



2022 年第 2 期
总第 41 期
2022 年 5 月 10 日
编辑：夏孟华

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室

TEL: 0571-87951432

本期目录

科研进展：刘东 光致发光分类检测表面及亚表面缺陷.....	1
科研进展：王作佳 光轴偏转光栅的宽带“双面” 散射现象.....	2
科研进展：刘旭、杨青 晶圆级片上虚拟可调深移频超分辨显微成像.....	2
科研进展：戴道铨 各向异性亚波长结构硅光波导：无损多模交叉传输...	3
科研进展：戴道铨 高性能波导型横向锗硅雪崩光电二极管.....	4
科研进展：戴道铨 超越单模：极低损耗的硅光集成技术.....	4
科研进展：钱骏 基于分子和纳米探针的高对比度三维近红外光学生物成像技术.....	5
科研进展：匡翠方 基于电光高速移相超分辨显微成像系统.....	6
科研进展：李强 助力碳中和：密闭空间辐射制冷高效降低空调能耗.....	7
科研进展：李强 基于表面声子激元的窄带漫射热辐射器.....	7
科研进展：阮智超 镜面对称破缺实现时空光学涡旋.....	8

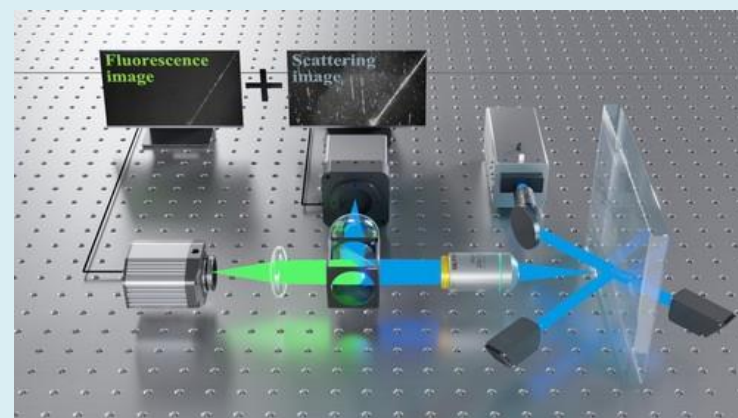
科研进展

光致发光分类检测表面及亚表面缺陷

表面缺陷与亚表面缺陷是降低光学元件激光损伤阈值的重要因素，同时也会影响光学系统的成像质量与机械稳定性。精密光学系统需要严格控制表面及亚表面缺陷，但由于亚表面缺陷难以探测且其与表面缺陷存在空间层叠，导致对两者进行精确检测和区分成为一项重大挑战。

近日，刘东教授团队提出一种基于多传感器的图像融合方法，可实现抛光元件表面缺陷与亚表面缺陷的无损检测。在激光均匀照射下，缺陷部位产生散射和荧光信号，并由显微系统中两个图像传感器分别接收。基于图像配准和特征级融合算法，成功从散射和荧光图像中识别并提取出不同种类的缺陷。研究成果为光学元件超精密加工、激光损伤阈值评估与控制等应用提供了更具针对性的参考。

研究成果在线发表于《Photonix》期刊上。【Sun H, Wang S, Hu X, et al. Detection of surface defects and subsurface defects of polished optics with multisensor image fusion, *Photonix*. (2022). DOI [10.1186/s43074-022-00051-7](https://doi.org/10.1186/s43074-022-00051-7)】，刘东教授为唯一通讯作者。

