



2022 年第 5 期
总第 44 期
2022 年 11 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

核心器件：刘旭、匡翠方 基于单色边缘抑制的快速超分辨直写光刻技术.....	1
核心器件：戴道铤 超过 110 GHz 的超紧凑铌酸锂微腔电光调制器.....	2
核心器件：李强 正负差分可调宽带红外辐射器.....	3
核心器件：戴道铤 高性能波导型横向锗硅雪崩光电二极管.....	4
核心器件：李强 高品质因子全介质吸收.....	4
核心器件：杨宗银 基于可调谐范德华异质结的高分辨微型光谱仪.....	5
核心器件：林宏焘 倏逝波增强光-Te 相互作用的高速中红外光电探测..	6
系统装备：刘东、刘崇 车载海洋高光谱分辨率激光雷达高精度遥感海水光学特性剖面.....	7
系统装备：刘东 基于激光雷达的日间边界层高度变化及其对 PM2.5 浓度估计影响分析.....	8
成像算法：刘旭、杨青 基于单根多模光纤的高速三维成像.....	9

核心器件

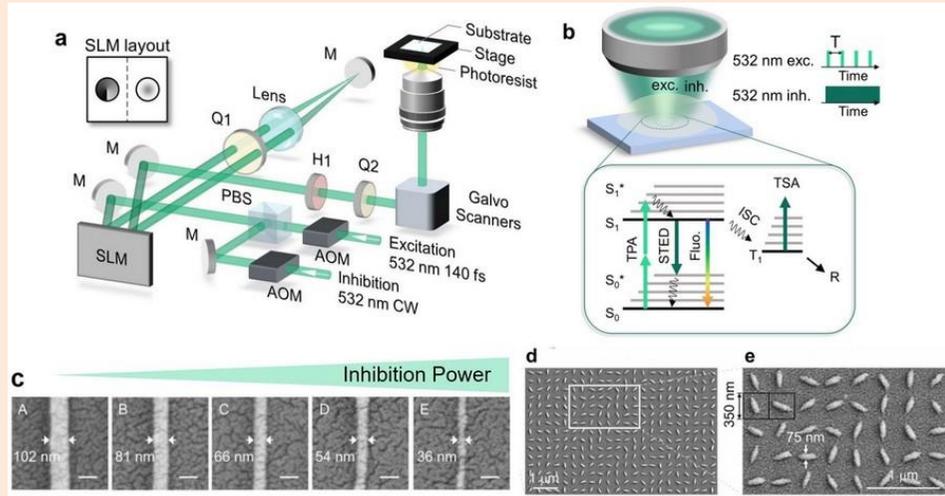
基于单色边缘抑制的快速超分辨直写光刻技术

微纳制造在生物医学、半导体等行业应用中都至关重要。在微纳制造技术中，激光直写无需掩膜可直接加工三维结构，达到百纳米级的分辨率，目前已经被广泛地应用。尽管激光直写在某些领域取得了突破性的进步，但近年来不断增长的应用需求与刻写技术能力之间的差距越来越大。其中，阿贝衍射极限是光刻分辨率的固有光学极限。边缘抑制效应直写光刻利用可见光波段突破衍射极限，被提出后就受到了极大的关注，为进一步的纳米制造提供了一个非常有前景的方案。然而，传统的多色边缘抑制效应直写光刻技术受限于色差问题难以实现大视场快速扫描的超分辨刻写。

最近，刘旭教授、匡翠方教授课题组创新性地提出一种使用单色边缘抑制直写光刻的技术，以提高激光直写的分辨率，同时可以避免传统多色边缘抑制直写光刻的色差问题，为微纳光子器件制造提供了一个强大的工具。这项技术可实现最小线宽 36 nm 和最小分辨率 140 nm 的超分辨刻写。比现有的光抑制光刻技术，刻写速度提高至少 10 倍。利用这项刻写技术的高速及高分辨率的特点，用在可见光波段的自旋解耦超表面可以在几分钟内刻写完成，并达到与仿真相吻合的性能。最后，为展示该技术 3D 结构刻写的潜力，在亚波长尺度上无掩模制造了一种三维光子晶体，该晶体可产生近紫外的结构色。该刻写技术有望进一步用在光学器件制造上。

研究成果在线发表于《PhotoniX》期刊上。【Minfei He, Zhimin Zhang, Chun Cao, Yiwei Qiu, Xiaoming Shen, Guozun Zhou, Zixin Cai, Xinjie Sun, Xin He, Liang Xu, Xi Liu, Chenliang Ding, Yaoyu Cao, Cuifang Kuang and Xu Liu. Single-color peripheral photoinhibition lithography of nanophotonic structures. *PhotoniX* 3, 25 (2022). DOI:

10.1186/s43074-022-00072-2.】浙江大学光电学院博士研究生何敏菲为第一作者，刘旭教授和匡翠方教授为共同通讯作者。



调制光信号。论文对 FP 腔电光调制器进行了综合理论分析，讨论了调制带宽和调制效率同微腔 Q 值及工作波长失谐的相关性。设计得到的 2×2 FP 腔调制器的等效腔长仅 $\sim 50 \mu\text{m}$ 。理论表明，利用峰值增强效应，其调制带宽可超过 200 GHz，所研制器件 3 dB 带宽大于 110 GHz（受限于实验设备），实现了首个带宽超 110 GHz 的微腔型薄膜铌酸锂电光调制器，并进一步实验演示了 100 Gbps OOK 和 140 Gbps PAM4 信号产生，其能耗仅 4.5 fJ/bit。理论和实验表明该器件具有超小尺寸、超高带宽、超低能耗等优点，具有突出的应用潜力。

