



2022 年第 1 期
总第 40 期
2022 年 3 月 8 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

- 新闻快递：大气高光谱分辨率激光雷达助力北京冬奥会打赢“蓝天保卫战”1
- 科研进展：**刘东**| 双视场高光谱分辨率激光雷达研究云及气溶胶相互作用.....2
- 科研进展：**杨旻**| 利用热活化延迟荧光机制实现高效 X 射线探测与成像..2
- 科研进展：**刘峰**| 双脉冲激发方法产生偏振受控的全同单光子.....3
- 科研进展：**刘旭、匡翠方**| 突破衍射极限的边缘抑制效应直写光刻：从光学到材料化学.....4
- 科研进展：**刘旭、匡翠方**| 点击化学辅助有机-无机杂化快速、高精度激光直写光刻胶.....5
- 科研进展：**李鹰**| 时间调制系统中热扩散的互易性.....5
- 科研进展：**方伟**| 单个铌酸锂波导上实现偏振无关单光子上转换.....6
- 科研进展：**王攀、童利民**| 基于超平整单晶基底的低损耗等离激元纳腔...7

- 科研进展：**戴道铨**| 超低损耗硅光波导延迟线.....7
- 科研进展：**戴道铨**| 超小型薄膜铌酸锂电光调制器.....8
- 科研进展：**马云贵**| 超表面助力半固态 Lidar 扫描系统重焕生机.....9

新闻快递

大气高光谱分辨率激光雷达助力北京冬奥会打赢“蓝天保卫战”

北京 2022 年冬季奥运会的顺利筹办，与冰雪运动息息相关的气象力量，是其中不可或缺的重要一环。近期，**刘东**教授与**刘崇**教授团队携自主研发的大气高光谱分辨率激光雷达(HSRL)系统样机，受邀参与了北京冬奥会气象保障工作，助力冬奥会打赢“蓝天保卫战”。

为更好地服务北京冬奥会气象保障工作，该团队提前一年在北京地区开展了外场试验，与北京大学、北京师范大学、国家气象局、中科院大气物理所、北京市延庆气象局等多家高校及科研单位开展合作，对气象保障工作进行了预演和准备。在此次气象保障工作中，该团队顺利完成了气象保障工作，包括：北京地区气象特点表征，北京冬季雾霾频发天气成因研究，西北地区春季沙尘暴传输情况监测，厘清气溶胶-云-降水相互作用关系等多项工作任务。



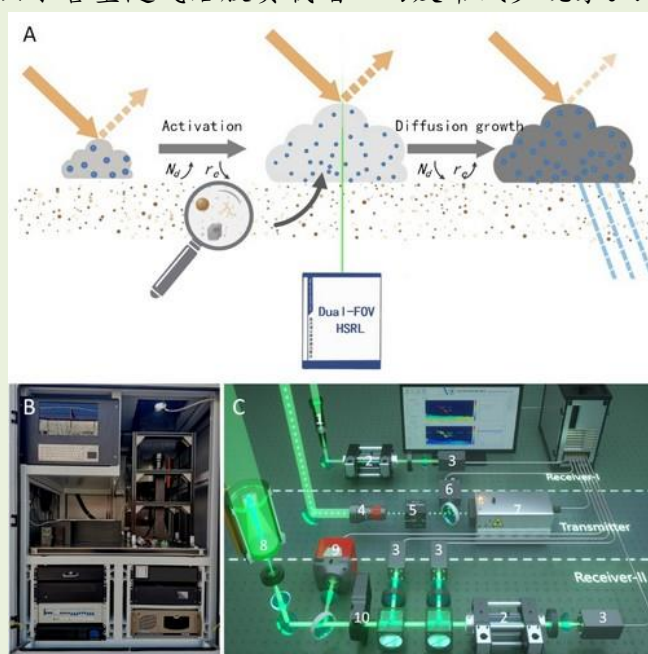
大气高光谱分辨率激光雷达系统样机外观示意图

科研进展

双视场高光谱分辨率激光雷达研究云及气溶胶相互作用

大气云与气溶胶之间的相互作用是大气环境研究的重要科学问题，也是全球尺度气候预测模型中的最大不确定性来源之一。人类对云与气溶胶相互作用的模型机理、影响因素及演化规律等方面的认知依旧匮乏，亟需高质量、高分辨率、高时空覆盖率的相关观测资料作进一步研究。

