



2022 年第 4 期  
总第 43 期  
2022 年 9 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

## 前言

我国已是制造大国，但在极端制造领域却受制于人，以高端光刻机为代表的极端光学仪器更是为国外所垄断。制约我国高端光刻机发展的技术瓶颈不仅是其核心部件水平，更具挑战的是其整机集成技术。因此，亟待发展面向高端光刻机整机集成的皮米级超高精度检测和跨尺度快速高灵敏缺陷检测等新一代极端光学检测技术。

作为国家科技创新体系和国家战略科技力量的重要组成部分，本实验室决心面向高端集成电路芯片国家战略急需，针对以高端光刻机为代表的极端光学仪器被国外垄断的问题，定位应用基础研究，整合国内外优势研究力量，聚焦高端光刻机系统集成以及光刻过程中的极端光学检测研究，发展高精度检测光源、极端光学调制器、高灵敏探测器等核心器件，攻克皮米精度干涉检测、跨尺度缺陷检测、光刻系统在线检测等技术难题，支撑高端光刻与集成电路产业发展。

本期简报，我们将着重介绍实验室在核心器件、光学成像算法以及光学系统与装备等方面的研究成果，为进一步研发与光刻机相关的检测技术做好准备。

## 本期目录

### 核心器件

- 核心器件：狄大卫、赵保丹| 超长寿命的钙钛矿发光二极管.....2
- 核心器件：郭欣、童利民| 极端光场约束纳米激光器.....2
- 核心器件：杨旸| 利用多光谱叠层闪烁体实现 X 射线多能谱大面阵成像——“让 X 射线成像从黑白到彩色”.....3
- 核心器件：李强| 分层级可见-红外-微波多波段散射隐身技术.....4
- 核心器件：王大伟、王浩华| 基于超导量子电路的五体相互作用合成.....5
- 核心器件：王攀、童利民| 基于金纳米棒-微光纤模式强耦合结构的纳米激光器.....6

### 光学成像算法

- 成像算法：冯华君、徐之海| 计算光学：移动端成像系统的极限像质提升.....7
- 成像算法：许迎科| 机器学习加速单分子荧光定位超分辨成像.....7
- 成像算法：刘旭、匡翠方| 基于平行光毛细管的 X 射线泰伯劳三光栅相衬成像.....8

### 光学系统与装备

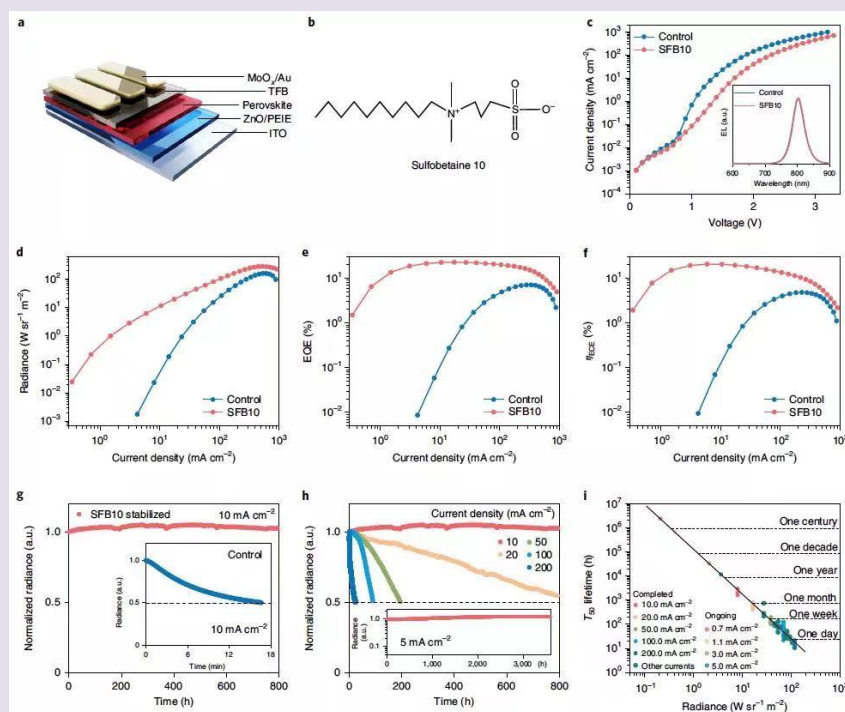
- 系统装备：刘东、刘崇| 星载高光谱分辨率激光雷达 (HSRL) 反演算法与机载实验研究进展.....9
- 系统装备：刘东、刘崇| 多波长高光谱分辨率激光雷达 (HSRL) 反演气溶胶微物理特性新方法.....10

## 核心器件

## 超长寿命的钙钛矿发光二极管

钙钛矿发光二极管(钙钛矿 LED)是在显示、照明、通讯等领域极具潜力的新一代发光技术。然而,此类器件在电场驱动下十分不稳定,是阻碍技术实现实际应用的重大挑战。高性能钙钛矿 LED 的寿命一般在 10-100 小时量级,而 OLED 技术步入产业化所需的寿命至少为 10000 小时。

最近,狄大卫教授、赵保丹研究员团队,在钙钛矿 LED 中实现了满足实际应用需要的超长工作寿命,解决了领域重要难题。他们开发的近红外钙钛矿 LED 在初始辐亮度(或电流密度)为  $3.7 \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$