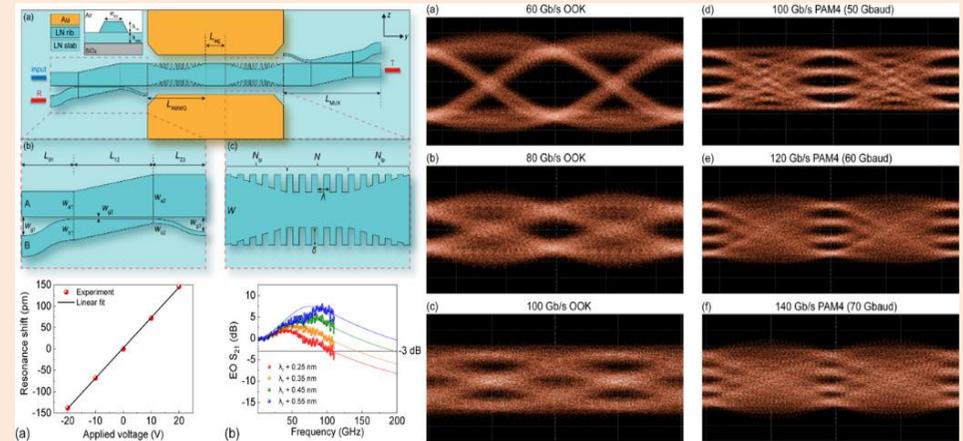
研究成果在线发表于《Chip》期刊【Bingcheng Pan, Hongxuan Liu, Haochen Xu, Yishu Huang, Huan Li, Zejie Yu*, Liu Liu, Yaocheng Shi and Daoxin Dai*, Ultra-compact Lithium Niobate Microcavity Electro-Optic Modulator beyond 110 GHz, *Chip*, 100029, 2022. DOI: [10.1016/j.chip.2022.100029](https://doi.org/10.1016/j.chip.2022.100029)】博士生潘炳呈为第一作者。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。

2

核心器件 超过 110 GHz 的超紧凑铌酸锂微腔电光调制器

近年来，薄膜铌酸锂因其高电光系数、强光场限制和低传输损耗等优点已成为实现高性能电光调制器的最佳选择之一。与马赫曾德调制器相比，基于微腔的调制器在某些方面具有更多优势，比如结构紧凑，功耗低，还可以同时用于波分复用和调制。然而，由于铌酸锂材料的各向异性特性，在薄膜铌酸锂上实现基于微腔的电光调制器仍然非常具有挑战性。

针对上述挑战，戴道铎团队基于铌酸锂薄膜提出并实现了一种基于 2×2 FP 腔的新型电光调制器，该调制器可以借助多模波导光栅中的 TE_0 - TE_1 模式转换和 TE_0 - TE_1 模式解复用有效分离输入光和反射的



铌酸锂微腔电光调制器



核心器件

正负差分可调宽带红外辐射器

动态调控物体位于大气透明窗口 8~14 μm 波段的红外辐射在实际应用中尤为重要，无论是通过热辐射传递能量的热管理，还是借由热辐射承载信息的红外探测或隐身。其中，相变材料因其晶化前后折射率改变、具有非易失性，成为实现动态调控的主要手段之一，但仍存在辐射对比度不够大、不能实现负差分辐射调控等缺点。作为一种新型的相变材料，IST (In_3SbTe_2) 独特的相变特性为解决上述问题提供了新思路。IST 在非晶态时是一种接近半导体的电介质，而当其加热相变为晶态后则呈现出高损耗金属的特质（在 10 μm 波长处， $n_a \approx 3.8$, $k_a \approx 0$; $n_c \approx 12.6$, $k_c \approx 18.1$ ）。

李强教授课题组应用 IST 设计了两种能够分别实现负差分、正差分辐射调控的可调热辐射器件，且均具有宽带、高对比度、非易失性、结构简单等优点。负差分辐射调控器件能够实现低温高辐射、高温低辐射（图 1a），其在 8~14 μm 波段的平均辐射率从低温非晶态下的 0.84 变为高温晶态下的 0.09（图 1b）；该器件在展示实验中（图 1c、d），成功令处于不同温度的物体获得与背景相近的辐射温度，实现红外隐身。正差分辐射调控器件可实现低温低辐射、高温高辐射（图 2a），其在 8~14 μm 波段的平均辐射率可以从低温非晶态下的 0.06 变为高温晶态下的 0.89（图 2b）；该器件可被应用于物体的辐射热管理（图 2c），物体在相同输入功率下分别通过加盖处于非晶态、晶态的样品，最终到达的平衡温度相差接近 10%（图 2d）。

研究成果在线发表于《ACS Photonics》期刊【Weiyi Zha, *et al.* Nonvolatile High-contrast Whole Long-Wave Infrared Emissivity Switching Based on In_3SbTe_2 . *ACS Photonics* (2022). DOI: [10.1021/acsp Photonics.2c00714](https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00714)】。

