在样品多次曝光且耗时较长的问题，影响了 LSFM 的成像效率。

最近，刘旭教授和匡翠方教授团队提出了一种基于结构光照明与深度学习的 LSFM 单帧图像自聚焦方法。利用具有多个轴向深度的结构光照明样品，使相机可以在单帧图像曝光中获取样品多个轴向位置的信息。接着，将该图像输入到训练好的深度傅里叶神经网络(DFNN)中获取系统的离焦信息。最后，调整系统中的 z 振扫描镜的偏置角度

即可补偿系统离焦量。该方法仅需拍摄样品一帧图像即可推断系统的离焦状况，减少样品的额外曝光次数，简化了 LSFM 的离焦校正的流程。同时，DFNN 具有训练数据集少(~55 个数据集)、网络内存小(~7 KB)、预测精度高(RMSE ~100 nm @ 1.1 NA 探测物镜)、运算速度快(~56 ms)、结构泛化性好等优点。本研究以较低成本有效提升 LSFM 长时程成像稳定性。

研究成果在线发表于《Optics and Lasers in Engineering》期刊上。

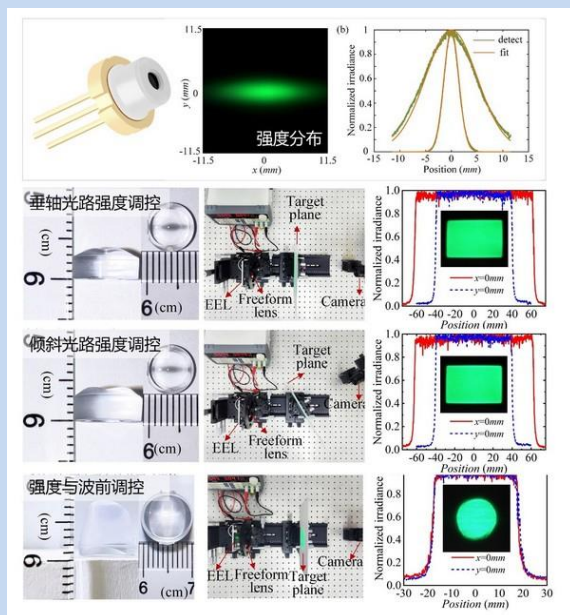
【Yanhong Gan#, Zitong Ye#, Yubing Han, Ye Ma, Chuankang Li, Qiulan Liu, Wenjie Liu, Cuifang Kuang*, and Xu Liu, Single-shot autofocusing in light sheet fluorescence microscopy with multiplexed structured illumination and deep learning, *Optics and Lasers in Engineering* 168, 107663 (2023). DOI: [10.1016/j.optlaseng.2023.107663](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107663)】。



自由曲面

边缘发射激光二极管自由曲面精准控光技术

边缘发射激光二极管因其重量轻、体积小、功耗低、效率高等优势被广泛应用于光通信、医疗、显示、照明等领域，然而其出射光束在快慢轴上发散角的不对称性导致出射光斑为椭圆形，这一特点导致其出射光斑需经过光束整形才能被应用。目前常见的光束整形方法主要集中在对边缘发射激光二极管发散角的调控，得到的光学系统往往结构复杂，且难以实现对光源发光强度的精准调控。因此得到紧凑高效的光路结构，并实现对光源发光分布的精准调控是非常有必要的。



近日，吴仍茂课题组在前期研究的基础上，利用自由曲面的高设计自由度，提出了一种逐步迭代的算法来对边缘发射激光二极管出射光束的发散角、强度分布和波前分布进行同时调控。该方法仅使用一个自由曲面透镜即可完成对边缘发射激光二极管出射光束的高效精准调控。

