



2022 年第 3 期
总第 42 期
2022 年 7 月 5 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: 李强 全长波红外定向热辐射.....	1
科研进展: 李鹰、陈红胜 相干完美吸收热传导控制.....	2
科研进展: 戴道铨 高性能硅基片上偏振光开关.....	3
科研进展: 戴道铨 超越单模的低损耗硅光子波导螺旋中的高效四波混频.....	3
科研进展: 戴道铨 高带宽硅-氧化铟混合等离子体波导调制器.....	4
科研进展: 戴道铨 基于黑磷/硅混合等离子体波导的高速高响应度雪崩光探测器.....	5
科研进展: 刘旭、匡翠方 建立频域调制去背景噪声模型, 实现高效、可选择的生物成像.....	5
科研进展: 杨旻 电子和离子传输路径解耦的钙钛矿 X 射线探测器.....	6
科研进展: 钱骏 克服颅脑散射、实现穿颅显微活体脑成像最大深度记录.....	7
科研进展: 杨青 基于稀疏随机矩阵光场调制的高分辨高速多模光纤三维压缩感知成像.....	8

科研进展 全长波红外定向热辐射

热辐射是自然界普遍存在的物理现象, 大部分物体的热辐射能量主要集中在 8-14 μm 的长波红外光中。同时, 8-14 μm 红外大气透过窗口对于红外探测器、辐射制冷和红外隐身等应用是至关重要的。一方面, 通过多层光子晶体或者超材料可以实现覆盖长波红外的非定向的热辐射器。然而, 这些热发射器缺乏方向性控制, 在不需要的方向上会导致能量高损失。另一方面, 通过二维材料、基于表面等离子体激元的超表面或者极性材料可以实现定向的热辐射器。然而, 这些热辐射本质上是窄带的, 无法覆盖整个长波红外大气窗口。因此, 如何实现覆盖长波红外大气窗口的定向热辐射仍然是一个科学难题。

李强教授课题组将电介质薄膜与近零介电常数材料 (ENZ) 的亚波长薄膜结合, 利用法布里珀罗腔形成的级联的 Berreman 模式, 实现了全长波红外大气窗口的定向热辐射 (图 1)。图 1c 为红外相机不同角度观察的定向热辐射器红外图像, 在 0° 正向观察时其红外图像与铝板一样显示出低辐射特性, 而在 80° 倾斜角度观察时其红外图像与黑体一样展示出高辐射特性。该辐射器具有三大显著特点, (a) 高定向性: 辐射能量集中在 72°-82° 方向上 ($\bar{\varepsilon}_{8-14\mu\text{m}} > 0.9$), 而在 0° 方向几乎不辐射能量 ($\bar{\varepsilon}_{8-14\mu\text{m}} < 0.18$); (b) 宽带特性: 器件在整个长波红外大气窗口 (8-14 μm) 都表现出定向热辐射特性; (c) 大面积制备: 器件的制备仅涉及薄膜沉积且其厚度只有 1.91 μm , 它可以大面积地沉积在不同的柔性衬底上。

研究成果在线发表于《Laser and Photonics Reviews》期刊【Yunbin Ying, et al. Whole LWIR directional thermal emission based on ENZ thin films. *Laser and Photonics Reviews* DOI: [10.1002/lpor.202200018](https://doi.org/10.1002/lpor.202200018)】。