最近，刘东教授及刘崇教授团队攻克了双视场高光谱分辨率激光雷达（HSRL）的多项技术难点。双视场 HSRL 克服了传统遥感方法需要先验假设的缺点，即可对水云微物理特性及气溶胶光学特性的垂直结构进行测量。并首次基于地基遥感仪器观测到了低空水云的云顶夹卷，及云水含量随气溶胶负载增加的反常减少现象。此外，该自主



研发 HSRL 系统样机参与了我国首颗大气环境监测卫星(DQ-1)的机载样机校飞试验，为星载样机的性能验证提供了精确的比对数据。

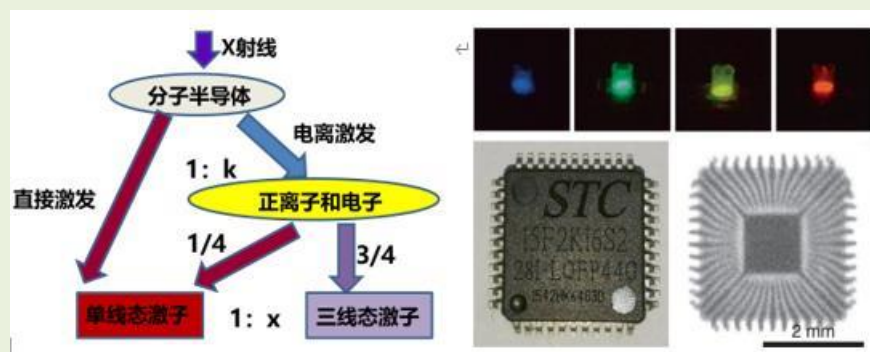
该成果发表于国际顶级综合期刊《美国科学院院报》(Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, PNAS)期刊上。【Wang et al., Dual-field-of-view high-spectral-resolution lidar: simultaneous profiling of aerosol and water cloud to study aerosol-cloud interaction, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2022 DOI: [10.1073/pnas.2110756119](https://doi.org/10.1073/pnas.2110756119)】，刘东教授为唯一通讯作者。

科研进展

利用热活化延迟荧光机制实现高效X射线探测与成像

可见光与物质相互作用的光物理机制已经比较完整，但X光激发物质时的光物理机制仍有很多空白，深入的机理研究对设计更好的探测器件至关重要。X射线激发的光物理过程和常规的紫外可见光激发可能有着巨大差异。根据偶极子选择律(dipole selection rule)，可见光只会直接激发单线态激子，一般不会产生暗激子，这也是众多荧光分子光致荧光效率接近100%的原因。但是X射线光子能量很高，电离物质后可以产生具有极高动能的电子，这时激子的产生过程其实更加接近发光二极管中的电激发，可能会产生暗态三线态。杨旻教授课题组最新发表的研究首次基于瞬态吸收光谱定量计算了X射线激发下产生自旋单线态(亮态)和三线态(暗态)的统计规律，发现X射线光子激发下的三线态激子和单线态激子比例大于2小于3，略低于电激发(三线态是单线态的3倍)的过程，但和常规的可见光激发截然不同(无三线态)。基于这样的物理图景，我们首次提出利用热活化延迟荧光机制来高效、高速地利用X射线激发的三线态暗激子，并实现了高效、高时间分辨的X射线探测。该工作也大大拓展了

传统有机光电器件的应用领域,利用低原子序数的有机材料实现了有效的 X 射线探测。论文在 Nature Materials 在线发表后被 Nature photonics 编辑选中以 News & Views 形式做亮点报道; Matter (Cell Press) 杂志也邀请行业专家撰写专题评述论文专门介绍该工作。