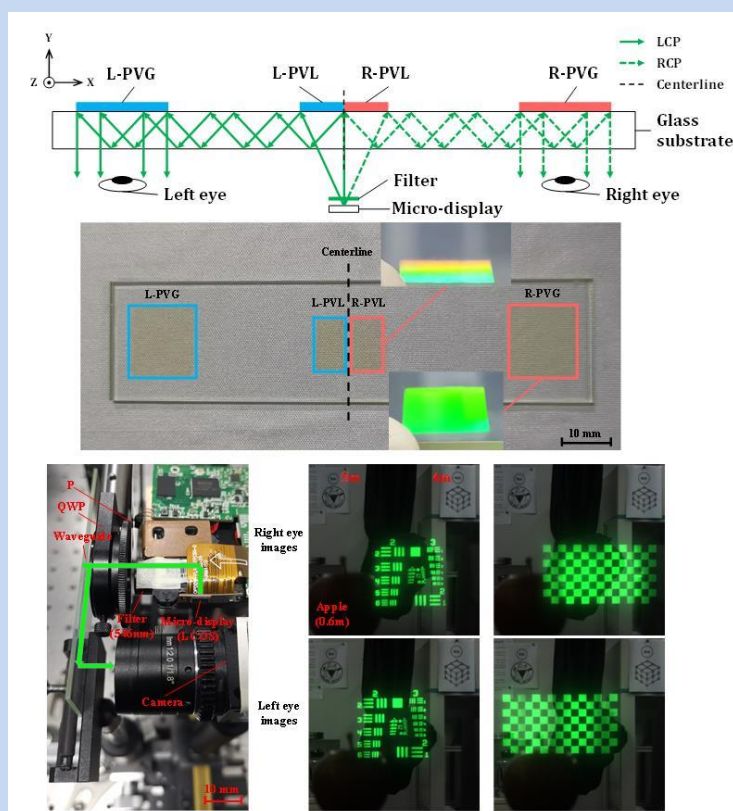
研究成果发表于《Optics and Lasers in Engineering》期刊上,【Fanqi Shen, Lin Yang, Jun She, Xianliang Zheng, Haifeng Li, Rengmao Wu, Youri Meuret, Tailoring freeform beam-shaping lenses for edge-emitting lasers, Optics and Lasers in Engineering, Optics and Lasers in Engineering 167, 2023, 107603, DOI: [10.1016/j.optlaseng.2023.107603](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107603)】浙江大学光电学院博士研究生沈凡琪为一作，吴仍茂研究员为通讯作者。

波导显示

基于偏振体光栅和透镜的单像源双目波导显示

波导显示技术是一种有效的 AR 解决方案，其利用耦合器将成像光耦入和耦出波导板。与其他 AR 方案相比，由于波导板的厚度只有几毫米，波导显示方案可以大大降低系统的体积和重量。同时，由于波导显示的出瞳扩展功能，该方案可以突破光学扩展量的限制，从而在小尺寸系统中同时实现大视场角和大眼盒。偏振体光栅 (PVG) 是基于图案化胆甾相液晶的衍射光学器件，在 PVG 中液晶分子的三维周期性旋转产生了周期性折射率分布。与表面浮雕光栅、体全息光栅等已被广泛研究的波导耦合器方案相比，PVG 具有高单阶衍射效率、大响应带宽、高环境透射率和简单的制备工艺，使其成为波导耦合器的有效候选方案。另外，PVG 所特有的偏振选择性可以为波导显示增加新的设计维度，用于解决各类问题。

最近,李海峰教授课题组使用手性相反的两对偏振体透镜(PVL)和PVG作为耦合器,提出了一种单图像源双目波导AR显示器。PVL是具备透镜功能的PVG,将其作为波导耦合器,可以省略传统波导系统中准直器的使用,从而进一步减小系统的尺寸和重量。同时,利用PVG和PVL的偏振选择性,结合图像源的偏振调制,仅使用单个像源便可以在双目独立地产生不同的图像。该工作为轻量化双目AR近眼显示器的发展提供了参考和启示。



研究成果发表于《Optics Letters》期刊上【Jiacheng Weng, Haifeng Li*, Rengmao Wu*, and Xu Liu, Single-image-source binocular waveguide display based on polarization volume gratings and lenses, *Opt. Lett.* 48, 2050-2053 (2023) DOI: [10.1364/OL.485857](https://doi.org/10.1364/OL.485857)】浙江大学光电学院博士研究生翁嘉承为一作,李海峰教授和吴仍茂研究员为通讯作者。