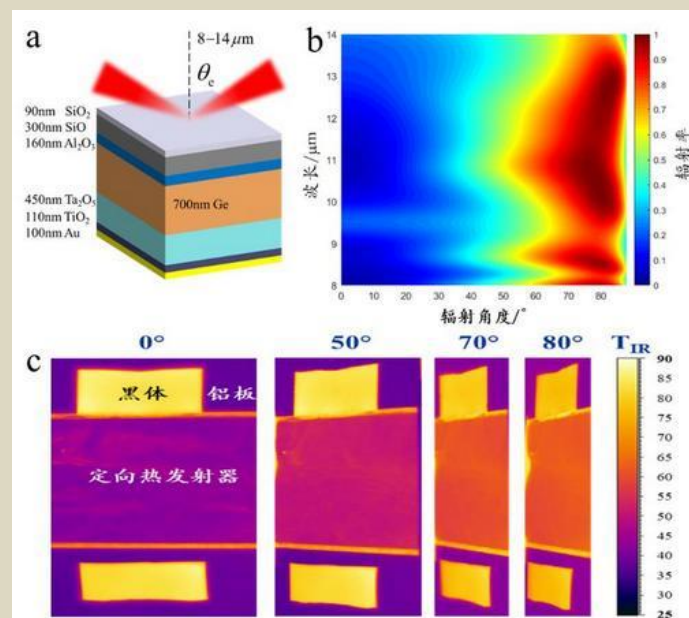


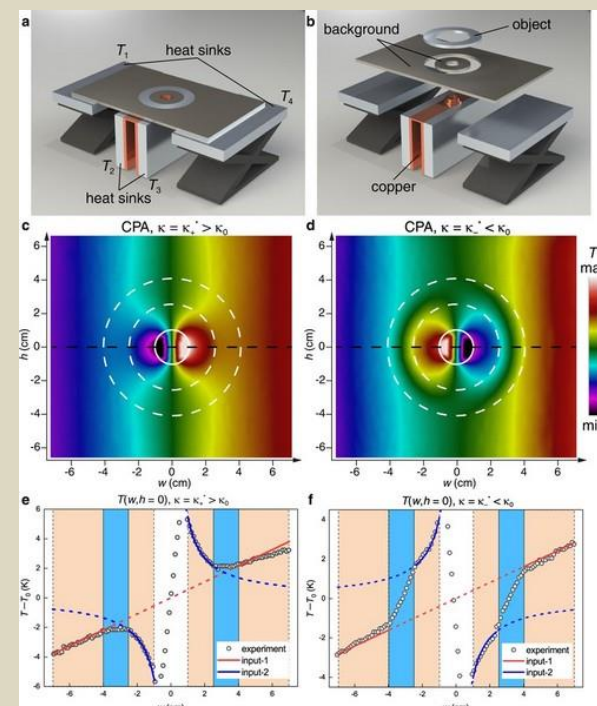
图 1 全长波红外定向热辐射器件结构及其红外热辐射特性

科研进展 相干完美吸收热传导控制

对非厄米物理学的研究发现了在有损耗材料上操纵波散射的可能性。例如，基于相干完美吸收（CPA）效应可以实现全光控制。另一方面，用热量控制传热可能会赋予不同于使用热超材料的独特范式。然而，由于热不具有方向性，波散射中的几乎所有概念对于稳态热扩散都是不明确的，因此难以理解或利用任何相干效应。

近日，浙江大学李鹰、陈红胜教授课题组联合新加坡国立大学仇成伟课题组、华中科技大学祝雪丰课题组，通过引入热场的模拟动量建立了热扩散散射理论，发现了光子学 CPA 的热学类比。与光子学

对应物不同，通过选择恰当的热输入，热学 CPA 可以利用常规材料实现热透明。该理论在传热控制方面提供了强大的灵活性，并有望激发更广泛的对扩散过程的研究。



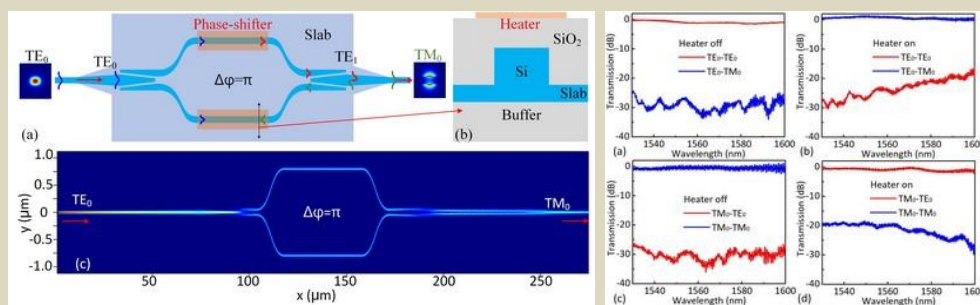
研究成果在线发表于《Nature Communications》期刊上。【Ying Li*, Minghong Qi, Jiaxin Li, Pei-Chao Cao, Dong Wang, Xue-Feng Zhu, Cheng-Wei Qiu*, Hongsheng Chen*, *et al.* Heat transfer control using a thermal analogue of coherent perfect absorption. *Nat. Commun.* (2022). DOI: [10.1038/s41467-022-30023-1](https://doi.org/10.1038/s41467-022-30023-1).】浙江大学信电学院李鹰研究员（排第一）和其课题组博士生祁铭鸿是论文的共同一作，浙江大学李鹰研究员（主通）、陈红胜教授和新加坡国立大学仇成伟教授为共同通讯作者。