( $5.0 \text{ mA cm}^{-2}$ )和  $2.1 \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$  ( $3.2 \text{ mA cm}^{-2}$ )下,  $T_{50}$  工作寿命分别为 11539 h (1.3 年)和 32675 h (3.7 年);在更低的辐亮度下,器件预测寿命更长:例如在  $0.21 \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$  ( $0.7 \text{ mA cm}^{-2}$ )下,  $T_{50}$  寿命预期可达  $2.4 \times 10^6 \text{ h}$  (约 270 年)。实现此突破的关键在于双极性分子稳定剂的引入,它与钙钛矿晶界处的阴、阳离子均有相互作用,抑制了电场下的离子迁移,阻止了晶体的相变和降解。这些结果消除了钙钛矿器件可能本征不稳定的担忧,为钙钛矿发光技术的产业化应用铺平了道路。

相关成果于 8 月 8 日发表在《Nature Photonics》期刊【Bingbing Guo *et al.* Ultrastable near-infrared perovskite light-emitting diodes *Nature Photonics* 16, 637–643 (2022). DOI: [10.1038/s41566-022-01046-3](https://doi.org/10.1038/s41566-022-01046-3)】。论文的第一作者是浙江大学光电学院现代光学仪器国家重点实验室的硕士生郭兵兵,通讯作者是狄大卫教授和赵保丹研究员。

## 核心器件

## 极端光场约束纳米激光器

具有更强光场约束能力的激光是研究更小尺度下光与物质相互作用规律、发展极端尺度光学技术的关键。一般而言,受限光学衍射,介质光子腔无法将其腔模尺寸约束到远低于真空半波长 ( $\lambda_0/2$ ) 的尺度,近年来发展起来的表面等离激元纳米激光器,基于自由电子极化共振,可将激光模场约束至  $\lambda_0/30$  的深亚波长尺度。然而,在超越 10nm 量级 ( $<\lambda_0/50$ ) 的场约束尺度上,该类场约束的光频损耗随着约束程度的增加而急剧增加,难以实现有效增益并避免热损坏。另一方面,结构制备所需的纳米级加工精度不易实现。因此,研制具有亚 10nm 约束光场的纳米激光器至今仍是一个巨大的挑战。

近日,郭欣副教授与童利民教授团队,基于两根强耦合半导体纳米线缝波导基模对光场的超强局域与受激放大,实现了具有亚纳米级 ( $\sim\lambda_0/1000$ ) 光场约束的纳米激光器。与现有的纳米激光器相比,

该激光器在光场约束能力及输出效率等方面具有显著优势。由于该激光器的光场约束来源于缝隙波导界面上束缚电子的相干极化，绕过了表面等离子激元光场约束中自由电子极化的“约束-损耗”限制，可将激光器光场约束能力提高至亚纳米级的极端尺度，有望将光与物质相互作用、纳米激光器、光场局域与调控等相关研究推进到新的空间尺度上。

研究成果在线发表于《Physical Review Letters》期刊，并被选为当期封面文章【H. Wu *et al.*, “Photonic nanolaser with extreme optical field confinement,” *Phys. Rev. Lett.* 129, 031902 (2022). DOI: [10.1103/PhysRevLett.129.013902](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.013902)】,浙江大学光电学院博士生吴昊和杨柳为共同第一作者，郭欣副教授和童利民教授为共同通讯作者。



## 核心器件

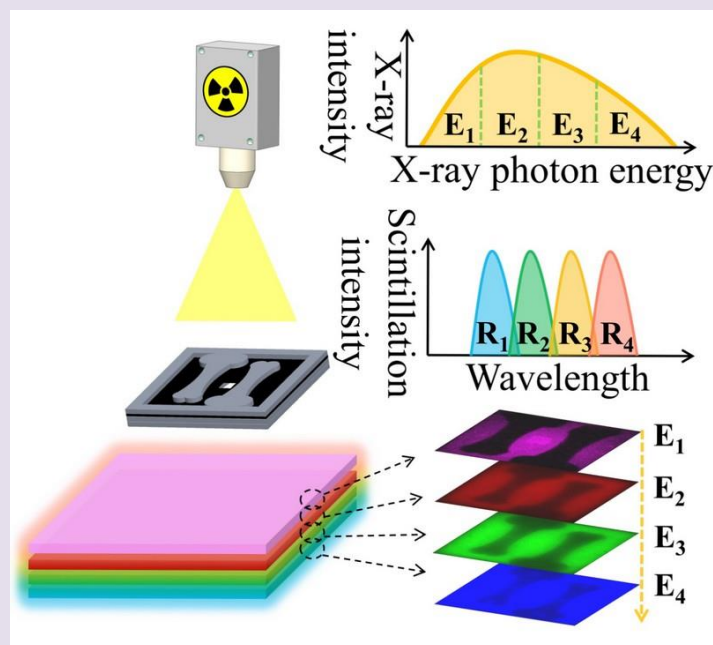
### 利用多光谱叠层闪烁体实现 X 射线多能谱大面阵成像——“让 X 射线成像从黑白到彩色”

X 光的波长范围从皮米(pm)到纳米(nm)横跨三个数量级，但常见的 X 射线成像都是通过能量积分型探测器实现，缺失 X 射线的能量（光谱）信息，因此图像通常是黑白的。能谱探测正在成为 X 射线医疗影像设备中的明确趋势，GPS (GE, Philips, Siemens) 都将在各自的下一代高端 CT 中引入多能谱 X 射线探测器。目前主流的 X 射线能谱探测主要为光子计数探测器 (PCD)，这类探测器主要用于基于高速扫描模式的成像系统中，比如高速螺旋 CT。目前，在更为常见的大面阵平板 X 射线成像 (FPXI) 领域，还鲜有能够在单次 X 射线曝光下实现多能谱、大视场成像的技术。