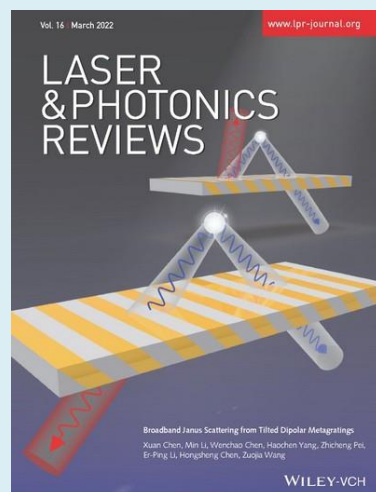
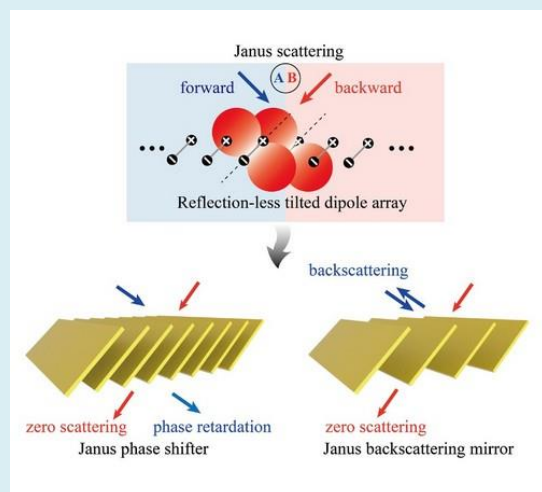


科研进展

光轴偏转光栅的宽带“双面”散射现象

超表面在波前调控方面实现了许多新奇电磁功能。理想单层电超表面受到 25% 的交叉极化效率限制，为提高相位调控效率，通常需引入磁谐振或多层结构，并精准控制结构的几何尺寸来平衡带宽和效率。研究人员一直在寻找宽频、高效的幅相调控方法。

最近，王作佳研究员课题组在高效、宽频相位调控方面取得了进展。该工作采用光轴偏转的金属平板阵列，克服传统单层超表面的效率极限和相位覆盖限制，实现了单侧、宽带、高效的相位调控。理论分析表明，光轴偏转的电偶极子阵列会打开一个互易性保护的非对称通道：正向来波将无法激励有效的电偶极子模式，呈现零反高透的透明窗效果；而常规反射通道受到互易性约束，显示高透且相位可调的控波功能。通过打开高阶衍射通道并抑制透射通道，进一步实现了“双面”后向散射器。这项作为设计高效率带宽积的波前调控器件提供了一个新的思路。



研究发表于《Laser & Photonics Reviews》(IF=13.138) 期刊上，被选为内封底论文。【Xuan Chen, Min Li, Wenchao Chen*, Haochen Yang, Zhicheng Pei, Erping Li, Hongsheng Chen, Zuoqia Wang*. Broadband Janus Scattering from Tilted Dipolar Metagratings. Laser & Photonics Reviews 16, 2100369, (2022). DOI: [10.1002/lpor.202100369](https://doi.org/10.1002/lpor.202100369).】浙江大学信电学院博士研究生陈璇、李民为共同一作，陈文超研究员、王作佳研究员为通讯作者。

科研进展

晶圆级片上虚拟可调深移频超分辨显微成像

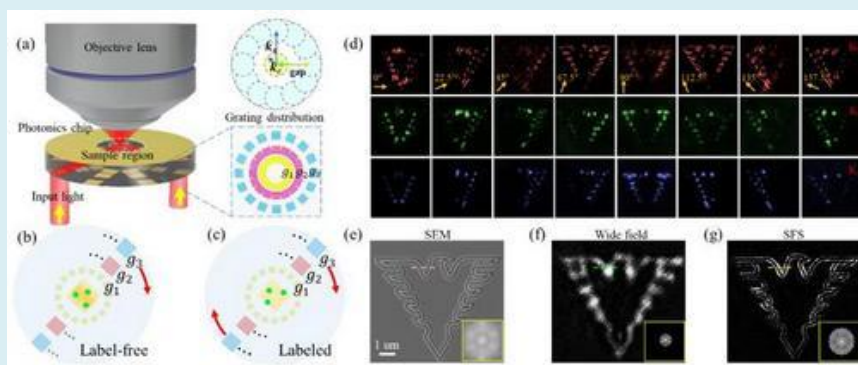
片上超分辨显微是在光子芯片上实现超分辨显微的技术，相比传统的超分辨显微成像技术，片上超分辨显微具有可集成化、成本低、光路稳定的优势。基于倏逝波照明的空间移频显微成像可与集成光子技术兼容，从而获得大视场、快速、集成化的超分辨显微成像。然而，当移频量超过探测孔径的两倍以上时会导致缺频现象的出现，使传统线性移频显微术的分辨率最高只能提升至阿贝衍射极限的三倍。