科研进展

高性能硅基片上偏振光开关

硅基光电子凭借其超大透明窗口、超高集成度及 CMOS 工艺兼容等突出优势被认为是最具前景的集成光电子技术。由于硅光波导的高折射率差以及结构非对称，硅光器件往往具有非常显著偏振模色散及偏振相关性。针对这一问题，一种解决方法是引入起偏器、偏振旋转器、偏振分束器、偏振旋转分束器等高性能偏振调控器件，但目前大部分硅基偏振调控器件属于静态器件。因此，可实现偏振态灵活切换的片上偏振开关是一种极具吸引力的关键器件。

针对上述挑战，戴道铎教授团队基于脊型硅光波导模式杂化机制，提出了一种基于偏振相关模式转换器的 MZI 偏振光开关新结构。该开关输入/输出端各引入一个偏振相关模式转换器，其原理是：基于脊型硅光波导模式杂化机制，利用锥形波导结构实现 TM_0 - TE_1 模式转换以及 TE_0 模绝热无损透过传输。进一步利用 1×1 MZI 对 TE_0 和 TE_1 两个模式通过分束相移调控，从而实现两者的转换。特别地，在此 1×1 MZI 创新性地引入了基于三芯波导超模演化原理的多模分/合束器设计。研制的硅基片上偏振光开关核心功能区域仅 $246 \times 40 \mu m^2$ ，插入损耗 ~ 0.6 dB、开关串扰在 1530-1600 nm 波长范围内低于 -19 dB，具有结构紧凑、带宽大、串扰低、插损低等突出优点。



该研究成果在线发表在《Nanophotonics》上。【Weike Zhao, Ruoran Liu, Yingying Peng, Xiaolin Yi, Haitao Chen and Daoxin Dai*, High-performance silicon polarization switch based on a Mach-Zehnder interferometer integrated with polarization-dependent mode converters, *Nanophotonics*, 11(10), 2293-2301, 2022. DOI: [10.1515/nanoph-2022-0022](https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0022)】（赵伟科博士为第一作者）。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、国家自然科学基金青年基金等项目支持。

科研进展

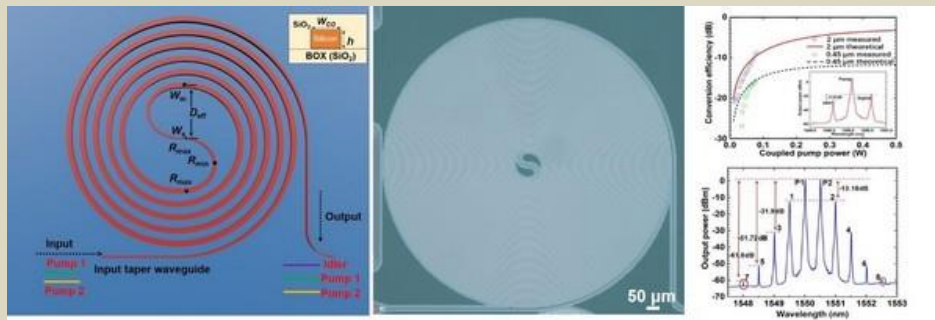
超越单模的低损耗硅光子波导螺旋中的高效四波混频

非线性硅基光子学在高速光信号处理、光参量放大、波长转换、脉冲整形以及光学频率梳的产生等方面因为其独特优势而极具吸引力，并且在过去几年获得成功的发展。对于大多数近红外通讯波段硅基非线性器件，其转化效率等性能主要受到硅波导线性传输损耗和非线性吸收的限制。而低损耗和紧凑的光波导是实现具有高效率的各种硅基非线性光子集成器件应用的关键，例如基于四波混频的波长转换、光参量放大以及光信号处理等。