最近，杨旻教授课题组提出了一种实现多能谱、大视场 X 射线成像的新策略，利用具有不同 X 射线吸收能力和闪烁发光谱的多层闪烁体结构，将 X 射线光子的能谱信息编码成可见光的光谱信息，进而通过彩色或多光谱相机在单次 X 射线曝光下实现多光谱 X 射线成像。与现有的主流多光谱 X 射线探测器（如 PCD）相比，基于叠层闪烁体的方法完全兼容成熟的可见光图像传感器，可以方便地在单次 X 射线曝光中实现多光谱 FPXI。由于它不涉及光子计数，因此完全不受“堆积”效应影响，可以在高通量 X 射线下正常使用。论文展示了双能和四能通道的 X 射线成像原型样机，与传统能量积分型 X 射线成像相比，可以分辨出更多的物质信息。考虑到高光谱相机的普及和基于深度学习的光谱感知算法的快速发展，作者预计基于多层堆叠闪烁体的多光谱甚至高光谱 X 射线成像技术将会在多能 X 射线动态成像、多能锥形束 CT 成像(CBCT)等领域展现出很大应用潜力。

研究成果发表于《Advanced Materials》期刊上。【Ran, P., Yang, L., Jiang, T., Xu, X., Hui, J., Su, Y., Kuang, C., Liu, X. and (Michael) Yang, Y. (2022), Multispectral large-area X-ray Imaging Enabled by Stacked

Metal Halide Scintillators. *Adv.Mater.* DOI: [10.1002/adma.202205458](https://doi.org/10.1002/adma.202205458).  
浙江大学光电学院博士研究生冉鹏为一作，杨旻教授为通讯作者。



## 核心器件

## 分层级可见-红外-微波多波段散射隐身技术

随着多波段探测技术的不断发展，重要设施、车辆、人员的安全正受到越来越严重的挑战，而多波段隐身技术也逐渐成为研究领域的热点。各波段隐身技术（尤其是红外与微波隐身技术）之间的兼容性矛盾以及相互之间的负面影响限制了该技术发展，根据红外散射能力和微波隐身实现方法可以将红外-微波兼容隐身技术分为四类（图 1），目前已报道的工作大多属于第（ii）或第（iii）

种类型，即红外镜面反射-微波散射或红外镜面反射-微波吸收，对于这两种类型，外界热源的存在能够轻易使它们的红外隐身失效，此外，第（iii）种类型由于对微波的吸收产热反而会进一步削弱红外隐身效果。以上技术涉及到电磁波-温度-红外辐射多物理场相互耦合过程，其核心是多种能量相互转化和影响的问题，如何针对这些能量转化过程进行优化以增强多波段隐身效果是该领域的一个挑战。

李强教授课题组提出基于散射原理的多波段隐身技术以减小各波段隐身之间的能量交换，从而提升整体隐身效果（图 1 第（i）种类型）。利用各波段响应的差异性，将可见-红外-微波多波段散射隐身功能进行拆分并由分层级的可见-红外散射表面和微波散射表面两部分独立实现，如图 2 所示。其中可见-红外散射表面通过粗糙的介质-金属薄膜结构同时实现可见颜色调控和可见-红外高散射（8-14 $\mu\text{m}$  长波红外波段低辐射率（0.17）以及低镜面反射率（0.13）），有效兼容了可见伪装以及能够抵抗外界热源负面影响的红外隐身。微波散射表面通过金属相位调控阵列对入射微波进行散射以减小回波信号从而实现微波隐身（-10dB 带宽约为 8-13GHz，完美覆盖了 X 波段微波雷达）。由于波长差异性，可见-红外散射表面在微波波段的特性与光滑金属表面几乎相同，因此通过直接将可见-红外散射表面附着在微波散射表面即可实现分层级可见-红外-微波多波段散射隐身。这项工作提出了一种控制可见-红外-微波多波段散射的方法，从而为现代隐身技术引入了一种新的设计方法。

研究成果在线发表于《Nanophotonics》期刊【Yun Huang, *et al.* Hierarchical visible-infrared-microwave scattering surfaces for multispectral camouflage. *Nanophotonics* DOI: [10.1515/nanoph-2022-0254](https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0254)】。