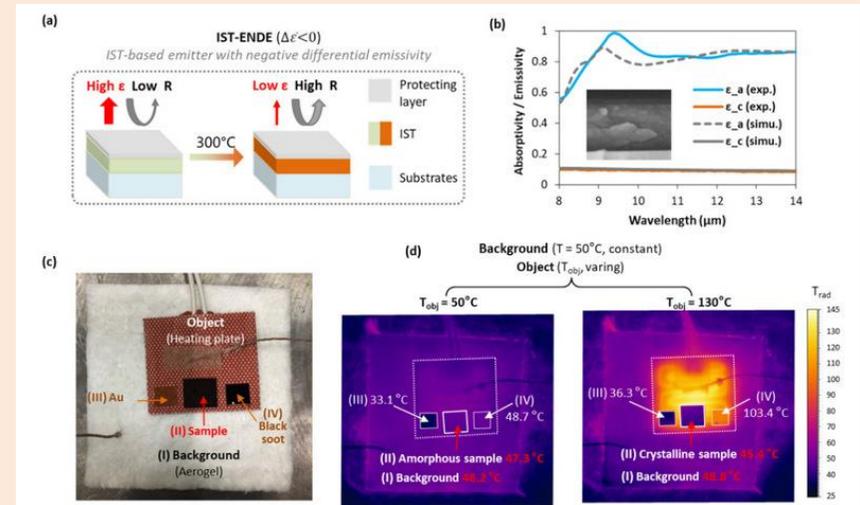


图 1. 负差分辐射调控器件结构、红外辐射谱、应用于红外隐身的实验

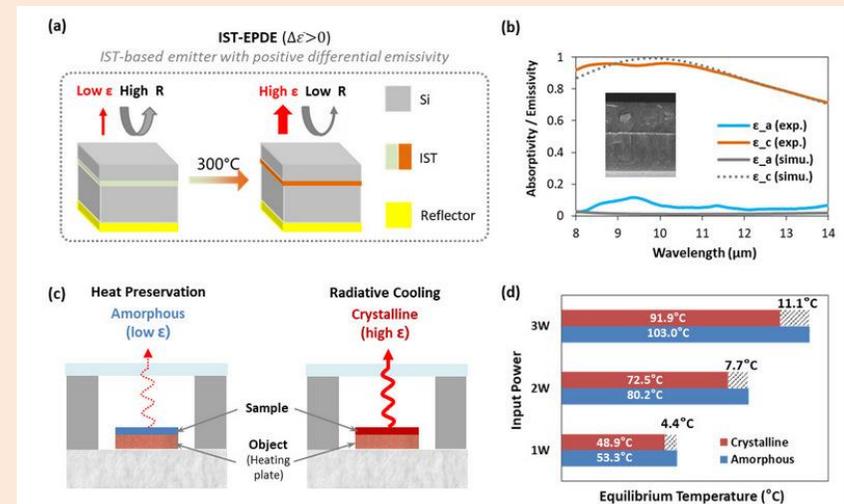


图 2. 正差分辐射调控器件结构、红外辐射谱、应用于热管理的实验



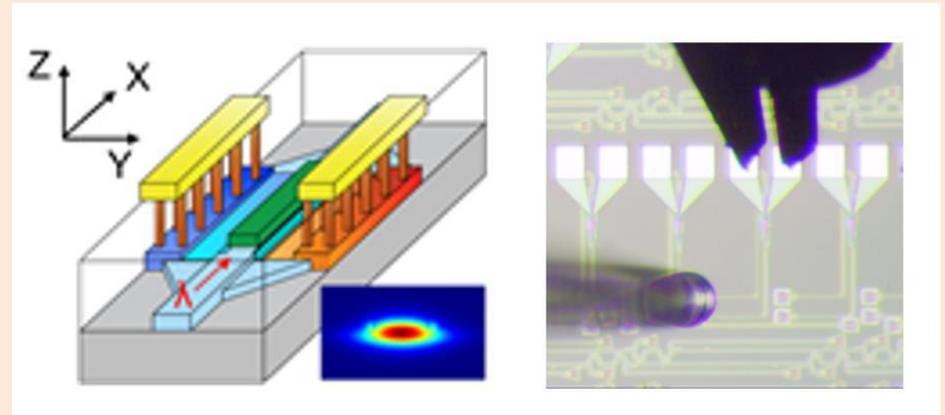
核心器件

高性能波导型横向锗硅雪崩光电二极管

高速、高灵敏度的接收机是超大容量和超低功耗数据传输系统中不可或缺的一部分，而高速雪崩光电二极管（APD）又是其核心光电器件。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。但基于 SACM Ge/Si APD 在以往报道器件依然存在带宽较小和增益带宽积较低等缺点。

为此，戴道铤教授团队最近研制了一种高响应度、高带宽、高增益带宽积的横向拉通型 Ge/Si APD，既保留了基于 SACM Ge/Si APD 高响应度和低雪崩噪声的优点，同时极大地提高 APD 的带宽。该器件通过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，通过巧妙的应用了 P 型轻掺杂和 N 型重浓度掺杂形成电场非均匀分布的增益区，应用雪崩死区效应降低电子空穴分离比率，从而实现低过剩噪声和高增益带宽积。最终研制的 APD 具有优异性能：其单位响应度达 $0.93 \text{ A/W} @ 1310 \text{ nm}$ ； -14 V 偏压下 3 dB 带宽达 48 GHz 、增益带宽积高达 615 GHz （迄今报道最高水平）。进一步采用该器件成功演示了 100 Gbps NRZ 信号接收。该器件具有优异的工艺兼容性，工艺简洁，有望在超大规模集成、超大容量和超低功耗的硅基集成芯片应用中彰显其独特的优势。