微纳光纤

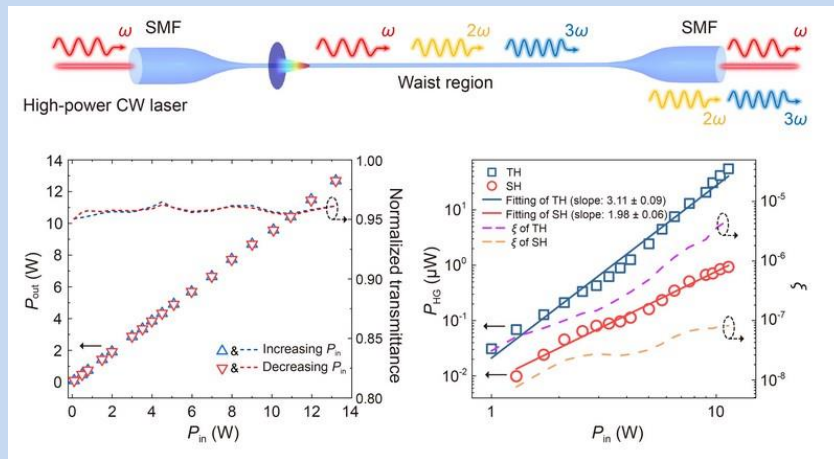
氧化硅微纳光纤高功率连续光传输

5

作为光纤光学与微纳技术的完美结合,微纳光纤在光学近场耦合、光学传感、非线性光学、原子光学、光纤激光器和光力学等领域受到广泛关注。然而,受光源功率、耦合效率和光学损耗等因素限制,已报道的微纳光纤连续光传输功率最高值为0.4W [*AIP Adv.* 4, 067124 (2014)]。为了满足微纳光纤高功率传输的应用需求,大幅提高微纳光纤的连续光传输功率以及深入研究微纳光纤的光学损伤阈值至关重要。

最近,郭欣副教授、童利民教授团队与清华大学精密仪器系李宇航副研究员合作,深入研究了氧化硅微纳光纤的导波损耗机制,提出对微纳光纤及其绝热过渡区进行高精度设计、制备以及表面钝化、超净保护等方案,大大减小了传输光场耦合损耗及表面散射损耗等因素。该工作首次实现了氧化硅微纳光纤的高功率连续光单模传输,传输光功率高达13W,与此前报道的传输光功率相比提高了30倍。结合散热仿真模型,预测光学损伤阈值高于70W。利用高功率传输光场,成功实现了空气中微液滴的高速光力驱动以及连续光激发下的高效非线性谐波产生。该研究为微纳光纤技术拓展至高功率应用领域提供了新途径。

研究成果发表于《Light: Science & Applications》期刊【J. B. Zhang et al., “High-power continuous-wave optical waveguiding in a silica micro/nanofibre,” *Light-Sci. Appl.* 12, 89 (2023). DOI: [10.1038/s41377-023-01109-2](https://doi.org/10.1038/s41377-023-01109-2)】, 浙江大学光电学院博士研究生张建彬、硕士研究生康仪为共同第一作者, 郭欣副教授、童利民教授、李宇航副研究员为共同通讯作者。



氧化硅微纳光纤高功率传输与高效非线性光学频率转换

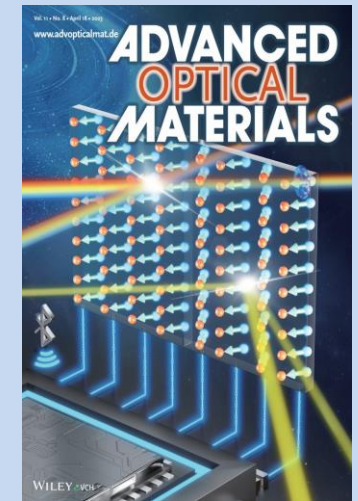
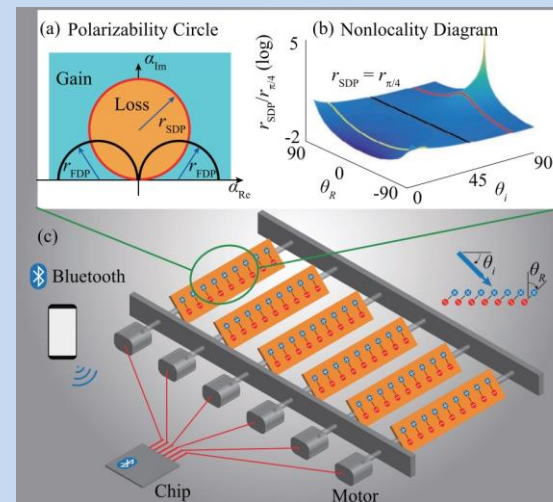
先进材料