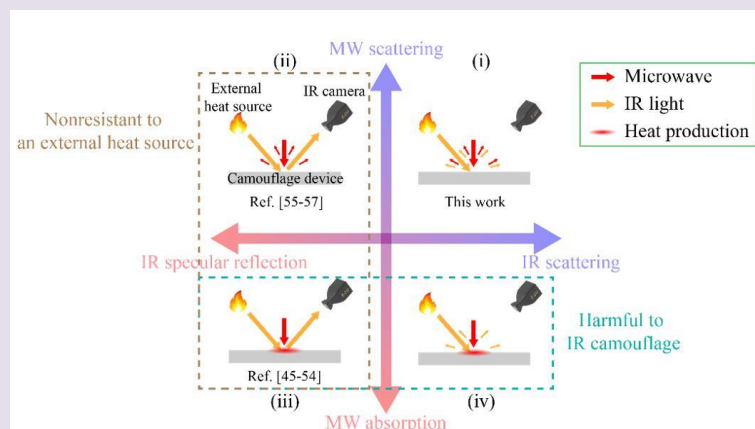


图1 红外-微波兼容隐身技术分类

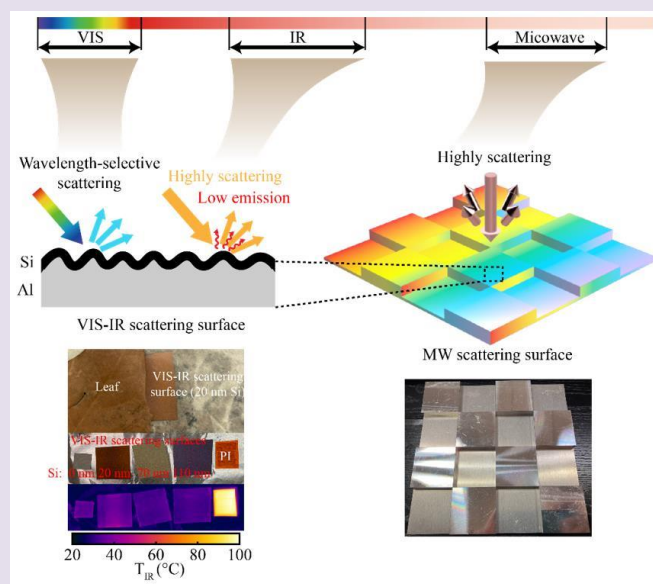


图2 分层级可见-红外-微波多波段散射隐身技术原理示意图

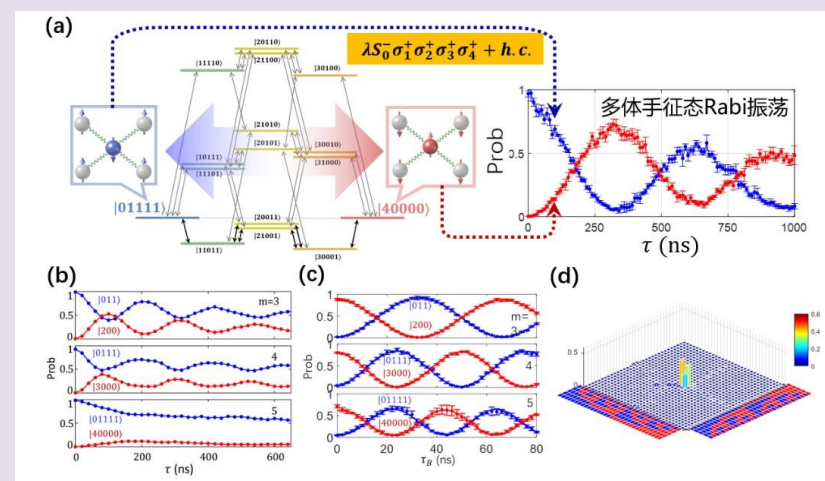
## 核心器件

## 基于超导量子电路的五体相互作用合成

多体相互作用哈密顿量的合成在量子模拟和量子计算中扮演着重要作用。例如，在量子化学、拓扑物质、量子自旋液体等物态研究中，往往需要用到多体相互作用。在超导量子电路系统中，量子比特间相互作用的形式一般被局限在两体，即哈密顿量中的相互作用项仅包含最多两个自旋算符。工程化地实现多体相互作用有助于扩展超导电路平台在前沿量子物理问题上的研究范畴。

最近，浙大宋超、王浩华课题组与王大伟课题组联合德州农工大学 Girish Agarwal 和 Marlan Scully 教授，提出并实现了基于超导量子电路的多体相互作用合成方案。利用高精度的量子调控技术，团队首

5



五体相互作用的合成和应用。(a) 五体相互作用的合成机理和实验观测结果。(b) 多体相互作用模拟手性分子在噪声下的动力学演化实验结果。(c) 利用多体相互作用实现 Mach-Zehnder 干涉仪的实验结果。(d) 利用五体相互作用制备的 Greenberger-Horne-Zeilinger 态密度矩阵。

次在超导芯片上合成了五体相互作用，打破了单项哈密顿量所包含比特个数的世界记录。基于该相互作用，团队实现了一步合成多比特全局纠缠态的方案，并对手性分子的起源展开了探究，模拟了手性分子在退相干噪声影响下动力学演化过程。此外，研究团队在该多体相互作用哈密顿量的应用方面开展了研究，测试了该体系在构建具有海森堡极限的 Mach-Zehnder 干涉仪方面的表现。

研究成果在线发表于《Physical Review Letters》期刊上【K. Zhang *et al.*, Synthesizing five-body interaction in a superconducting quantum circuit, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 190502 (2022). DOI: [10.1103/PhysRevLett.128.190502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.190502)】。浙江大学宋超研究员、王大伟研究员以及德州农工大学的美国科学院院士 Marlan Scully 教授为共同通讯作者，其他重要作者还包括浙大王震研究员、朱诗尧院士等。