最近，刘旭、杨青教授课题组提出了虚拟可调深移频原理，并将可见光波段高折射率的 GaP (Gallium Phosphide) 晶圆应用于深移频超分辨显微芯片的研究，突破了传统线性移频显微术的 3 倍衍射分辨率极限。通过芯片设计和半导体芯片制备，研制了兼容无标记和标记样品的可调深移频超分辨显微芯片。通过引入高折射率晶圆和变周期微纳光栅设计，实现了分辨率为 $\lambda/4.7$ 的无标记成像和 $\lambda/7.1$ 的荧光标记成像；进一步集成多物理场调控组件，可以把标记/无标记兼容型光学超分辨成像、微流控、电刺激、药理分析等功能集成到单个芯片上，为现代生物学难题的研究提供多功能化的综合性研究平台。该方法基于晶圆实现，因此可设计为量产化的紧凑型显微模块，安装在普通显微镜上，使其具备快速、大视场、深亚波长分辨率的超分辨显微能力。该研究对推进深亚波长超分辨显微术在生物医学、生命科学和材料科

学等领域的实际应用具有重要意义。

研究成果发表于《Advanced Science》(IF=16.806) 期刊上。

【Mingwei Tang, Yubing Han, Dehao Ye, Qianwei Zhang, Chenlei Pang, Xiaowei Liu, Weidong Shen, Yaoguang Ma, Clemens F. Kaminski, Xu Liu*, and Qing Yang*, High-refractive-index chip with periodically fine-tuning gratings for tunable virtual-wavevector spatial frequency shift universal super-resolution imaging. *Adv. Sci.* 2022, 9, 2103835. DOI: [10.1002/advs.202103835](https://doi.org/10.1002/advs.202103835).】浙江大学光电学院博士生汤明炜为第一作者, 刘旭、杨青教授为共同通讯。



科研进展

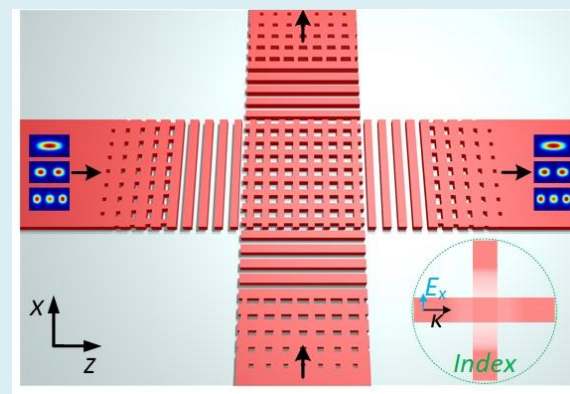
各向异性亚波长结构硅光波导: 无损多模交叉传输

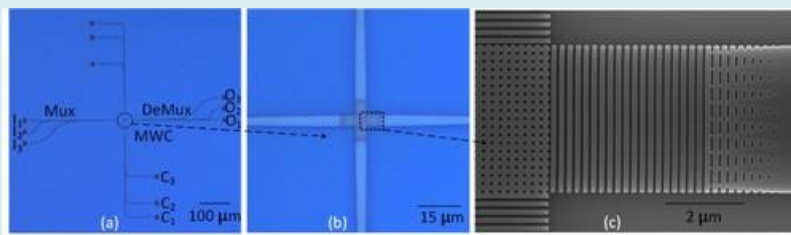
随着硅光芯片的集成度及复杂度不断提升, 交叉波导作为其不可或缺的基本元件受到愈来愈多的关注。近年来, 随着多模光子学的诞生, “多模”交叉波导作为一项极具挑战的任务进了人们的视野, 尤其高阶模往往比基模更容易产生更强衍射致使其可能存在严重的传输损耗及模间串扰。因此, 如何保证各阶模式都能实现低损耗和低串扰的传输面临巨大挑战。目前, 全球多个团队已报道多种新结构, 但