研究成果发表于美国光学学会旗舰期刊《Optica》【Y. Xiang, H. Cao, C. Liu, J. Guo, and D. Dai, High-speed waveguide Ge/Si avalanche photodiode with a gain-bandwidth product of 615 GHz , *Optica* 9, 762-769, 2022. DOI: [10.1364/OPTICA.462609](https://doi.org/10.1364/OPTICA.462609)】博士生项宇奎为第一作者，戴道铤教授为通讯作者。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。



横向拉通型锗硅 APD 及其灵敏度

核心器件

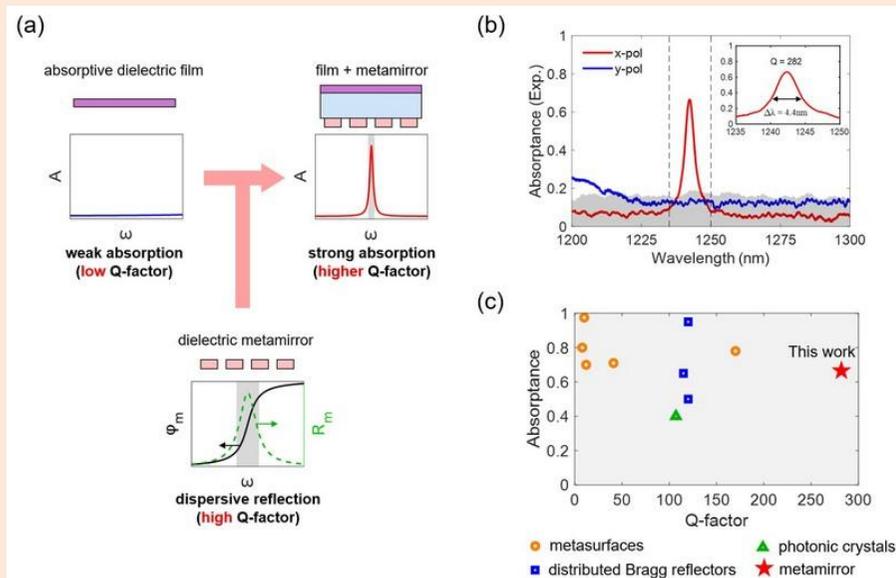
高品质因子全介质吸收器

全介质光学吸收超表面由于欧姆损耗低、CMOS 兼容性好、工作波段外透明，被广泛应用在光电探测、红外热辐射调控、太赫兹成像等领域。其中高品质因子全介质吸收超表面由于谐振峰窄、场增强倍数高，对于提高光电探测灵敏度、增强非线性效应等具有重要作用。然而目前实验中报道的全介质吸收超表面品质因子普遍较低（品质因子 < 170 ），其原因主要是：在制备过程中不仅要尽可能降低超表面的辐射损耗，同时还要精确调控材料吸收、散射等引起的非辐射损耗，使两者匹配达到临界耦合条件。此外，由于单谐振全介质超表面具有 50% 的吸收率极限，因此往往需要波长简并的两个谐振实现高效吸收，多个谐振的叠加进一步增加了损耗通道的数量，从而降低了吸收器的品质因子。

近期李强教授课题组提出了利用全介质超表面作为色散反射镜，结合低损耗介质膜，实现高品质因子全介质吸收的方法，并在实验中

实现了近红外波段品质因子 282、吸收率 66.5% 的高效吸收。研究者理论上证明了将高品质因子全介质超表面作为底部反射镜，与顶部介质薄膜形成 FP 腔，最终可以得到更高品质因子的吸收（高于底部超表面的品质因子）。这一工作为光电探测、传感、激光器设计、红外热管理等提供了新的方法。

研究成果在线发表于《ACS Photonics》期刊上。【Jianbo Yu, *et al.* High-Q Absorption in All-Dielectric Photonics Assisted by Metamirrors, *ACS Photonics* (2022). DOI: [10.1021/acsp Photonics.2c00901](https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00901)】