研究成果在线发表于 Nature Materials 期刊上。【Ma, W., Su, Y., Zhang, Q. *et al.*, Thermally activated delayed fluorescence (TADF) organic molecules for efficient X-ray scintillation and imaging, *Nature Materials* 21, 210–216 (2022) DOI: [10.1038/s41563-021-01132-x](https://doi.org/10.1038/s41563-021-01132-x)】浙江大学现代光学仪器国家重点实验室是论文第一单位,浙江大学嘉兴研究院智能光电研究中心是论文的第二单位。浙大光电学院科研助理马文博和博士生苏一榕为共同第一作者,杨旻教授为通讯作者。论文得到刘旭老师、刘华锋老师、张其胜老师、朱海明老师等的支持和指导。

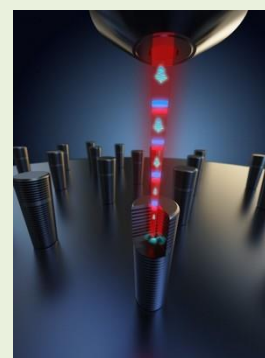
科研进展

双脉冲激发方法产生偏振受控的全同单光子

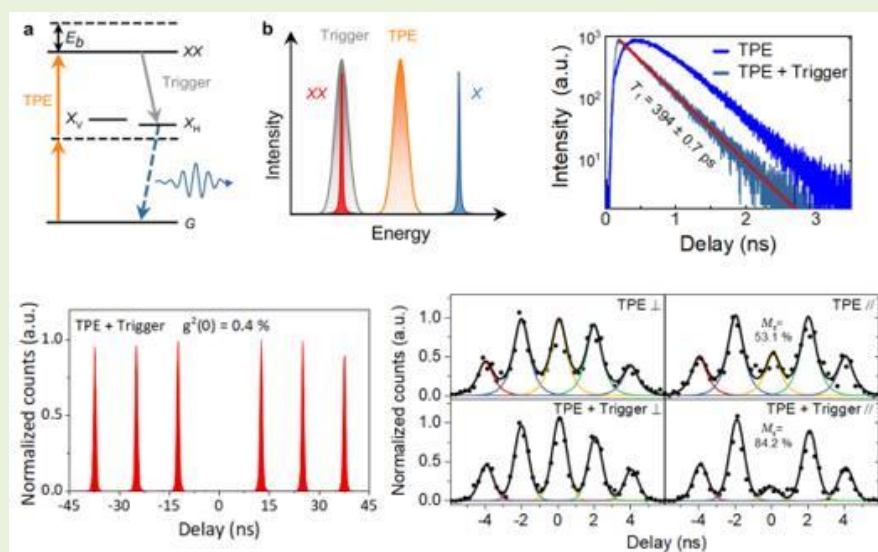
单光子源在线性光学量子计算和固态量子网络中具有关键的作用。

迄今为止,半导体自组装量子点作为一种高稳定性、易于集成于高品质因子微腔的“人造原子”,在脉冲共振激发下已经被证实可以用于产生高纯度的全同单光子。然而,传统的脉冲共振荧光技术为了将单光子信号从激发脉冲中提取出来,通常需要采用偏振滤波的方式,但由于缺乏对产生单光子偏振态的主动控制技术,这种滤波方式会导致单光子源器件的产率损失至少 50%,这种产率的瓶颈直接阻碍了单光子源的大规模扩展。

最近,刘峰研究员课题组演示了一种易于滤除激发光且能产生偏振受控单光子序列的双脉冲激发方案,证明了该方案不仅不会牺牲单光子的纯度和全同性,而且可以突破 50% 的产率限制。该方案先用双光子共振激发将量子点确定性地制备到包含有两对电子空穴对的双激子态,随后紧跟着一束触发脉冲将量子点相干地引导到只含有一对电子空穴对的单激子态上,最后通过单激子态自发辐射产生高性能的单光子,单光子的偏振态可以通过触发脉冲实时控制。该工作朝着高效率的高性能单光子源迈出了重要的一步。