受限于其工作原理/结构, 往往存在插损大、串扰高或模式通道少等不足。因此, 亟需发展新一代超低损耗超低串扰多模交叉波导。

针对这一问题, 戴道铎教授团队提出全新的一/二维复合亚波长交叉结构。该结构巧妙利用其各向异性, 使其交叉重叠区域等效折射率高于两侧区域, 此时交叉区域可等效于具有较高折射率差直波导, 仍可支持各阶导模传输。所提出的波导结构形成了与传统交叉波导截然不同的工作机制, 避免了其光场发散及其导致的模场失配等严重问题, 为实现低损耗/低串扰多模交叉波导传输提供了全新路径。实验表明, 提出的该交叉结构在 1530-1610 nm 超宽波长范围内, TE₀、TE₁、TE₂ 模式的传输损耗分别低于 0.06、0.15、0.26 dB, 且串扰低于 -20 dB, 证明其具有超低损耗和低串扰特性。此外, 该结构仅需简单地扩展波导宽度即可满足更多模式通道应用需求, 扩展性极佳。

该研究成果发表于《Laser & Photonics Reviews》(IF=13.138) 期刊上。【Weike Zhao, *et al*, Silicon multimode waveguide crossing based on anisotropic subwavelength gratings. *Laser & Photonics Reviews*, 2022: DOI: [10.1002/lpor.202100623](https://doi.org/10.1002/lpor.202100623)】赵伟科博士为第一作者, 戴道铎教授为通讯作者。以上工作获得了国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重大研究计划等项目支持。





各向异性亚波长多模交叉波导

科研进展

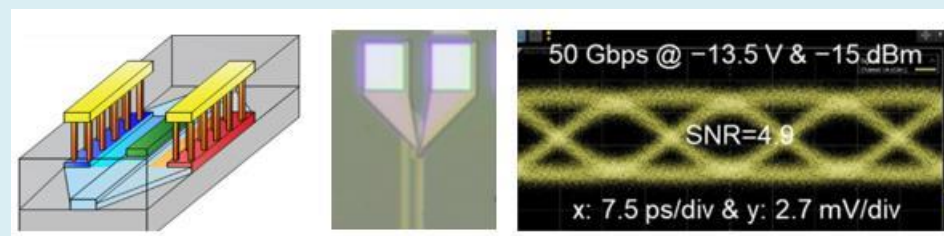
高性能波导型横向锗硅雪崩光电二极管

雪崩光电二极管 (APD) 因其内增益被认为是实现高灵敏度接收机的关键, 在超大容量超低功耗数据传输系统中扮演重要角色。在各类 APD 中, 具有分离吸收-电荷-倍增 (SACM) 的锗硅雪崩光电二极管 (Ge/Si APD) 融合了锗的高效吸收及硅的低噪声雪崩等优点, 是当前的主流技术。传统 Ge/Si APD 大多是采用垂直掺杂分布结构, 需要锗区掺杂及锗上电极工艺, 不但增加了工艺复杂度, 且降低了探测器响应度。相比之下, 横向掺杂分布 Ge/Si APD 无需锗掺杂和锗上电极, 巧妙地解决这一问题, 但以往报道器件依然存在响应度较低且暗电流较大等不足。

为此, 戴道铎教授团队最近研制了一种高响应度、低暗电流的 Ge/Si APD, 创新性地引入双层锥形波导和锗硅复合型脊型波导, 有效提高锗吸收效率及其响应度。同时, 通过硅浅刻蚀槽设计进一步调控 APD 电场分布, 从而降低其暗电流。最终研制的 APD 具有优异性能: 其单位响应度达 $0.96 \text{ A/W}@1310 \text{ nm}$; -13 V 偏压下 3 dB 带宽达 27 GHz 、暗电流为 $1.8 \mu\text{A}$ 、增益带宽积高达 383 GHz 。进一步采用该器件成功演示了 50 Gbps NRZ 信号接收。该器件具有优异的工艺兼容

性, 无需额外工艺, 工艺简洁, 在未来大规模集成硅光芯片中具有突出应用潜力。

研究成果发表于《Optics Express》期刊【Y. Xiang, H. Cao, C. Liu, and D. Dai, High-performance waveguide Ge/Si avalanche photodiode with a lateral separate-absorption-charge-multiplication structure, *Optics Express* 30, 11288-11297 (2022). DOI: [10.1364/OE.450618](https://doi.org/10.1364/OE.450618)】, 博士生项宇奎为第一作者, 戴道铎教授为通讯作者。以上工作获得了国家重点研发计划项目、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重大研究计划项目支持。