针对这一问题，戴道铎教授团队最近报道了极低损耗硅波导中实现高效率四波混频的最新研究成果。团队提出通过打破单模条件限制大幅度降低波导传输损耗来实现四波混频效率提升的新概念。论文基于耦合模理论对低损耗宽波导中的四波混频转化效率以及非线性品质因子做了详细的研究。通过引入锥形欧拉 S 弯曲的阿基米德螺旋波导获得超紧凑设计，设计的 $2 \mu m$ 宽硅光波导采用标准的硅光流片工艺制作，传输损耗低至 ~ 0.28 dB/cm。在四波混频实验中，在 $2 \mu m$ 宽和 20 cm 长的硅光子螺旋波导中实现了强四波混频效应，转换效率高达 -8.52 dB，并且在泵浦功率约为 80 mW 的情况下产生了 8 个新波长，极大超越了同等情况下常规 $0.45 \mu m$ 单模硅波导的性能，也是目

前相同条件下硅波导中连续光泵浦四波混频最好的效果。本文提出的超越单模限制的硅光子学为片上非线性光子学开辟了新途径,将为非线性光子学应用带来新机遇。

相关成果表于《Optics Express》【Mingfei Ding, Ming Zhang, Shihan Hong, Yi Zhao, Long Zhang, Yi Wang, Haitao Chen, Zejie Yu, Shiming Gao, and Daoxin Dai*, High-efficiency four-wave mixing in low-loss silicon photonic spiral waveguides beyond the singlemode regime, *Optics Express*, 30(10), 16362-16373, 2022. DOI: [10.1364/OE.456704](https://doi.org/10.1364/OE.456704)】(博士生丁明飞为第一作者)。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。



超低损耗多模硅光子波导螺旋中的高效四波混频

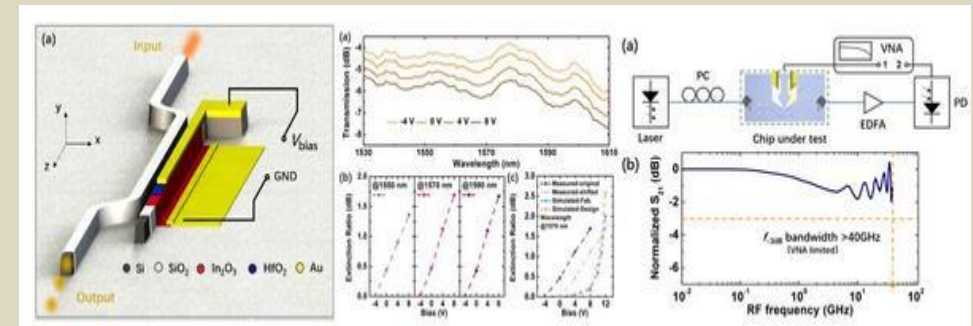
科研进展

高带宽硅-氧化铟混合等离子体波导调制器

在集成光电子领域,硅基电光调制器是承担电-光信号转换功能的核心器件。尽管全硅基的电光调制器已经取得了长足的发展,人们仍然在寻求更强电光调制效应的功能材料并将其与硅材料进行混合集成,以实现更高性能的电光调制器。近年来,透明导电氧化物

(Transparent conductive oxides, TCOs) 以其强于硅的等离子色散效应和随之而来的介电常数近零效应 (Epsilon-near-zero effect, ENZ effect) 引起了广泛关注。然而,目前基于硅-透明导电氧化物的混合集成电光调制在调制带宽上遇到瓶颈, <4 GHz 的带宽上限使其的进一步发展受到限制。

针对这一问题,戴道铎教授团队和叶辉教授课题组合作研究,提出并实现了一种高带宽硅-氧化铟混合等离子体调制器,论文对硅-透明导电氧化物混合集成的电光调制器的半导体/光学/电学特性进行了全面的分析,指出超紧凑的非对称定向耦合器具备高带宽调制的潜力。同时,基于硅基光波导和高迁移率氧化铟薄膜的制备工艺,研究团队进行了硅-氧化铟混合等离子体波导调制器的加工与测试,在长度仅为 3.5 μm 的调制区域内实现了消光比>1.4dB 的宽谱调制 (1530-1610nm),调制带宽>40 GHz,该实验结果较以往工作提升了 10 倍以上。论文提出的超紧凑非对称定向耦合器结构对包括硅-透明导电氧化物混合集成在内的电容型调制器具有重要意义,为进一步提升硅基混合集成电光调制器的高速性能提供了新的可能性。