## 核心器件

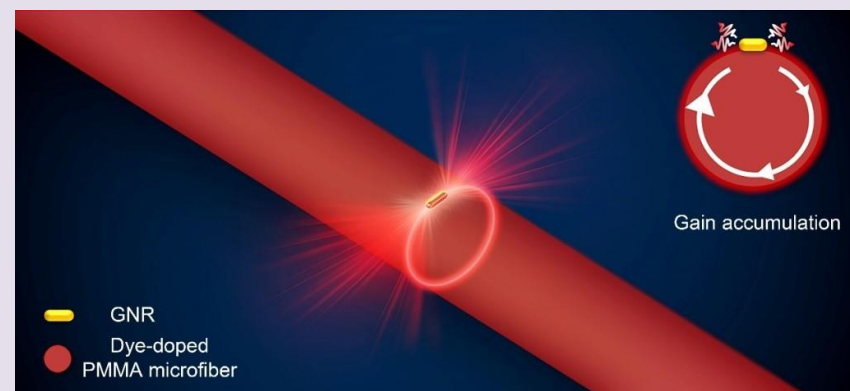
### 基于金纳米棒-微光纤模式强耦合结构的纳米激光器

随着超分辨光学成像、生化传感、片上光互连等领域的快速发展，人们对具有突破衍射极限能力的相干光源的需求不断增加。表面等离子体纳米激光器利用金属纳米结构中支持的表面等离子体模式来实现光场的约束和反馈，其激光腔模特征尺寸可以远超衍射极限且调制速度可达太赫兹量级，是一种新兴的纳米尺度相干光源。通过将增益材料置于低维等离子体结构（如金属薄膜、纳米线和纳米颗粒等）的光学近场区域，人们已经实现了多种形式的等离子体纳米激光器。其中，尤其吸引人的是具有极端光场约束能力的基于单个金属纳米颗粒的激光器。然而，迄今为止，几乎所有基于金属纳米颗粒的激光信号都是在纳米颗粒集群或阵列结构中观察到的，基于单个金属纳米颗粒的激光仍未有令人信服的直接证据。其实现难点在于伴随局域表面等离子体共振 (LSPR) 超强光场约束能力而产生的高欧姆损耗，置于金

属纳米颗粒近场区域增益材料难以有效补偿损耗。同时，高激发功率密度容易引起结构的损坏。

近日，王攀、童利民教授研究团队，基于前期利用金属纳米颗粒 LSPR 模式与氧化硅微光纤回音壁腔模间强耦合实现对纳米颗粒 LSPR 模式线宽压缩调控（低至 2 nm）的研究工作【*Nano Lett.* **15**, 7581 (2015)】，进一步提出将单个金纳米棒和染料掺杂聚合物微光纤强耦合形成等离激元纳米激光器新结构。得益于模式强耦合而显著增强的光子-等离激元复合模式光学相干性和微光纤回音壁腔中累积的有效增益，在室温下实现了基于单个金纳米棒的单模激光输出，其激射阈值低至 2.71 MW/cm<sup>2</sup>，线宽小于 2 nm。该研究为实现基于单个金属纳米颗粒的具有极端光场约束能力的激光器提供了一种新的可行方案，有望在高灵敏光学传感等领域得到应用。

研究成果发表于《Science Advances》期刊【Ning Zhou *et al.* Strong mode coupling-enabled hybrid photon-plasmon laser with a microfiber-coupled nanorod, *Sci. Adv.* **8**, eabn2026 (2022) DOI: [10.1126/sciadv.abn2026](https://doi.org/10.1126/sciadv.abn2026)】。浙江大学光电科学与工程学院博士后周宁、博士生杨宇鑫和副教授郭欣为论文共同第一作者，王攀研究员和童利民教授为共同通讯作者。



## 成像算法

## 计算光学：移动端成像系统的极限像质提升

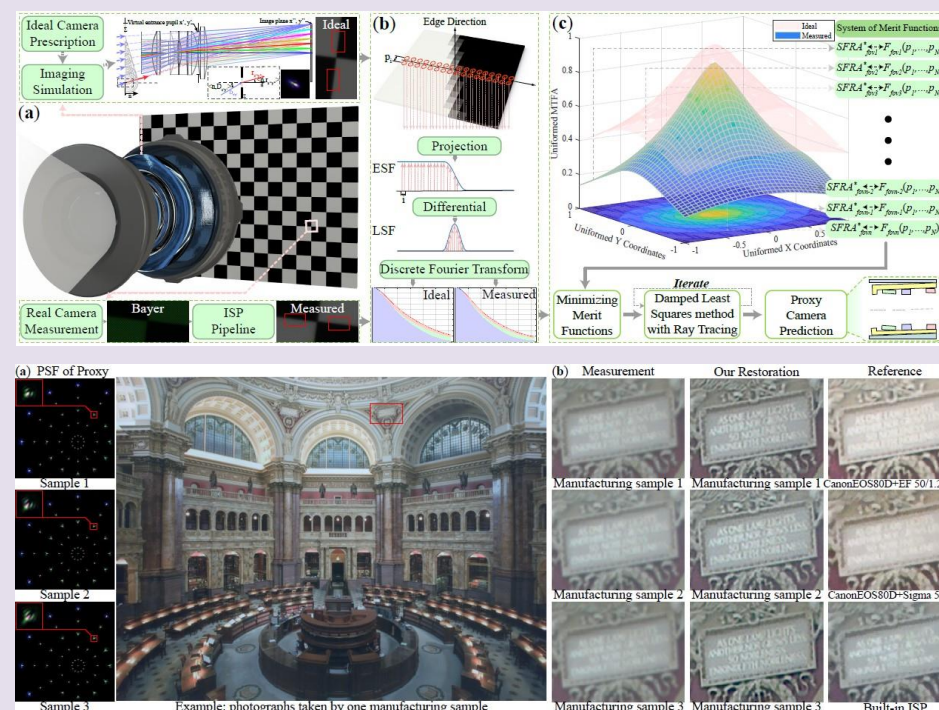
在移动端成像不断发展的今天，手机摄影已经代替专业相机成为了人们获取图像的主要手段。但由于物理空间和规模制造工艺的限制，手机成像系统无法完全避免光学像差和加工偏差带来的退化。冯华君教授、徐之海教授团队教师和博士生陈世錡等根据成像全链路过程，设计了整套的光学成像仿真模型来进行准确模拟和训练数据的构建。该工作表明，基于深度学习的计算光学方法可嵌入于图像后处理链路中，以矫正成像系统的光学像差，实现接近衍射极限的成像质量。