横向 SACM Ge/Si APD 及其眼图

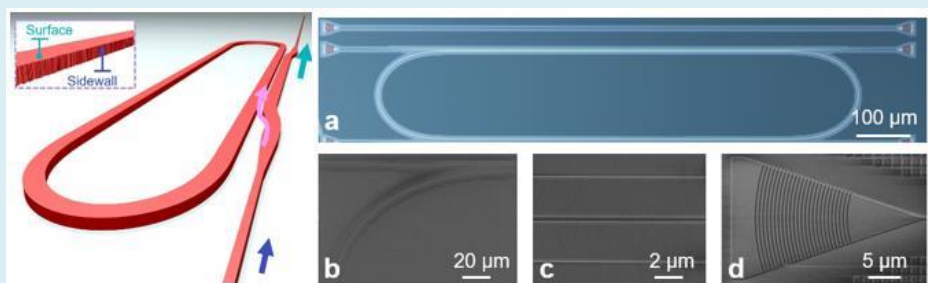
科研进展

超越单模：极低损耗的硅光集成技术

硅光集成是集成光学领域中最受关注的主流技术之一, 特别是其 CMOS 工艺兼容性与超高集成密度使得超大规模光子集成成为可能。这也正是 1969 年首次提出集成光学概念以来众多科学家孜孜以求的目标。而超大规模光子集成芯片往往包含数量极其庞大的无源光子器件以及累积长度达数十厘米的传输波导, 因此波导损耗无疑已成为制约其进一步发展的决定性瓶颈。可以预见, 未来超大规模光子集成芯片对更低损耗的要求将达到前所未有的新高度, 亟需发展新一代极低损耗硅光波导。

针对这一问题,戴道铎教授团队最近报道了极低损耗硅光波导及器件的最新研究成果。团队突破常规思路,超越单模条件制约,提出了均匀展宽波导模场调控的新理念,基于标准流片工艺即获得了极低损耗硅光波导基模传输,并进一步实现了高性能硅光功能器件。论文基于建立的三维体电流法分析模型对硅光波导基模散射损耗进行了全面理论研究,通过引入特殊的欧拉曲线弯曲结构获得了超紧凑弯曲且有效地避免了模间交叉耦合,成功实现了均匀展宽波导弯曲结构中基模的单模传输。在国际上首次基于标准流片工艺实现了 $Q>10^7$ 创世界纪录超高 Q 硅光微腔,其对应的波导损耗仅为 0.065dB/cm (比传统硅光波导损耗降低了数十倍)。进一步研制了 3dB 带宽仅为 20.6MHz 的超窄线宽硅基可调谐光滤波器、长达 1 米的超长硅光波导延迟线。论文提出的超越单模新思路对突破极低损耗硅光波导及器件发展瓶颈具有重要意义,为基于标准工艺实现下一代超大规模硅光集成提供了新的可能性。

研究成果发表于《Laser & Photonics Reviews》(IF=13.138) 期刊【Long Zhang, Shihan Hong, Yi Wang, Hao Yan, Yiwei Xie, Tangnan Chen, Ming Zhang, Zejie Yu, Yaocheng Shi, Liu Liu, and Daoxin Dai*, Ultralow-loss silicon photonics beyond the singlemode regime, *Laser & Photonics Reviews*, 2022. DOI: [10.1002/lpor.202100292](https://doi.org/10.1002/lpor.202100292)】,博士生张龙为



超高 Q 硅光波导微腔

第一作者,戴道铎教授为通讯作者。以上工作获得了国家杰出青年科学基金、国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重大研究计划项目支持。

科研进展

基于分子和纳米探针的高对比度三维近红外光学生物成像技术

利用光学方法进行生物诊断、成像及治疗没有电离辐射的风险,且通常侵入性较低。然而,可见光在生物组织中的穿透深度有限。为了克服这一挑战,科学家们的研究兴趣逐渐转移至红外光波段。尤其在波长大于 900nm 的近红外光学窗口内,光的生物组织穿透深度明显提升。