研究成果在线发表于《Nano Letters》(IF=11.189)期刊上。【Junyong Yan, Shunfa Liu, Xing Lin, Ying Yu*, Feng Liu*, *et al.* Double-Pulse Generation of Indistinguishable Single Photons with Optically Controlled Polarization, *Nano Lett.* (2022). DOI: [10.1021/acs.nanolett.1c03543](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c03543).】浙江大学信电学院博士研究生鄢军勇为第一作者,刘峰研究员和中山大学瑜颖研究员为共同通讯作者。



科研进展

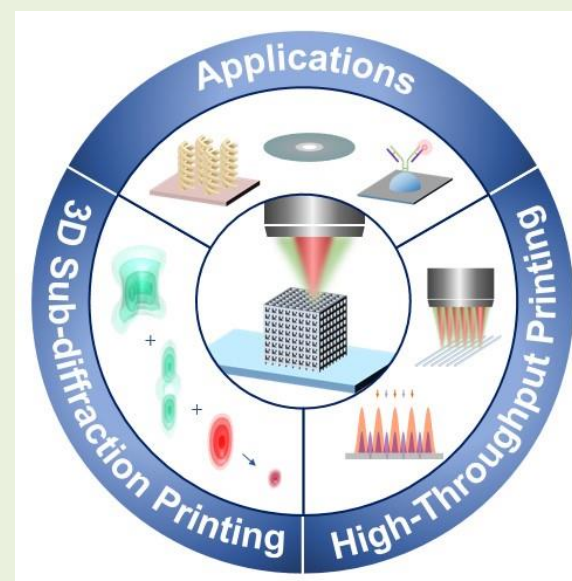
突破衍射极限的边缘抑制效应直写光刻： 从光学到材料化学

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。

刘旭教授、匡翠方教授课题组撰写了题为“3D Sub-Diffraction Printing by Multicolor Photoinhibition Lithography: From Optics to Chemistry”的综述论文。文章总结梳理了利用边缘抑制效应的直写光

刻技术在超材料、数据存储和生物技术领域的应用，还从光学系统到材料化学的角度论述了边缘抑制效应直写光刻目前实现更高分辨率和更快刻写速度的主要挑战和最新进展。研究者相信，边缘抑制效应直写光刻技术在亚衍射、高通量刻写方向有着巨大的研究潜力。

研究成果在线发表于《Laser & Photonics Reviews》(IF=13.138) 期刊上。【Minfei He, Zhimin Zhang, Chun Cao, Guozun Zhou, Cuifang Kuang*, and Xu Liu*. 3D Sub-Diffraction Printing by Multicolor Photoinhibition Lithography: From Optics to Chemistry. *Laser & Photonics Reviews*, 2021: 2100229. DOI: [10.1002/lpor.202100229](https://doi.org/10.1002/lpor.202100229)】浙江大学光电学院博士研究生何敏菲为第一作者，匡翠方教授和刘旭教授为共同通讯作者。