变形超表面的非局域效应波束调控

具有低功耗性能的可重构超表面在成像和通信应用中引起了极大的兴趣。目前的超表面器件动态调控主要采用材料光学改性的方法, 通过外场来调控材料的光学性质, 进而实现响应调控。研究人员一直在寻找低功耗、大动态的幅相调控原理与方法。最近, 王作佳研究员课题组在超表面非局域效应和几何变形动态

调控方面取得了新进展。该工作揭示了扭曲电偶极子的非局域效应, 并证明了对散射的非易失性转换能力。当电偶极子旋转形成倾斜阵列时, 偶极共振会产生由旋转角度调节的非局域相互作用。体极化率变化将映射为复平面上一系列穿过坐标原点的圆, 并提供 360 度相位覆盖和超出电表面理论极限的连续振幅调制。基于这种机制, 课题组开发了一种蓝牙驱动的可变形非局域超表面, 用于远程切换散射通道。由于机械变形的稳定性, 扭曲的超表面即使在断电后也能保留波束调控功能。这项作为分析超表面非局域效应提供了理论新方法, 也为低功耗、非易失性波前调控器件提供了一个新的技术方案。

研究发表于《Advanced Optical Materials》期刊上, 被选为内封面论文。【Peng Tang, Jie Tao, Min Li, Fei Gao, Hongsheng Chen, Zuoqia Wang. Transformable metasurfaces enabled by twisting induced nonlocality. *Advanced Optical Materials*, 11, 2202363, (2023). DOI: [10.1002/adom.202202363](https://doi.org/10.1002/adom.202202363)】浙江大学信电学院博士研究生唐鹏为第一作者, 王作佳研究员、陈红胜教授为通讯作者。

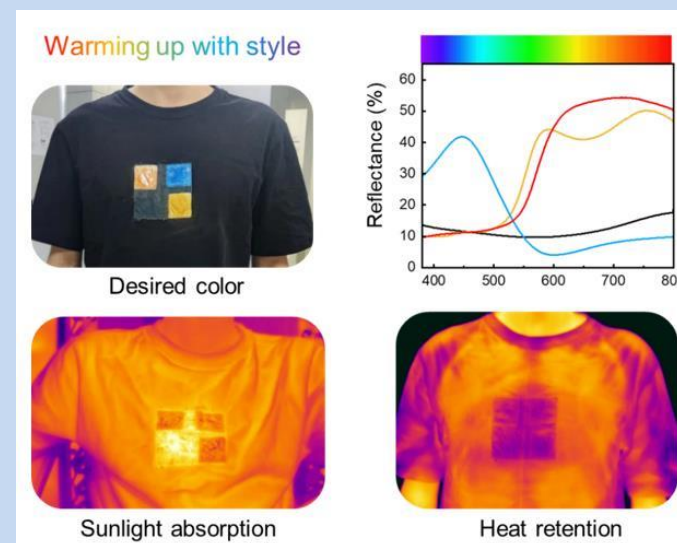


先进材料 彩色辐射保温织物

纺织品的热舒适性在人类日常生活中起着不可或缺的作用,用于个人热管理的先进纺织品仅仅通过调节皮肤和周围环境之间的热传递而不浪费多余的能量,就可以塑造身体的微环境。其中辐射保温织物可通过减少中红外的人体热辐射,同时在室外条件下吸收太阳波段的能量来实现在寒冷的环境中维持人体的体温。现有的辐射保温织物一方面大多基于金属材料,制备方式复杂且昂贵,其次大部分基于非织造的面料,如纳孔聚乙烯,纤维素薄膜等,影响人体的穿着舒适度。此外,保温织物大部分忽视了可见波段色彩多样性,难以满足审美的需求。

李强教授课题组从辐射保温织物的光热耦合机理出发,设计具有多光谱调控能力的微纳光子结构,并采用低成本、大面积的制备方式成功制备出个人保温织物,同时兼容高效热管理,色彩管理和穿戴舒适性。该保温织物以织造棉为基底,通过喷涂的方式将无机纳米颗粒和二维材料 MXene 进行复合,可实现可见波段的色彩多样性,同时在太阳辐照的近红外波段呈现高吸收,在人体热辐射的中红外波段呈高反射率。在室内及室外测试中,彩色 MXene 保温织物覆盖下模拟皮肤的的温度显著高于相同颜色的商业棉织物。在人体实际穿着实验中,室外太阳照射前后,彩色保温织物的即时升温效果明显优于传统织物。此外,在透水汽性测试中,彩色保温织物表现出与商用棉织物相当的透水汽性能,从而保证良好的穿戴舒适性。该保温织物在人体热管理中起到重要作用,有利于缓解能源危机和气候变暖。