最近,钱骏教授课题组同纽约州立大学布法罗分校 Paras. N. Prasad 课题组合作,综述了近红外光学生物成像的最新进展和突破,全面报道了各种光学生物成像模式,以及它们的物理原理、相对优点和互补性,涉及的主题包括荧光成像、非线性光学成像、光声成像、光学相干层析成像和高光谱成像等。该综述首先讨论了光在生物介质中的传播特性,分析了光在生物组织中传播受到的吸收、散射作用,并整理了适合光学生物成像的光谱窗口。随后,该综述介绍了不同的光学成像方式及其在体外和体内生物成像中的特点,描述了分子和纳米光学探针在不同成像模式中的作用,主要讨论了用于荧光成像及非线性光学成像的纳米发光探针、用于光声成像的纳米光热剂和纳米温度计等。此外,该综述还介绍了成像导航下的疾病治疗以及神经光子学和纳米牙科等领域的新应用。最后,该综述总结了近红外光学生物成像技术当前面临的挑战和未来的生物医学应用机遇,旨在促进这一领域的进一步发展。

相关成果在线发表于物理学顶级期刊《Physics Reports》(IF=25.6) 期刊上。【Jun Qian*, Zhe Feng, Xiaoxiao Fan, Andrey Kuzmin, Anderson

S.L. Gomes, Paras N.Prasad*. High contrast 3-D optical bioimaging using molecular and nanoprobe optically responsive to IR light, *Phys. Rep.* (2022), 962(5): 1-107. DOI [10.1016/j.physrep.2022.02.004](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2022.02.004)】浙江大学光电学院钱骏教授为第一作者及通讯作者，博士研究生冯哲为共同一作，纽约州立大学布法罗分校 Paras N.Prasad 教授为另一通讯作者。



基于分子/纳米探针的近红外光学生物成像模式及其生物学应用

科研进展

基于电光高速移相超分辨显微成像系统

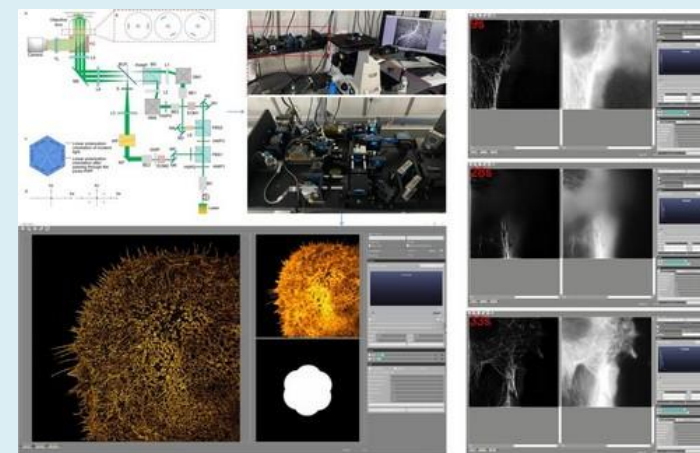
结构光照明显微镜 (SIM) 是一种优秀的超分辨显微成像技术, 可将光学显微镜的轴向和横向分辨率提高至两倍, 具有成像速度快、激发光强低、光漂白少、无需特殊荧光染料等优点, 在细胞生物学等领域得到了很好的应用。通过 SIM 显微镜, 科学家们观测到了越来越多的生物动态过程, 如细胞器与细胞骨架的动态活动、创伤导致神经萎缩的过程、小鼠脑缺血时细胞吞噬过程、线粒体与溶酶体的相互作用、特定药物对细胞的影响等。商业化的 SIM 产品也

逐渐成熟, 如 Nikon 的 N-SIM 显微镜系统、Zeiss 的 Elyra 7 显微镜系统, 为生命科学等领域的学者研究提供了有力的支持。

最近, 匡翠方教授课题组基于采用扫描振镜调控光场的 SIM 结构, 提出了一种采用电光调制器实现精准快速移相的 SIM 超分辨显微成像系统, 并提出一套采用 GPU 加速的 SIM 重构流程与一套实时 SIM 软件, 实现了实时 SIM 成像。该系统具备的视频级实时重构成像能力, 可为活细胞观测提供新利器。经测试, 该系统可以实现 2D、TIRF 和 3D-SIM 多种模式 SIM 高速和实时超分辨成像。系统具有强大的光学切片能力, 横向分辨率可达 90nm、超分辨成像速率为 208 帧/秒 (512×200 pixels) 以及 119 帧/秒 (512×512 pixels)、实时重构速度为 25 帧/秒 (512×512 pixels)。