边缘抑制效应直写光刻的应用，以及实现超分辨刻写和高通量刻写的主要原理和方法

科研进展

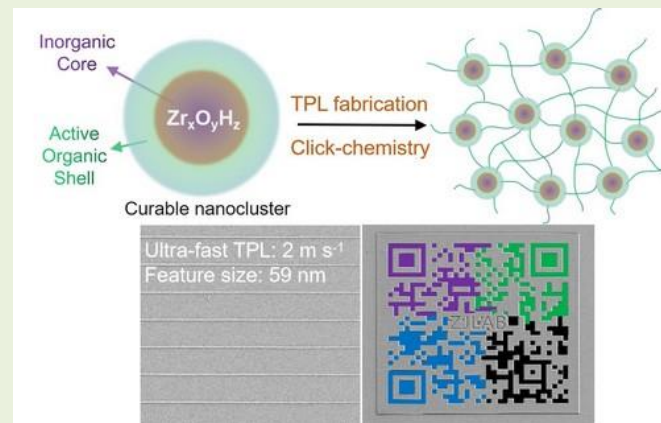
点击化学辅助有机-无机杂化快速、高精度激光直写光刻胶

飞秒激光直写技术是一种新兴的微纳制造技术，其利用光刻胶对飞秒激光的非线性双光子吸收效应，可实现亚百纳米的激光直写。相比传统UV光刻技术，飞秒激光直写技术具有无需使用昂贵掩模版、可直接实现3D纳米加工、价格便宜等诸多优势。不过，由于激光系统能量、控制及软件系统的响应速度及光刻胶材料的灵敏度等因素的限制，目前飞秒激光直写技术的光刻速度较慢，难以实现大面积、规模化生产。其中，光刻胶的灵敏度是关键性短板之一。因此，开发高灵敏度光刻胶对推进高精度快速飞秒激光直写技术的发展至关重要。

最近，刘旭教授、匡翠方教授课题组通过与之江实验室合作，提出了巯基烯光点击化学辅助的有机-无机杂化固态飞秒激光直写光刻胶的设想。首先设计了一种固态、活性可聚合的金属氧化物纳米团簇，并与液态活性单体复合，通过涂膜、烘胶工艺获得类似UV光刻胶的固态薄膜。经实验及理论模拟，活性可聚合金属氧化物纳米团簇不仅可以提高光刻胶对飞秒激光的吸收能力，还可以提高激发态-三重态系间穿越及光引发量子产率，最终促进光敏性。同时，金属氧化物纳米团簇使固态光刻胶的力学强度得以提升，制备的微纳线条具有更高的规整度和精度。为了进一步提高光刻胶灵敏度，抑制固态薄膜中氧阻聚，该工作进一步引入的巯基烯光点击化学的概念，最终将飞秒激光直写的速度提升至2.0m/s，光刻精度可达59nm，并顺利的开展了2D微纳结构的高速制造。该工作为推进飞秒激光直写技术向产业化应用打下了坚实的基础。

研究成果在线发表于《Additive Manufacturing》(IF=10.998) 期刊上。【Chun Cao*, Jianting Liu, Xianmeng Xia, Xiaoming Shen, Yiwei Qiu, Cuifang Kuang*, Xu Liu. Click chemistry assisted organic-inorganic

hybrid photoresist for ultra-fast two-photon lithography, *Addit. Manuf.* 51 (2022) 102658. DOI: [10.1016/j.addma.2022.102658](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102658)】浙江大学匡翠方教授为共同通讯作者。