高带宽硅-氧化铟混合等离子体波导调制器

相关成果发表于《APL photonics》【Yishu Huang, Jun Zheng, Bingcheng Pan, Lijia Song, Kuan-An Chen, Zejie Yu, Hui Ye, and Daoxin Dai*. High-bandwidth Si/In₂O₃ hybrid plasmonic waveguide modulator, *APL Photonics* 7(5): 05130, 2022. DOI: [10.1063/5.0087540](https://doi.org/10.1063/5.0087540)】(硕士生黄奕舒为第一作者), 并被选为封面。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

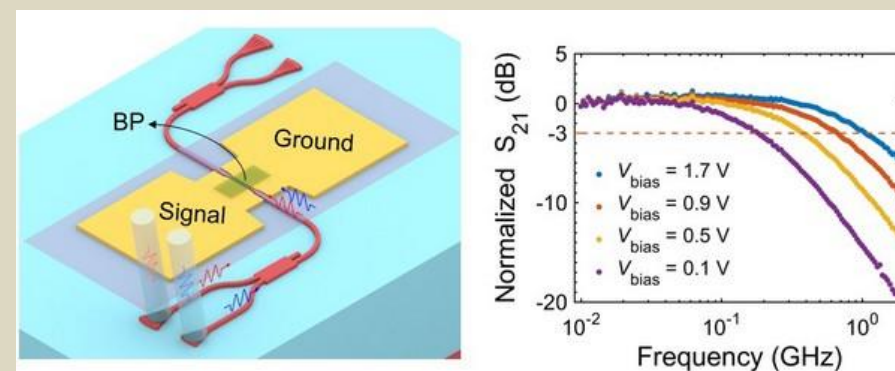
基于黑磷/硅混合等离子体波导的高速高响应度雪崩光探测器

硅光集成平台为包括片上光传感、光通信、激光雷达在内的多种应用提供了广阔的发展前景。随着工作波段从近红外拓展至中红外, 如何实现中红外光的片上探测成为一个重要问题。二维材料由于其宽波段吸收、易于与硅集成和优异的光电性质为这一问题提供了可能的解决方案。目前已有包括石墨烯、黑磷、二硫化钼在内的多种二维材料被应用于光探测研究。然而对于二维材料光探测器, 同时实现高响应度以及高响应速度依然具有很大的挑战性。最具代表性的金属-二维材料-金属结构可以实现 10-100 GHz 的大电学带宽, 但响应度通常小于 1 A/W。一些基于光栅压或雪崩效应的二维材料光探测器, 展示了很高的响应度, 但是电学带宽通常在百 kHz 量级。

针对这一问题, 戴道铎教授团队最近报道了一种基于混合等离子体波导的黑磷雪崩光探测器。利用薄硅等离子体波导结构具有的局域光场增强特点, 增强黑磷的光吸收, 并缩短载流子的渡越距离。在此基础上, 该器件结合波分复用器实现近/中红外光的探测, 并利用雪崩倍增效应, 同时实现大电学带宽和高响应度。该器件在 1.55 μm 波段实现了 66 A/W (光功率为 2.9 μW), 在 1.95 μm 波段实现了 125 A/W (光功率为 1.4 μW) 的高响应度。实验测得的电学带宽高达 1.05 GHz,

比目前报道的二维材料高增益光探测器高了 3 个数量级。通过对器件的暗电流特性、静态光学响应、高频光学响应的综合分析, 确认了该器件的工作机制为雪崩倍增效应。该器件在响应度和响应速度方面表现出优异的综合性能, 为未来的近/中红外波段的成像、光学传感、光通信等领域的应用提供了一个可能的解决方案。

相关成果发表于《ACS Photonics》【Chaoyue Liu⁺, Jingshu Guo⁺, Laiwen Yu, Yuluan Xiang, Hengtai Xiang, Jiang Li, and Daoxin Dai*, High-speed and high-responsivity silicon/black-phosphorus hybrid plasmonic waveguide avalanche photodetector, *ACS Photonics*, 9(5): 1764-1774, 2022. DOI: [10.1021/acsp Photonics.2c00244](https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00244)】(博士生刘超越和研究员郭敬书为共同第一作者)。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。