(a) 高品质因子全介质吸收原理图。(b) 吸收光谱。(c) 与现有工作比较。

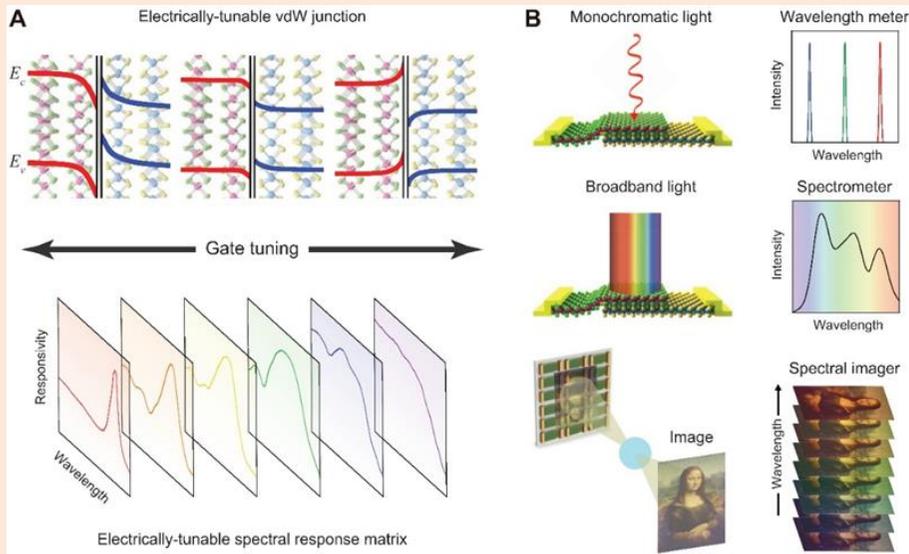
核心器件

基于可调谐范德华异质结的高分辨微型光谱仪

光谱仪是工业检测、化学、生物分析以及地质勘探等领域不可缺少的重要仪器。随着各种便携设备和片上集成系统的迅速发展，对微型化、高性能（包括高分辨率及宽带响应等）光谱仪的需求也日益迫切。近期，研究者将计算重构光谱技术应用于光谱仪微型化，通过预校准，根据测量数据的特征，实现了未知光谱的重建。计算重构算法为光谱仪微型化提供了一条新思路，但截至目前，基于计算重构算法的微型化光谱仪的性能还十分受限，分辨率和工作带宽通常会收到探测器数量及工作温度等条件的影响。

最近，为了摆脱微型光谱仪性能上的限制，杨宗银研究员课题组与国内外著名研究团队合作，在前期纳米线光谱仪的基础上开发出了基于新型可调范德华异质结的超微型光谱仪，其尺寸仅为数微米。这种新型的超微型光谱仪利用二维材料优异的光电响应特性以及其构成范德华异质结时丰富的可选性，完美规避了传统光谱仪微型化路径的技术难点。通过调节栅压改变范德华异质结的波长依赖响应度并将其特征应用于光谱重构，研究者首次在微米尺度下实现了 0.36 纳米的窄带光谱准确度以及 3 纳米的复杂宽带光谱分辨率，并且利用该光谱仪成功实现宏观光谱成像。该工作不仅为高性能光谱仪的微型化提供全新思路，也为大规模片上光子系统集成、芯片实验室等先进技术实现了重要的基础性突破。

研究成果发表于《Science》期刊【Yoon, Hoon Hahn, *et al.* Miniaturized Spectrometers with a Tunable van der Waals Junction *Science* 378, 296-299 (2022) DOI: [10.1126/science.add8544](https://doi.org/10.1126/science.add8544)】。



可调范德华异质结光谱仪原理图

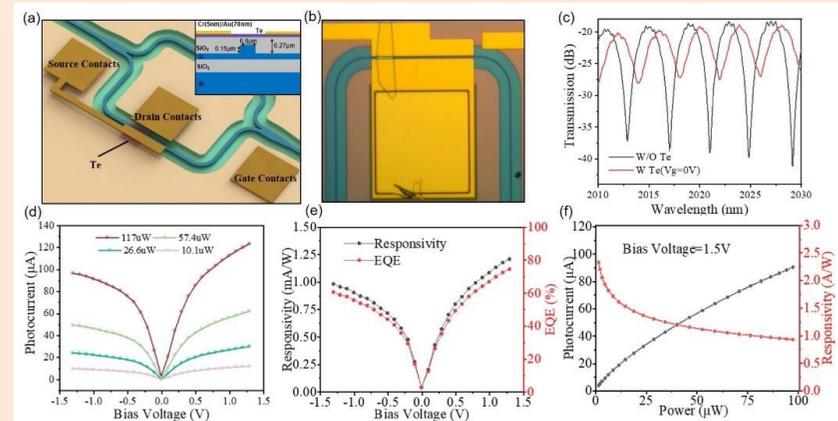
核心器件

倏逝波增强光-Te 相互作用的高速中红外光电探测器

中红外光谱范围(2-20 μm)是一个重要波段,高性能波导集成中红外光电探测器有望用于 MIR 光通信网络和片上光学传感系统。传统的窄带隙半导体材料,如 HgCdTe 合金,三五族化合物等材料受晶格失配和不同热膨胀系数的限制,很难在硅光子平台上实现外延生长,并用于波导集成光电探测器。范德华(vdW)材料具有超快载流子迁移率、高非线性、可调带隙、原子级平坦表面和强光-物质相互作用等特性,正在成为潜在的候选材料。近年来,具有良好空气稳定性,高载流子迁移率($\sim 900 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)的单质 Te,被广泛关注,有望应用于高性能片上集成中红外探测。

最近,林宏焘课题组和乔旭升老师、朱海明老师和西湖大学李兰老师合作,研究了高速波导集成 Te 中红外探测器。首先对合成的 Te 纳米片进行瞬态光谱测试,得到其载流子寿命为 $\sim 75 \text{ ps}$,证明了 Te 高速器件应用的潜力。Te 由于其独特的手性链晶格结构,存在着载流子迁移率相关的平面各向异性,我们证明了 Te 在[0001]晶向制备高速器件的潜力。然后我们将 Te 与硅光波导异质集成,实现了在 2015 nm 处,探测器的响应度达到了 2.3 A W^{-1} ($P_{\text{in}}=10.1 \mu\text{W}$),器件的外量子效率达到了 80%,响应带宽达到了 4 GHz,是迄今为止速度最快的 vdW 探测器。证明了基于 Te 的波导集成探测器有望应用于高速通信链路中,未来基于 Te 的集成器件将在中红外片上通讯、传感方面有着巨大的应用前景。