为解决批量生产时的随机加工偏差问题，团队在光学成像仿真的基础上，提出了镜头的微扰模型及其光线追迹方法，并利用实测的空间频率响应调整光学系统的微扰参数，构建成像仿真结果和实拍接近的虚拟代理相机。优化得到的微扰参数被用于建模批量生产中引入的公差和图像复原模型的训练，可直接适配于同批次的真实加工样本，完满解决光学设计像差及加工误差带来的像质退化难题。

该工作首次在大规模制造的移动成像系统中全部实现了接近衍射极限的像质提升，成果在国内顶级公司 2021 年的旗舰手机中落地应用，被公司认可称为“业界顶级”和产品的“重要卖点”，并在此后的主流手机中普遍应用，生动诠释了把论文写在祖国大地上的时代精神与风貌。

研究成果在线发表于《IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence》期刊，【Shiqi Chen, Ting Lin, Huajun Feng, Zhihai Xu, Qi Li and Yueting Chen, Computational Optics for Mobile Terminals in Mass Production, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, DOI: [10.1109/TPAMI.2022.3200725](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2022.3200725).】和《ACM

Transactions on Graphics》期刊，【Shiqi Chen, Huajun Feng, Dexin Pan, Zhihai Xu, Qi Li and Yueting Chen, Optical aberrations correction in postprocessing using imaging simulation, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 40, no. 5, sep 2021. DOI: [10.1145/3474088](https://doi.org/10.1145/3474088)】



## 成像算法

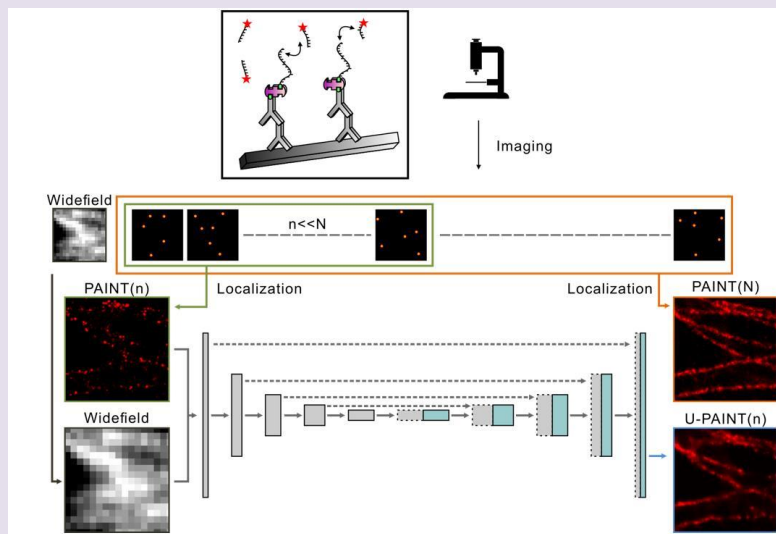
## 机器学习加速单分子荧光定位超分辨成像

DNA 纳米尺度点积累成像（DNA-PAINT，DNA Point Accumulation In Nanoscale Topography）是近年来得到大量应用的单分子荧光定位超分辨成像手段（SMLM，Single Molecule Localization



Microscopy)。经过长时间的采集足够多的荧光单分子信号，经定位叠加后可重构超分辨图像，其定位精度能达到几个纳米的尺度。DNA-PAINT是目前分辨率最高的荧光显微成像技术之一，但是因为成像以及数据处理时间需要数小时，只能用于固定细胞结构的成像。

最近，许迎科教授课题组提出一种U-Net机器学习网络加速DNA-PAINT成像的新方法，取名U-PAINT。在亚细胞结构微管的成像上，U-PAINT能够将DNA-PAINT重建对原始数据的需求下降九成以上，从而将成像以及重建的时间控制在10分钟内。U-PAINT使用预先学习到的微管形态特征，利用在2~5分钟内获取的少量DNA-PAINT数据重建结果和宽场图像作为输入，可还原出完整的超分辨的微管结构，分辨率能提升至40纳米以内。该研究具有被迁移到微管之外的亚细胞结构的潜力，从而实现多种结构的DNA-PAINT超分辨成像的加速。



相关成果发表于《Frontiers in Chemistry》期刊【Min Zhu#, Luhao Zhang#, Luhong Jin, Jincheng Chen, Yongdeng Zhang, Yingke Xu\*.

DNA-PAINT Imaging Accelerated by Machine Learning. *Frontiers in Chemistry*. 10, 2022.】(博士生朱敏和博士后张露灏为共同第一作者)。以上工作获得了国家重点研发计划、国家自然科学基金、中央高校基本科研业务费专项资金、浙江省自然科学基金、浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划以及阿里云的支持。