研究成果在线发表于《Optics Express》(IF=3.894) 期刊上。

【Fanghui Xu, Jiachen Zhang, Dongdong Ding, Wenjie Liu, Chi Zheng, Sijia Zhou, Youhua Chen,* and Cuifang Kuang,* . Real-time reconstruction using electro-optics modulator-based structured illumination microscopy, *Optics Express*. (2022). DOI: [10.1364/OE.454982](https://doi.org/10.1364/OE.454982).】浙江大学光电学院硕士研究生徐方慧为一作, 匡翠方教授, 陈友华副教授为共同通讯。



科研进展

助力碳中和：密闭空间辐射制冷高效降低空调能耗

在全球气候变暖大背景下，碳中和已经成为国际社会的共识，达成这一目标需要优化能源利用效率，减少不必要的能耗。当下，建筑能耗占中国总能耗的35%以上，而这其中，供暖通风及空气调节系统的能耗占比达到44%。近年来，辐射制冷作为一种被动冷却方式得到了广泛研究。然而，现有的研究主要集中在优化材料性能上，单一的外表面辐射调控难以对某个密闭空间（例如建筑、车辆）进行高效的热管理。

李强教授和仇旻教授研究团队提出一种新型辐射制冷设计理念，在现有密闭空间（如建筑、车辆等）基础上，通过微纳光子结构改变屋顶内外层表面光谱，实现对能量的高效调控。研究团队从热传输模

型出发，结合微纳光学仿真优化，设计并制备了这种器件，其外层采用了二氧化硅和二氧化钛的一维光子晶体膜系，可以高效反射太阳热量同时对外辐射散热；其内层采用了沉积了氧化铟锡的聚酯膜，可以大幅降低对室内热负载。在模拟有源制冷空间装置上测试该器件的性能，结果显示在维持室内温度约为26℃时，采用该器件的有源制冷功耗相比于没有器件降低了63%，从而证明该器件具有相当可观的节能效应。此外，该器件整体为高透明，能够直接应用于现有建筑或车辆上而不影响美观。

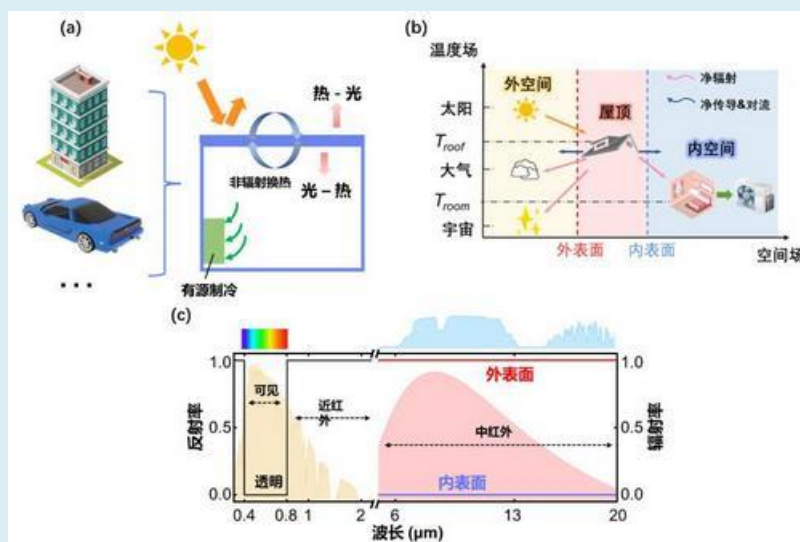
研究成果在线发表于《Light: Science & Applications》期刊【Yining Zhu, *et al.* Color-preserving passive radiative cooling for an actively temperature regulated enclosure. *Light: Science & Applications* DOI: 10.1038/s41377-022-00810-y】