研究成果在线发表于《Advanced Optical Materials》期刊上。【Hui Ma, Jianghong Wu, Yunpeng Wang, Chuyu Zhong, Yuting Ye, Maoliang Wei, Rui Yu, Yiqing Du, Bo Tang, Cheng Su, Yilin Shi., Chunlei Sun, Lichun Wang, Haiming Zhu, Xvsheng Qiao, Lan Li, and Hongtao Lin*, *Advanced Optical Materials* (2022). DOI: [10.1002/adom.202201443](https://doi.org/10.1002/adom.202201443).】浙江大学信电学院博士研究生马辉为共同一作(排第一),林宏焘研究员教授为通讯作者。



系统装备

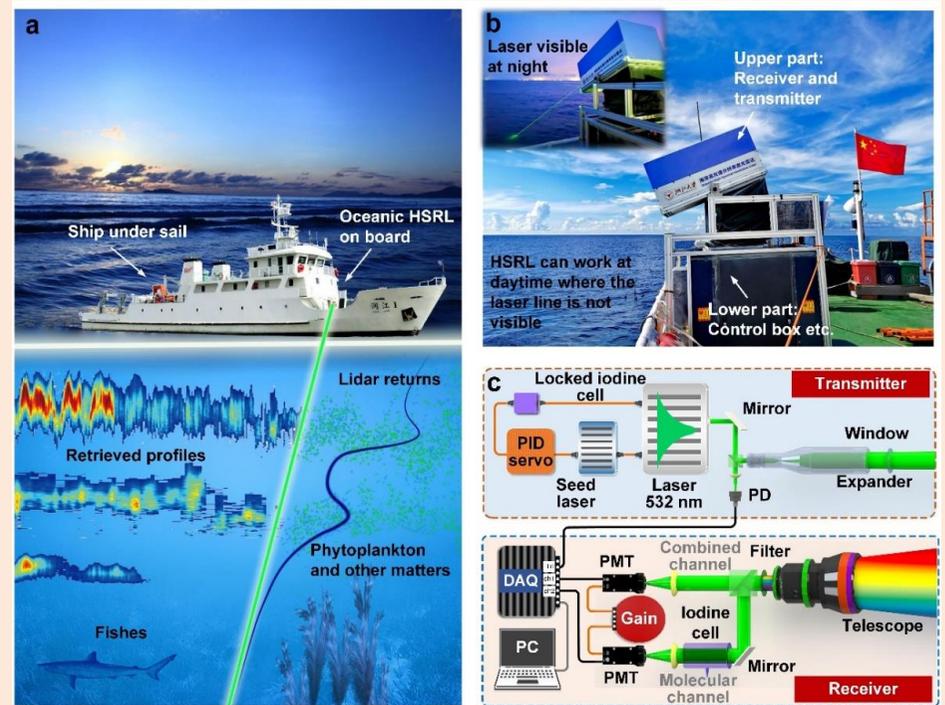
船载海洋高光谱分辨率激光雷达高精度
遥感海水光学特性剖面

激光雷达技术在海洋遥感方面具有独特的能力，在白天和夜间均可提供上层水体光学特性的连续剖面信息。该技术提高了人们对海洋生态系统和生物地球化学过程的理解，包括海洋动物的日际垂直迁移、碳循环、极地浮游植物生物量的年度循环、浮游植物层的形成机理和南极春季冰边水华的爆发等。此外，当下许多科学研究，例如中尺度涡旋和极地地区的海洋生态系统变化研究，仍然缺乏连续的、长期的剖面数据，因此激光雷达技术拥有广阔的应用前景。然而，常用弹性后向散射激光雷达需要从一次测量中计算出漫射衰减系数和颗粒后向散射系数两个未知数，这导致了一个不适定问题；而激光在海水中传播伴随着不可忽略的多次散射效应，进一步增大了海水光学特性的反演难度。

近日，刘东教授、刘崇教授研究团队，联合浙江大学海洋学院等单位，共同开发了船载海洋高光谱分辨率激光雷达 (high-spectral-resolution lidar, HSRL) 系统及方法，解决了限制海洋弹性后向散射激光雷达精度的不适定问题和激光辐射传输的多次散射难题，实现了海水光学参数立体剖面的高精度激光遥感。本研究展示的海洋 HSRL 仪器和方法极大地提升了海洋立体激光遥感精度，展示了获得高精度海水连续剖面信息的强大能力。未来，本研究展示的仪器和方法将通过持续观测实验，验证星载海洋激光雷达任务，提高对海洋物理、生态系统和生物地球化学过程的认识。

该研究成果发表于《Light: Science & Applications》期刊上【Yudi Zhou, Yang Chen, Hongkai Zhao, *et al.* Shipborne oceanic high-spectral-

resolution lidar for accurate estimation of seawater depth-resolved optical properties, *Light: Science & Applications*, DOI:[10.1038/s41377-022-00951-0](https://doi.org/10.1038/s41377-022-00951-0)】浙江大学宁波研究院周雨迪博士、浙江大学光电学院硕士研究生陈扬、博士研究生赵泓楷为共同第一作者，浙江大学光电学院刘东教授为通讯作者。