## 成像算法

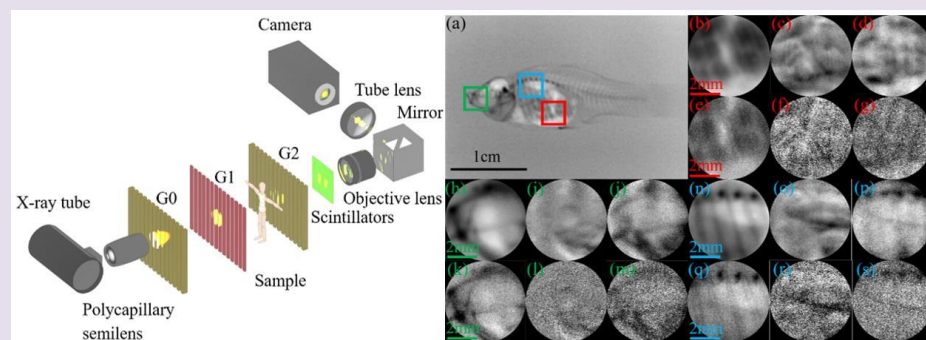
## 基于平行光毛细管的X射线泰伯劳三光栅相衬成像

X射线相衬成像(XPCI)是近几年来发展起来的一种新兴的X射线成像技术。迄今为止，XPCI的发展受到了许多研究人员的关注，同时XPCI在生物医学成像、工业检测等领域也具有广泛的应用意义。现有的许多工作表明，基于光栅的X射线泰伯劳三光栅干涉仪是一种非常具有应用前景的XPCI方法，物体的吸收，微分相位和暗场三种多模态的信息能够通过这种方法被同时恢复。这种三光栅干涉仪还能够降低XPCI对光源相干性的依赖，进而为XPCI能够摆脱同步辐射光源走出实验室提供了可能性。为获得高质量的三种多模态信息，X射线泰伯劳三光栅相衬成像的方法通常需要通过光栅步进的方式来实现，同时为确保恢复图像质量具有高衬噪比(CNR)，传统X射线泰伯劳三光栅干涉仪的成像时间相对较长。除此之外，由于普通X射线的光管具有较大的发散角，要将XPCI向临床推广，需要避免非感兴趣区域的辐射问题进而控制成像的辐射剂量。因此，针对X射线泰伯劳三光栅干涉仪的优化应围绕降低成像时间，提高图像CNR以及降低成像剂量。

最近，刘旭教授和匡翠方教授课题组通过理论分析和仿真验证，提出了基于平行光毛细管的X射线泰伯劳三光栅相衬成像系统。经过实验参数优化以及实验成像论证，平行光毛细管的应用有助于提高成像区域内的X射线密度，进而减少了将X射线泰伯劳三光栅干涉

仪的成像速度提高约4倍。通过在相同成像时间内对比平行光毛细管的系统和传统的成像系统的成像质量,基于平行光毛细管的系统能够极大地提高图像的信噪比。此外,由于平行光毛细管能够将X射线约束在一定的成像区域内,其能够极大地减少非感兴趣区域内的非必要辐射。本文的研究结果能够为XPCI向临床医学转化提供较大的帮助。

研究成果在线发表于《IEEE Photonics Technology Letters》期刊上。【Siwei Tao, Zonghan Tian, Ling Bai, Yueshu Xu, Xiang Hao, Cuifang Kuang\*, Yang (Michael) Yang, Xu Liu\*. Grating-based X-ray phase contrast imaging with a polycapillary semilens, *IEEE Photonics Technology Letters*. (2022). DOI: [10.1109/LPT.2022.3203012](https://doi.org/10.1109/LPT.2022.3203012).】浙江大学光电学院博士研究生陶思玮为一作,匡翠方和刘旭教授为共同通讯。



## 系统装备

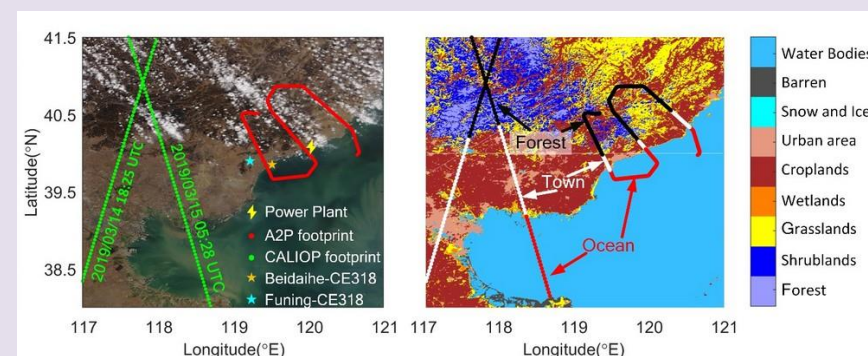
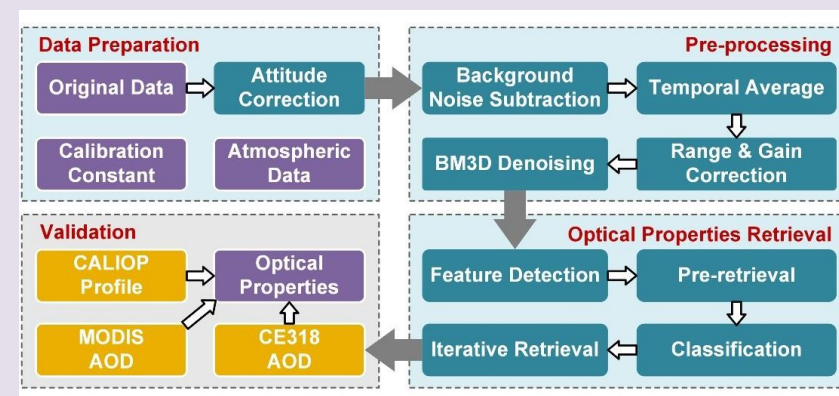
## 星载高光谱分辨率激光雷达(HSRL)反演算法与机载实验研究进展