科研进展

基于表面声子激元的窄带漫射热辐射器

热辐射是指物体因自身的温度而向外辐射电磁波的现象，通常发生在红外波段。热辐射作为生活中常见的一种现象，在辐射制冷、红外传感、热光伏以及红外伪装等领域发挥着重要的作用。近年来，随着微纳光子学的发展，光栅、超表面等微纳结构可以在微米及纳米尺度下实现对电磁波的调控，为热辐射的光谱和空间调控提供了更多的自由度。现有的研究难以在窄带漫射热辐射调控中实现光谱和空间两者的平衡：窄带热辐射器会存在角度敏感的缺点；漫射辐射器会存在品质因子低的缺点。

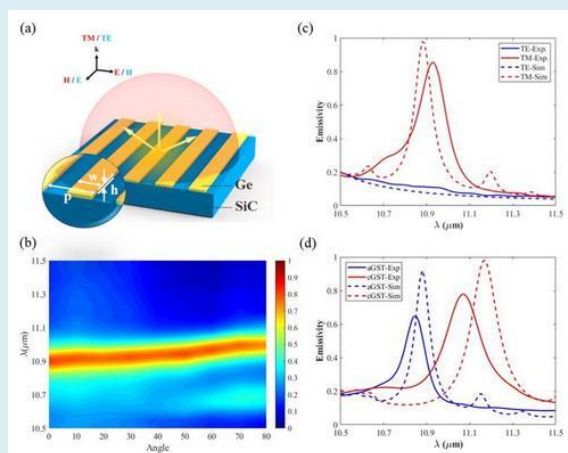
李强教授和仇旻教授团队将微纳结构与声子材料结合，基于表面声子激元实现了同时具有窄带和漫射特性的红外热辐射器，在实验中可以在10.9 μm处实现品质因子大于100的窄带热辐射，同时在大于70度的空间角范围内维持热辐射的波长和强度稳定。此外，结合相变材料Ge₂Sb₂Te₅等，可以进一步实现保持窄带漫射热辐射器的辐射波



(a) 有源制冷空间和外界换热模型示意图。(b) 稳态下系统的能量流动模型。(c) 双层辐射制冷对内外表面光谱的要求

长随温度进行动态调控。此红外辐射器具有品质因子高、辐射角度范围大、结构集成度高（薄膜厚度 80nm）和温度耐受性高（400℃）等特点，同时结合相变材料可以实现在变温环境中对热辐射的动态调控。

研究成果在线发表于《Nanophotonics》期刊【Binze Ma, *et al.* Narrowband Diffuse Thermal Emitter Based on Surface Phonon Polaritons. *Nanophotonics* DOI: [10.1515/nanoph-2022-0047](https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0047)】。



窄带漫射辐射器
结构及红外热辐射特性

科研进展

镜面对称破缺实现时空光学涡旋

时空光学旋涡 (spatiotemporal optical vortex, STOV) 是一种新型的结构光场，其在空间和时间维度具有甜甜圈形状的振幅以及螺旋型相位，从而具有横向的轨道角动量。近期，利用脉冲整形器，科学家们成功产生并探测了 STOV，但由于脉冲整形器包含复杂的光学系统和宏观尺寸的光学元件，因此在集成和可拓展性方面存在困难。

最近，阮智超教授团队提出了镜面对称性破缺的微纳超表面结构，通过在空间-时间维度设计光学微分器，产生了具有横向轨道角动量

的 STOV，并展示了其在时空信号“突变探测”方面的应用。在理论分析方面，提出了打破器件的空间镜面对称性对于正入射脉冲产生 STOV 的必要条件。仿真表明，对于在空间和时间维度均为高斯振幅调制的脉冲，出射脉冲为拓扑荷数等于+1 的 STOV。而当输入的脉冲为任意振幅调制的分布时，大量相邻的 STOV 在入射脉冲的突变区域干涉增强，在缓变区域干涉相消，因此可以用于探测时空信号的突变，具有高分辨率和超快速检测的巨大优势。

研究成果发表于《Laser & Photonics Review》(IF=13.138) 期刊上【Junyi Huang, Jiahao Zhang, Tengfeng Zhu, Zhichao Ruan, Spatiotemporal Differentiators Generating Optical Vortices with Transverse Orbital Angular Momentum and Detecting Sharp Change of Pulse Envelope, *Laser Photonics Rev.* (2022). DOI: [10.1002/lpor.202100357](https://doi.org/10.1002/lpor.202100357)】。