系统装备

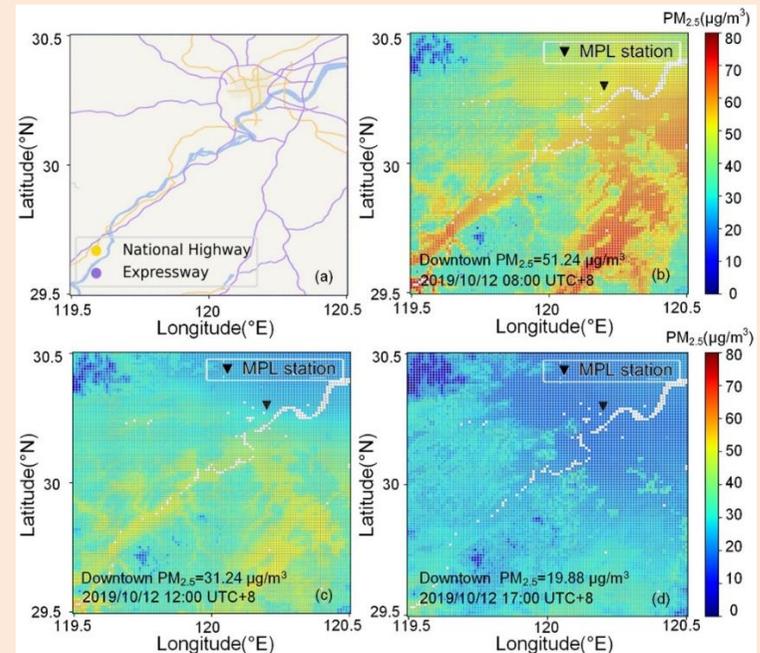
基于激光雷达的日间边界层高度变化及其对 PM_{2.5} 浓度估计影响分析

PM_{2.5}, 即空气动力学直径小于 2.5 μm 的细颗粒物, 是污染雾霾危害中主要的成分之一, 对气候、环境和人类健康有极大的危害, 主要通过监测站点实时监测其浓度, 但覆盖范围较小。目前已经有将星载传感器反演的气溶胶光学厚度 (AOD) 通过经验公式转换为地面 PM_{2.5} 浓度, 边界层高度 (BLH) 是该算法中的关键参数, 但气溶胶并不总局限在边界层内, 在边界层内混合也不总是均匀, 因此简单地将柱 AOD 折算为地表 PM_{2.5} 会有显著的误差, 需要合适的校正方法来提高 PM_{2.5} 浓度估算的准确性。

近日, 刘东教授团队与美国加利福尼亚大学斯克里普斯海洋研究所、美国马里兰大学地球系统科学跨学科中心、中国气象科学研究院、武汉大学、中国科学院安徽光学精密机械研究所、兰州大学、杭州及富阳气象局、光子传感与智能成像嘉兴重点实验室和浙江大学嘉兴研究院智能光学和光子学研究中心等单位, 提出了利用神经网络结合主动和被动仪器数据的 CAPTA 算法, 提高了逐小时 PM_{2.5} 浓度估算的精度和覆盖范围。

被动探测 AOD 由于缺乏垂直分布信息, 导致估算的 PM_{2.5} 浓度存在偏差, 需要假设标定参数混合层高度, 该值仅在气溶胶均匀地混合在边界层内时情况下等于 BLH, 因此传统的 AOD/BLH-PM_{2.5} 算法精确性不足。研究团队提出使用雾霾层高度 (HLH) 代替 BLH 来校正估计偏离值, 其中 HLH 可通过梯度法从 MPL 激光雷达廓线中推导得到。基于主被动结合方法和神经网络模型的 CAPTA 方法, 从 MPL 剖面计算的 HLH 参数代替传统的 BLH 参数进行标准化, 有效适应

非均匀边界层条件, 改进了 PM_{2.5} 逐时估算准确性, 对于在监测偏远地区空气质量与扩大 PM_{2.5} 探测的时空覆盖范围有重要应用价值。



研究成果发表于《Remote Sensing of Environment》期刊上。

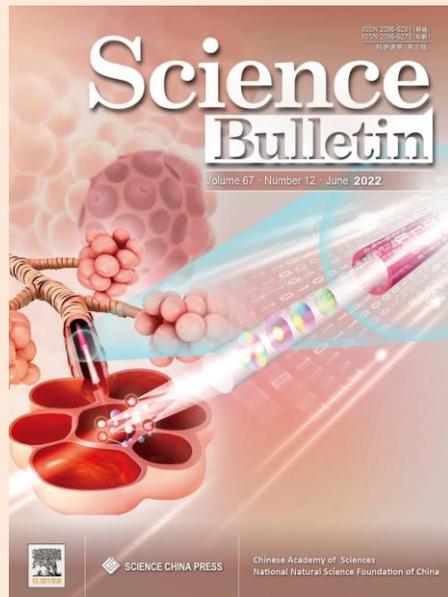
【Sijie Chen, Bowen Tong, Lynn M. Russell *et al.* Lidar-based daytime boundary layer height variation and impact on the regional satellite-based PM_{2.5} estimate, *Remote Sensing of Environment*, DOI: [10.1016/j.rse.2022.113224](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113224) 浙江大学光电学院博士研究生陈斯婕为第一作者, 刘东教授为唯一通讯作者。