高速高响应度的黑磷雪崩光探测器

科研进展

建立频域调制去背景噪声模型, 实现高效、可选择性的生物成像

光学超分辨显微成像方法近年来取得长足突破,但存在系统复杂、特异性染料标记等缺点,限制了其广泛应用。科学家一直在探索简单有效、普适性荧光标记、的高分辨光学成像方法。作为第一个真正获得广泛认可的远场超分辨显微技术,受激辐射损耗成像 STED 已经取得了长足的进步。然而,STED 由于过高的损耗光强,往往伴随不可避免的二次激发信号和未损耗完全的荧光信号;这些信号掺杂在有效信号中,难以用传统方法分离,结果导致成像分辨率和信噪比下降。

最近,刘旭、匡翠方教授研究组提出了一种基于频域调制的 STED 技术 (Dual-modulation difference stimulated emission depletion microscopy, dmdSTED)。该方法在传统 STED 成像装置中引入强度调制器和锁相放大器,对激发光和损耗光分别进行时间调制,得到时间调制的荧光信号;通过在频域进行处理,有效信号、二次激发信号、

未损耗完全信号在频域上以特定频率值分开;最后用锁相放大器解调有效荧光,选择性地丢弃背景信号,最终获得去背景的超分辨成像。该成像方法被成功应用于生物细胞和钙钛矿成像中,达到八分之一波长的分辨能力,具有无需特殊荧光标记、低照明光强、高信噪比等优点。

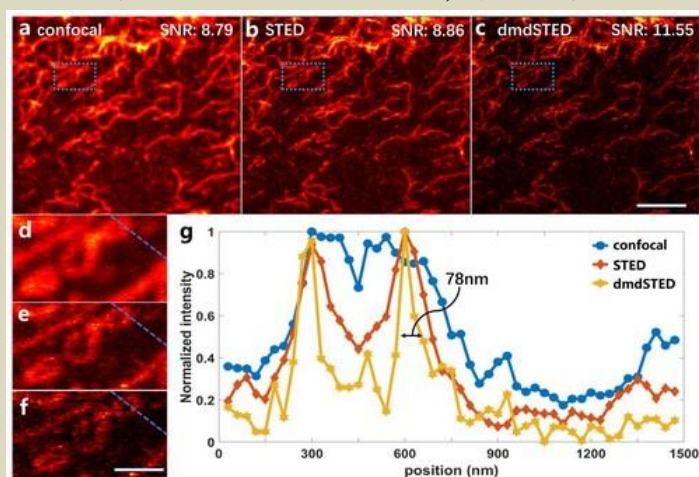
研究成果发表于《Advanced Photonics》期刊【Wensheng Wang, Chuankang Li, Zhengyi Zhan, Zhimin Zhang, Yubing Han, Cuifang Kuang, Xu Liu. Dual-modulation difference stimulated emission depletion microscopy to suppress the background signal. *Advanced Photonics*. 4(4), 2022.】

科研进展

电子和离子传输路径解耦的钙钛矿X射线探测器

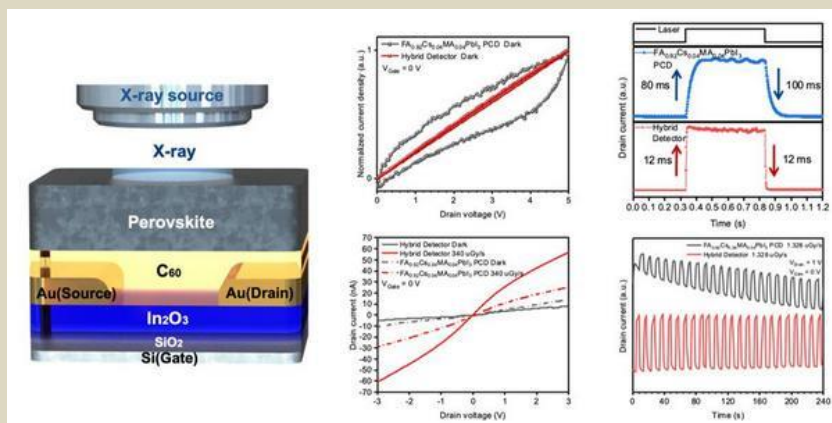
X 射线自被发现以来,因其很强的穿透能力,已广泛应用于医学病理诊断,安检以及工业探伤等领域。钙钛矿作为一种新兴的 X 射线光敏材料,其优异的射线吸收能力及良好载流子传输能力使得它成为非常具有潜力的 X 射线探测候选者。然而,因为钙钛矿晶体是由共价键和离子键混合形成的,其内部存在一个严重且难以根除的离子迁移问题,这被认为是造成许多不良器件特性,例如高暗电流、电流基线漂移以及响应滞后等问题的关键原因。