星载云-气溶胶高光谱分辨率激光雷达(ACHSRL)是我国大气环境监测卫星的重要载荷之一。ACHSRL于2022年4月16日成功发射,位于705 km的太阳同步轨道,数据反演难度大。

刘东教授及刘崇教授团队与中科院上海光机所陈卫标研究员团队合作,并联合航天八院、国家气象卫星中心、中科院空天信息研究

院、南京信息工程大学等单位,针对ACHSRL云-气溶胶光学参数反演提出了一套数据反演算法。该算法涵盖了数据校准、层次识别、云-气溶胶分类以及消光系数反演等流程,并通过ACHSRL的机载样机实验验证了其准确性和鲁棒性。

研究成果发表于《PhotoniX》期刊上。【J. Ke, Y. Sun, C. Dong, *et al.* Development of China's first space-borne aerosol-cloud high-spectral-resolution lidar: retrieval algorithm and airborne demonstration, *PhotoniX*, 3:17 (2022). DOI: [10.1186/s43074-022-00063-3](https://doi.org/10.1186/s43074-022-00063-3)】刘东教授和中科院上海光机所陈卫标研究员为共同通讯作者。



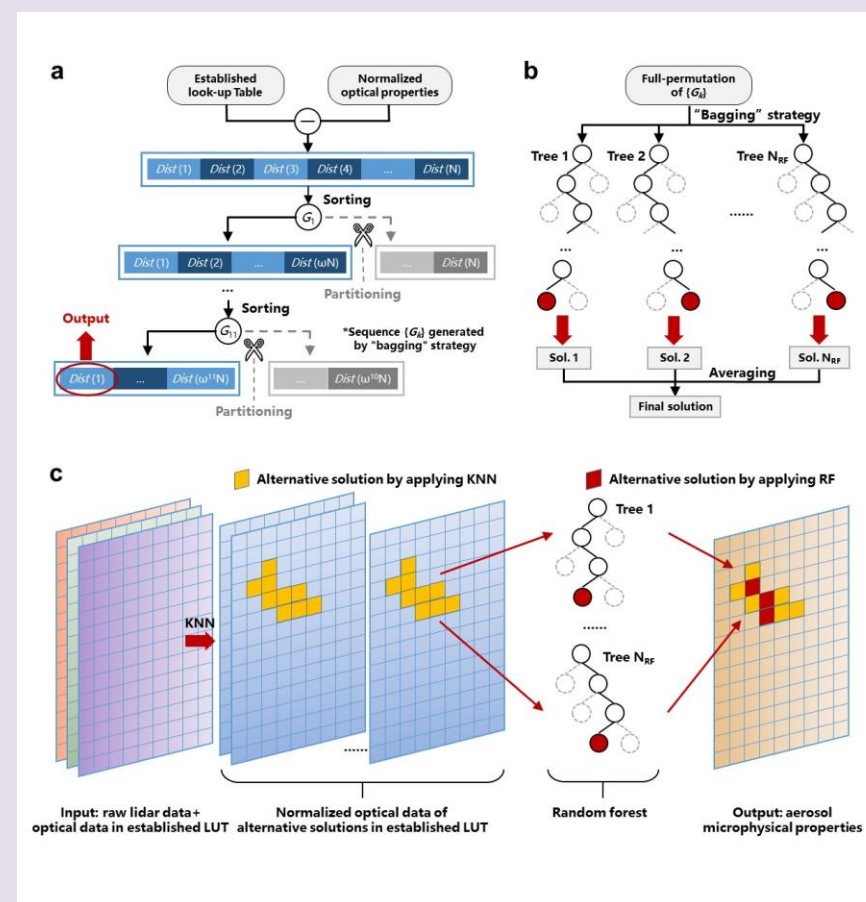
## 系统装备

多波长高光谱分辨率激光雷达 (HSRL)  
反演气溶胶微物理特性新方法

大气气溶胶在气候变化和人类健康中发挥着至关重要的作用。多波长高光谱分辨率激光雷达(HSRL)可高精度获得气溶胶光学及微物理特性,更好地量化人口稠密地区细模态气溶胶的影响。当前多波长HSRL反演算法往往需要三个后向散射系数和两个消光系数 ( $3\beta+2\alpha$ ) 配置激光雷达输入信息才能获得较好结果,但迄今为止可实现  $3\beta+2\alpha$  观测的HSRL系统寥寥无几,亟需开发适用于更少输入通道且更高精度的气溶胶微物理特性反演算法。

最近,刘东教授及刘崇教授团队提出了一种无监督机器学习方法——多元全排列随机森林(FAST)方法以优化细模态气溶胶微物理特性的反演。该方法结合K近邻算法和改进的无监督随机森林算法,能够实现气溶胶微物理特性的高精度和高时间效率反演,并为降低多波长HSRL微物理特性反演输入通道数量要求(如“ $3\beta+1\alpha$ ”及“ $2\beta+1\alpha$ ”配置)提供了新的可能。该算法被成功地应用于机载多波长HSRL数据反演,结果较传统算法表现更优,且与机载原位测量结果高度一致。

该研究成果发表于《Remote Sensing of Environment》期刊上。【Wang N *et al.*, This is FAST: multivariate Full-permutation based Stochastic forest method—improving the retrieval of fine-mode aerosol microphysical properties with multi-wavelength lidar, *Remote Sensing of Environment*, 2022. DOI: [10.1016/j.rse.2022.113226](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113226)】刘东教授和上海光学精密机械研究所陈卫标研究员为共同通讯作者。



基于FAST方法的气溶胶微物理特性反演示意图