成像算法

基于单根多模光纤的高速三维成像

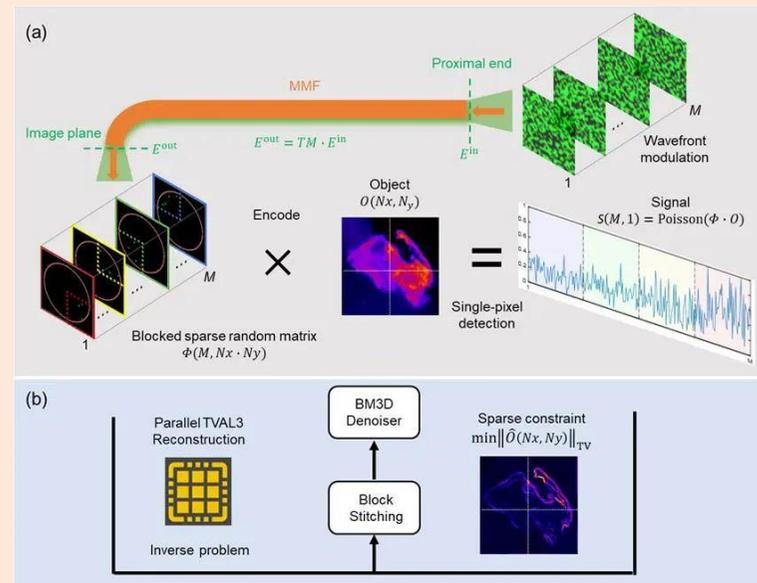
随着细胞生物学、显微成像技术和医学研究的发展，活体组织成像逐渐成为研究的热点。多模光纤内窥镜能在如发丝般纤细的探头上容纳数千个模式，是对生物过程进行低损伤、高分辨率活体观测的理想选择。然而，受限于空间光调制器的刷新速率和奈奎斯特采样定律，传统逐点扫描的成像模式仍然无法满足对三维动态过程进行高速原位观测的需要。

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室、之江实验室类人感知研究中心刘旭教授、杨青教授课题组在 Science Bulletin 发表封面文章，



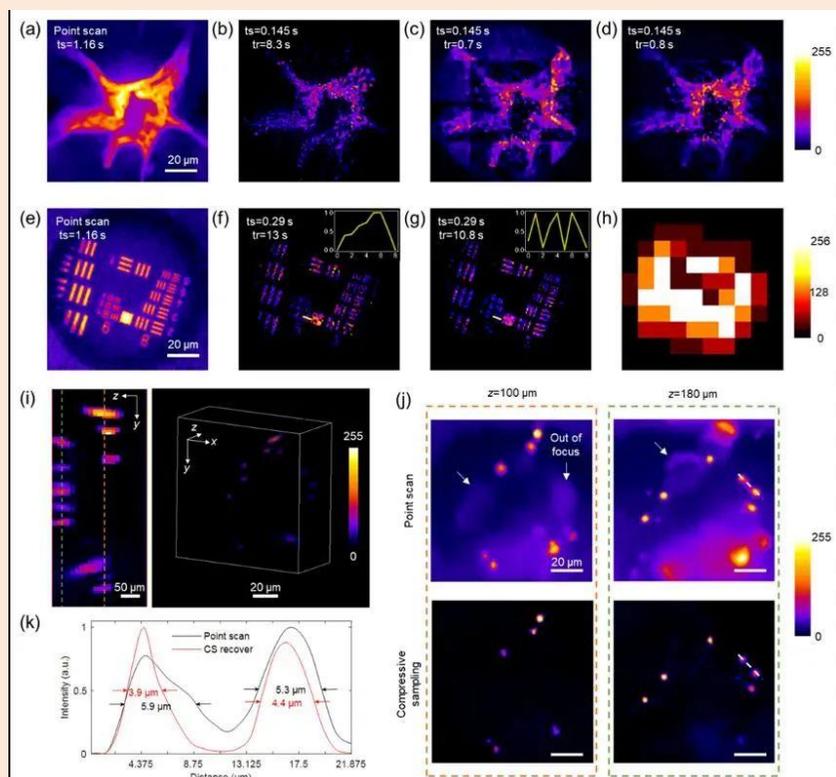
将光场调控技术与压缩感知成像结合，利用单根多模光纤内窥镜首次实现了亚细胞分辨率的高速三维成像。

该文提出了一种在多模光纤中生成具有高正交性的分区域稀疏随机压缩感知采样矩阵的方法，提升 8 倍采样速度的同时对复杂样品进行高对比度成像。分区域采样方法的引入赋予了在各目标区域内对成像参数进行灵活调节的能力，既可以保证图像强度的分布均匀又能提高图像的局部分辨率。结合同步计算，整个重构速度比传统方法提高了 10 倍左右。基于三维稀疏随机采样和体重构算法，该研究实现了对 $(100 \times 100 \times 200) \mu\text{m}^3$ 体空间中非均匀分布的荧光微球的高保真度三维压缩感知成像，可以有效去除离焦面噪声的干扰。



基于分区域稀疏随机采样的多模光纤压缩感知成像原理图和重构流程





高速二维/三维多模光纤压缩感知成像结果

相关成果发表于《Science Bulletin》期刊【ZhenyuDong, ZhongWen, ChenleiPang, LiqiangWang, LanWu, XuLiu, QingYang. A modulated sparse random matrix for high-resolution and high-speed 3D compressive imaging through a multimode fiber, *Science Bulletin* 2022, 67(12): 1224-1228. DOI: [10.1016/j.scib.2022.03.017](https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.03.017)】硕士生董震宇为第一作者,杨青为通讯作者。该研究得到了之江实验室重大科研项目、国家自然科学基金和国家重点研发计划的资助。

该研究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。