最近,杨旻教授课题组与西湖大学朱博文研究员课题组合作提出了一种将钙钛矿垂直堆叠在氧化铟晶体管上的横向输运结构的新型异质结构 X 射线探测器,钙钛矿主要作为 X 射线敏化材料来激活氧化铟导电沟道,实际的电流信号在横向金属氧化物器件中传导并采集。由于离子和电子的输运通道解耦,异质结构探测器对钙钛矿的离子运动并不敏感,因此没有磁滞现象,且几乎没有暗电流基线的漂移。该探测器还具有更小的暗电流,更快的响应时间,以及更高的光电流信



双调制受激辐射损耗显微技术 dmdSTED 在细胞结构成像中的应用:(a-c) confocal、STED、dmdSTED 在细胞微管上的成像效果对比,(d-f)虚线蓝框局部放大成像效果对比,(g)沿蓝色虚线的信号强度对比。

号。这项工作为克服钙钛矿探测器中难以根除的离子迁移问题,实现高性能钙钛矿 X 射线探测器和阵列提供了一种新颖且有效的器件结构。



研究成果在线发表于《Small Methods》期刊上。【Peng Jin, Yinjie Tang, Xuehui Xu, Peng Ran, Yan Wang, Yue Tian, Yong Huang, Bowen Zhu*, Yang (Michael) Yang*. Solution-Processed Perovskite/Metal-Oxide Hybrid X-Ray Detector and Array with Decoupled Electronic and Ionic Transport Pathways. *Small Methods* (2022). DOI: [10.1002/smt.202200500](https://doi.org/10.1002/smt.202200500).】浙江大学光电学院硕士生金鹏和西湖大学博士生唐颖捷为论文的共同第一作者,浙江大学杨旻教授和西湖大学朱博文研究员为共同通讯作者。

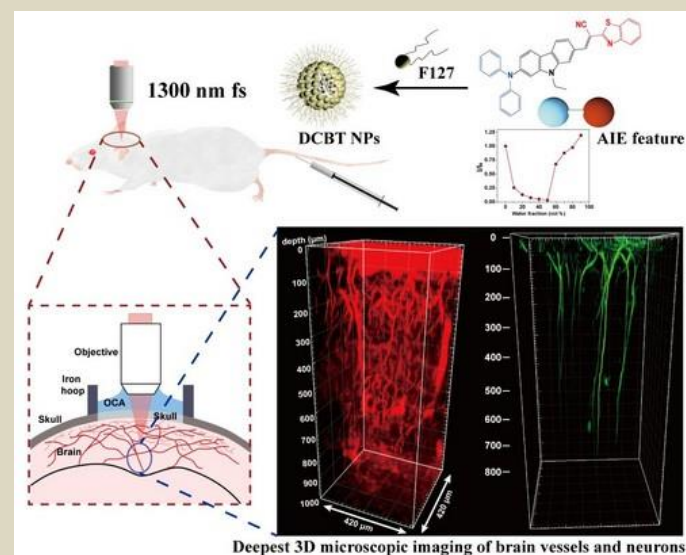
科研进展

克服颅脑散射、实现穿颅显微活体脑成像最大深度记录

光学成像以其独特的高空间分辨率、实时性以及无电离辐射等优点,目前已成为脑科学以及脑疾病研究中的重要手段。但是,颅骨和脑组织的高散射特性限制了在颅骨完好条件下光学脑成像的深度。目