科研进展

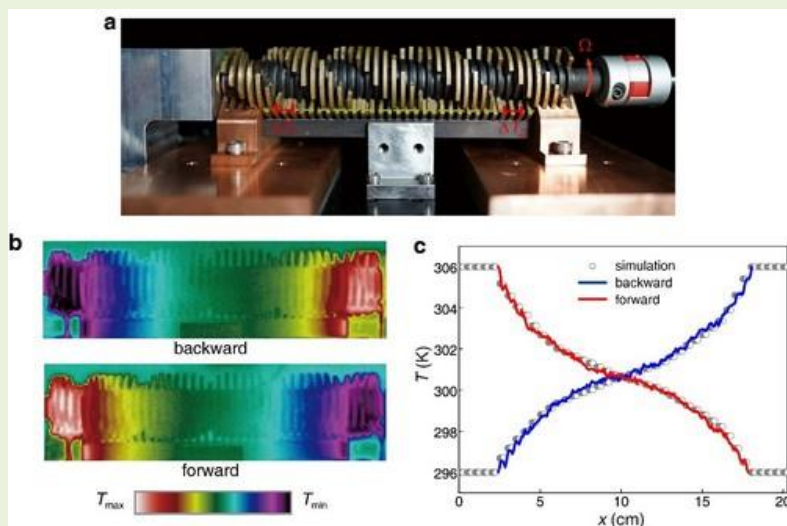
时间调制系统中热扩散的互易性

空间两点之间的波传输和热扩散的对称性都需满足互易性原理，打破传热的对称性以实现热的非互易传输对热能量管理、热信息处理等应用十分重要。通常，有三种方法可以打破互易性。第一种是通过引入具有方向性的质量或能量通量来施加外部偏置。这种方法通常不是很实用，因为其开放性通常会使底层系统很难被集成。第二种方法是使用非线性材料，例如具有温度依赖性的氧化物或合金，但这种方式对材料的依赖性限制了它的适用性和工作条件。第三种方法是受电磁学和声学研究的启发，利用时变材料打破扩散互易性。这个方案与前两种方法相比，更容易被集成和广泛适用，因此受到越来越多的关注。考虑到这种方法在波传播和电扩散等方面的连续成功，人们合理推测，似乎时间调制应该也能引起热的非互易现象。虽然时空

调制材料已被证明可以有效地打破光、声波甚至电荷扩散的互易性，但是，时空调制可能不是一种打破热互易性的可行方法。

近日，浙江大学李鹰课题组，联合新加坡国立大学 Cheng-Wei Qiu 课题组、华中科技大学祝雪丰课题组和纽约城市大学 Andrea Alù 课题组，从理论和实验等方面论证了时空调制材料中热扩散的互易性，纠正了之前单独利用时空调制能打破热扩散互易性的误解。该工作从理论、模拟和实验等方面严格证明，在不存在定向质量输运或能量通量的系统中，单独引入时空调制无法打破热扩散的互易性。该工作直接纠正了学界关于打破热扩散互易性的一些不太严谨的认识，同时也有力地证明了具有否定结论的科研成果也具备独特的学术价值。该工作中关于求解时空调制扩散问题的理论方法、扩散系统中互易性的数学定义和严格证明、以及调制行为本身对系统产生的附加影响分析，可能为关于时空调制和扩散领域的其他研究提供参考和启示。

研究成果在线发表于《Nature Communications》(IF=14.919) 期



刊上。【Jiaxin Li, Ying Li*, Pei-Chao Cao, Minghong Qi, Xu Zheng, Yu-Gui Peng, Baowen Li, Xue-Feng Zhu*, Andrea Alù*, Hongsheng Chen & Cheng-Wei Qiu*. Reciprocity of thermal diffusion in time-modulated systems. *Nat. Commun.* DOI: [10.1038/s41467-021-27903-3](https://doi.org/10.1038/s41467-021-27903-3).】浙江大学信电学院博士研究生祁铭鸿为共同一作，李鹰研究员为共同通讯作者。

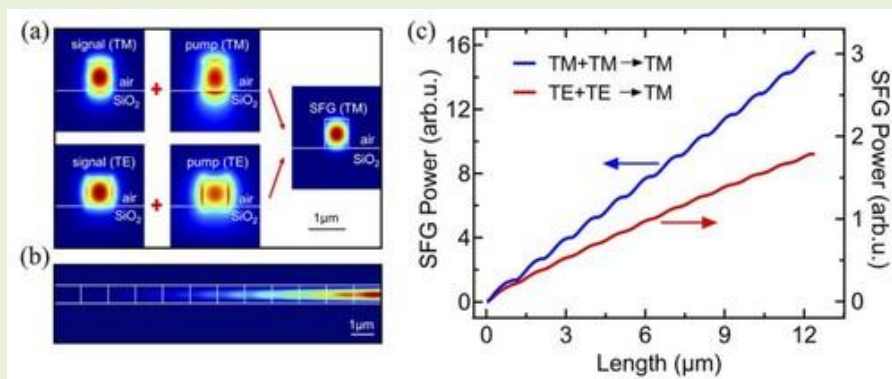
科研进展

单个铌酸锂波导上实现偏振无关单光子上转换

通信波段的单光子探测器是支持量子光学、量子通信等研究应用领域的基础设备。目前该波段常用的探测是基于 InGaAs APD，存在探测效率较低、背景噪声较高等问题。超导纳米线单光子探测器虽然性能优异，但结构庞大且价格昂贵。上转换单光子探测器通过 PPLN 波导将通信波段的单光子转换到可见/近红外波段，能够利用性能优秀的硅基 APD 来实现探测，具有很好的应用前景。然而目前实现的质子交换的 PPLN 波导只能支持一种偏振模式，因此无法在单根波导里实现偏振无关的单光子探测。