研究成果在线发表于《Laser and Photonics Reviews》期刊【Yining Zhu, *et al.* Colored Woven Cloth-based Textile for Passive Radiative Heating. *Laser and Photonics Reviews*, DOI: [10.1002/lpor.202300293](https://doi.org/10.1002/lpor.202300293)】。



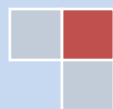
彩色保温织物实物图、可见光谱以及室外/室内红外热成像图

先进材料

表面等离子激元系统中极化选择的非简并高阶拓扑态

近年来,高阶拓扑绝缘体作为一种全新的拓扑相被发现和研究,有望在光学拓扑谐振腔、拓扑波导设计、拓扑集成等方面产生启发和应用。目前关于高阶拓扑态的实验研究大多局限在各向同性轨道(如:s轨道)能带体系中,并没有和辐射场的自由度相关联。

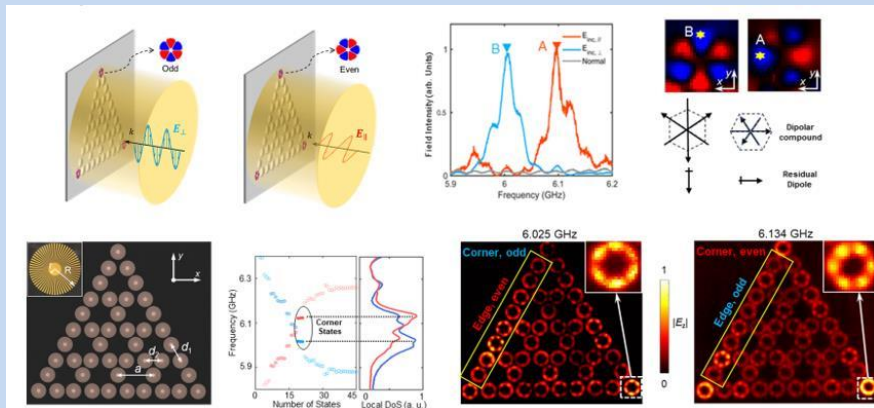
最近,高飞研究员、陈红胜教授团队利用人工电磁表面等离子激元谐振器构造基于 Kagome 晶格的高阶拓扑绝缘体,首次将高阶拓扑态



和远场极化自由度联系起来，观察到高阶拓扑态的偏振-波长锁定现象。人工电磁表面等离激元谐振器具有面内倏逝、面外辐射特点的谐振模式，且模式具有奇偶宇称自由度。不同阶轨道模式之间的耦合通道为系统引入了长程耦合，从而导致不同宇称的高阶拓扑态退简并。进一步利用宇称自由度与远场入射波极化具有一一对应的特性，最终观察到不同波长高阶拓扑态与入射波极化的锁定。

偏振正交非简并腔模式在最佳单光子发射器中有重要应用，因此该发现有望进一步将拓扑鲁棒性引入量子光源。通过与增益介质相互作用，该研究结果也有望应用于偏振相关的拓扑激光器，高性能量子发射器等领域。

研究成果发表于《Physical Review Letters》。【Yuanzhen Li, Su Xu, Zijian Zhang, Yumeng Yang, Xinrong Xie, Wenzheng Ye, Feng Liu, Haoran Xue, Liqiao Jing, Zuoqia Wang, Qi-Dai Chen, Hong-Bo Sun, Erping Li, Hongsheng Chen, and Fei Gao. Polarization-Orthogonal Nondegenerate Plasmonic Higher-Order Topological States. Phys. Rev. Lett. 130, 213603(2023). DOI: [10.1103/PhysRevLett.130.213603](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.213603)】