前亟需一种能够同时克服颅骨和脑组织散射的方法,以实现穿颅下的无损大深度脑观测。

最近,钱骏教授课题组提出了一种颅骨光透明技术和 1300 nm 飞秒激发三光子荧光显微术相结合、以克服颅骨和脑组织高散射干扰的方法。对于颅骨的高散射,该课题组开发了一种以重水 (D_2O) 为溶剂、生物兼容的颅骨光透明剂,在通过折射率匹配降低颅骨散射的同时,用重水替换颅骨内的水 (H_2O),降低了颅骨对近红外飞秒激发光的吸收损耗。对于脑组织的高散射,该课题组采用了 1300 nm 的飞秒激发模式,该波长的光子在脑组织中具有较高的光学穿透能力、相对较低的组织光吸收和光热损伤;并且,1300 nm 飞秒光可有效实现标记了绿色荧光蛋白的脑神经元的三光子激发。此外,课题组基于聚集诱导发光分子开发了一种高效的三光子荧光探针。与之前报道的三光子荧光探针相比,该类探针在 1300 nm 波长处具有更大的三光子作用



Deepest 3D microscopic imaging of brain vessels and neurons

截面（开颅脑血管三光子荧光显微成像可达 1.5 mm 深度，为国际上最高）。

结合以上所有技术，课题组实现了深度为 1.0 mm 的穿颅脑血管显微成像以及深度超过 700 μm 的穿颅神经元显微成像，分别创造了目前国际上活体穿颅脑血管和神经元显微成像的最大深度记录。进而，课题组利用单束飞秒激发光，首次在小鼠颅骨完整的情况下，实现了脑血管和神经元的双通道活体显微成像，成像深度高达 600 μm 。该工作为无损监测大深度的大脑活动、解析血管和神经元的交互作用、以及研究相关脑疾病，提供了新的解决方案。

研究成果在线发表于《Nano Today》期刊上。【Mubin He, Dongyu Li, Zheng Zheng, Ben Zhong Tang*, Jun Qian*, *et al.* Aggregation-induced emission nanoprobe assisted ultra-deep through-skull three-photon mouse brain imaging, *Nano Today* 45, 101536 (2022) DOI: [10.1016/j.nantod.2022.101536](https://doi.org/10.1016/j.nantod.2022.101536)】浙江大学光电学院、现代光学仪器国家重点实验室博士研究生何木斌为第一作者，钱骏教授为通讯作者。

科研进展

基于稀疏随机矩阵光场调制的高分辨高速多模光纤三维压缩感知成像

随着细胞生物学、显微成像技术和医学研究的发展，活体组织成像逐渐成为研究的热点。多模光纤内窥镜能在如发丝般纤细的探头上容纳数千个模式，是对生物过程进行低损伤、高分辨率活体观测的理想选择。然而，受限于空间光调制器的刷新速率和奈奎斯特采样定律，传统逐点扫描的成像模式仍然无法满足对三维动态过程进行高速原位观测的需要。

最近，杨青教授课题组将光场调控技术与压缩感知成像结合，利用单根多模光纤内窥镜首次实现了亚细胞分辨率的高速三维成像。通过设计高正交性的稀疏随机照明图案，将成像速度提升 8 倍的同时可对复杂样品进行高对比度成像。结合分区域采样方法，实现了对多种

成像参数的灵活调节以及重构速度上十倍的提升。基于三维稀疏随机采样和体重构算法，首次验证了在大成像深度内进行多模光纤感知成像的可能性，并有效地去除了离焦面噪声的干扰。该工作利用计算成像的思想，打破了传统光学成像的物理制约，为多模光纤内窥镜以微创或无创的方式对狭窄空间内动态过程的高速在体三维成像奠定了基础。该技术未来有望被应用于活检诊断、细胞动力学、脑成像、临床病理研究等需要高速在体观测的领域来进一步提高多模光纤内窥镜的成像速度和信噪比。

研究成果在线发表于《Science Bulletin》期刊上，被选为封面论文。【Zhenyu Dong, Zhong Wen, Chenlei Pang, Liqiang Wang, Lan Wu, Xu Liu, Qing Yang*, *et al.* A modulated sparse random matrix for high-resolution and high-speed 3D compressive imaging through a multimode fiber, *Sci. Bull.* (2022). DOI: [10.1016/j.scib.2022.03.017](https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.03.017).】浙江大学光电学院硕士研究生董震宇为第一作者，杨青教授为通讯作者。