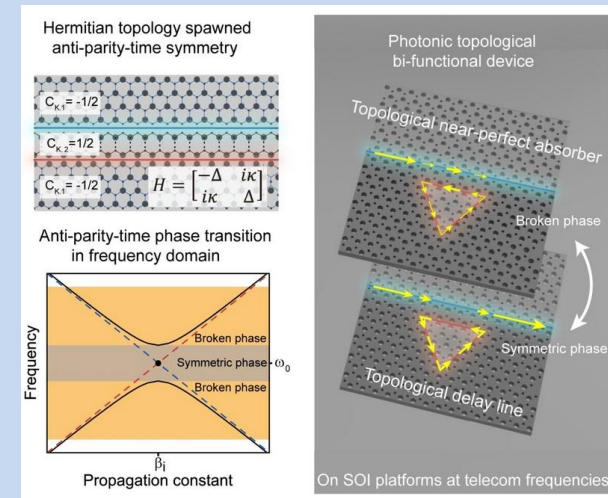
浙江大学信电学院博士研究生李元贞第一作者，高飞研究员、陈红胜教授为共同通讯作者。

先进材料

隐藏在耦合厄密拓扑波导中反宇称时间对称

拓扑和非厄密是两种重要的光学调控手段。近年来，研究人员在不同的光学平台中，对两者之间的相互作用进行了深入的研究，并观察到一系列有趣的现象。迄今为止，这种相互作用的实现均靠建立光学系统和环境之间的能量交换通道实现。

最近，高飞、林宏焘研究员、陈红胜教授团队提出了实现非厄密性质的全新方案，揭示了隐藏在耦合厄密拓扑波导系统中的反宇称时间对称（APT）机制，在频率域观察到两种 APT 模态之间的相变。团队进一步将 APT 模态与拓扑鲁棒传输性质相结合，利用 SOI 平台，在通信频段实现了一种新颖的光学拓扑双功能器件。两种 APT 模态



分别表现出拓扑鲁棒延迟线和拓扑近完美吸收器功能。该成果为研究非厄密拓扑光子学提供了新的视角,也为光学调控和未来集成光电子器件设计提供了一个新的方案。

研究成果在线发表于《Advanced Functional Materials》期刊上。

【Xinrong Xie†, Maoliang Wei†, Yumeng Yang†, Yuanzhen Li, Kunhao Lei, Zijian Zhang, Chi Wang, Chuyu Zhong, Lan Li, Zuoqia Wang, Wei E. I. Sha, Erping Li, Haoran Xue, Zhaoju Yang, Luqi Yuan, Hongsheng Chen*, Hongtao Lin*, Fei Gao*, “Harnessing Anti-Parity-Time Phase Transition in Coupled Topological Photonic Valley Waveguides”. *Advanced Functional Materials*, 2302197, 1-8, 2023, DOI: [10.1002/adfm.202302197](https://doi.org/10.1002/adfm.202302197)】

浙江大学信电学院博士研究生谢欣荣,魏茂良和杨雨萌为共同第一作者,陈红胜教授,林宏焘研究员和高飞研究员为共同通讯作者。

新闻速递

“光伏器件仿真设计平台”正式上线

光伏器件仿真设计平台,是由中国长江三峡集团有限公司联合浙江大学、吉林大学、香港大学、安徽大学、金华大道至简网络科技有限公司共同研发,服务于光伏行业的在线计算平台。平台适用于晶硅电池,有机、钙钛矿、叠层等新型高效太阳能电池的工程建模分析。平台网址: <http://solar design.cn/>

平台针对晶硅电池,有机、钙钛矿、叠层等新型高效太阳能电池的“光-电-热-量子”多物理场仿真和“材料-器件-电路”多层次仿真需求,采用国际领先的数值方法,精准、快速、高效求解麦克斯韦方程、漂移-扩散模型、电路模型,实现了“材料-器件-电路”多级、多层次光伏器件模拟技术,具有完全自主可控的知识产权。同商业软件 Silvaco 和 FDTD Lumerical 相比, TOPCon 晶硅电池、钙钛矿电池的计算误差低

于 1%, 计算速度提高 1 个量级。其中, 浙江大学沙威、陈文超、仲杏慧团队负责平台“器件-电路”仿真模块的开发, 是平台建设的领衔团队。

该项工程填补了国内新型太阳能电池仿真设计平台的空白; 平台目前用户超过 800 人, 单位超过 200 家。平台可为新材料、新原理光伏器件研究, 标准电池设计, 测试参数体系确立及高效光伏组件研发, 提供仿真分析工具。平台也将辅助光伏电池领域的教学工作。