最近，方伟课题组提出了利用单根铌酸锂薄膜波导来实现偏振无关单光子上转换的方案。尽管波导中不同偏振模式的色散情况不同，通过调节波导的形状和尺寸可调控波导色散，使得 TE 模式单光子上转换的准相位匹配所需的极化周期与 TM 模式下一致，从而在单根 PPLN 薄膜波导中实现两种偏振模式的同时高效转换。该工作遍历了波导取向及上转换模式的各种可能性，最后获得了最优为 $163.8\%/W\text{ cm}^2$ 的偏振无关的单光子转换效率。

研究成果发表于《Optics Express》期刊上。【Shuhao Wang, Ni Yao, Wei Fang*, and Limin Tong, “Polarization-independent photon up-conversion with a single lithium niobate waveguide,” *Opt. Express* **30**, 2817-2824 (2022). DOI: [10.1364/OE.447817](https://doi.org/10.1364/OE.447817)】



科研进展

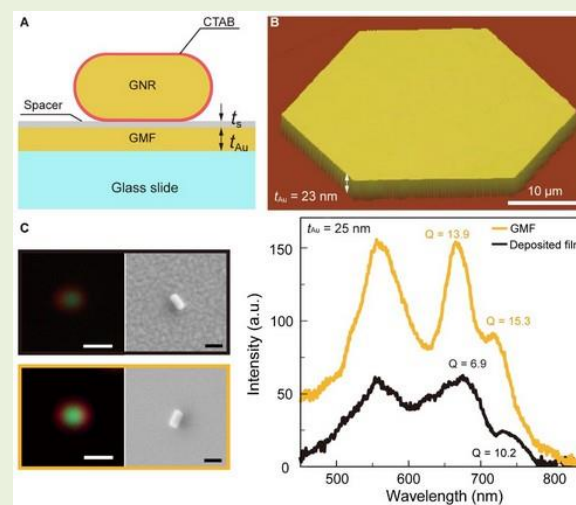
基于超平整单晶基底的低损耗等离激元纳腔

基于金属纳米颗粒-介质-金属镜面 (nanoparticle-on-mirror, NPoM) 的等离激元纳腔结构可以实现纳米尺度的极端光场局域和增强从而显著增强光与物质相互作用, 受到了国内外研究人员的广泛关注, 并产生了一系列突破性工作, 如室温单分子强耦合、“皮腔”单分子光力学、亚皮米级位移传感等。迄今为止, NPoM 纳腔通常是基于镀膜工艺制备的颗粒状多晶金属膜构建而成。这不仅极大限制了 NPoM 纳腔的光学品质和应用性能, 也限制了 NPoM 纳腔器件的集成和小型化。

最近, 王攀、童利民研究组在低损耗、可集成的 NPoM 纳腔研究方面取得重要进展。基于化学合成的超平整单晶金微米片和金纳米棒, 研究者们构建了具有丰富光学模式结构的 NPoM 纳腔, 发现并揭示了 NPoM 纳腔光学响应特性和镜面厚度 (低至 15 nm) 的关系。和传统基于热蒸镀金膜构建的 NPoM 纳腔相比, 该类型 NPoM 纳腔不仅具有更强的暗场散射强度 (约为前者的 3 倍), 同时各个模式的品质因子也有明显的提升 (约为前者的 2 倍), 接近理论极限。在此基础

上, 进一步演示了低损耗 NPoM 纳腔结构与光纤体系的高效、紧凑集成。该研究进一步推动等离激元纳腔技术的发展, 为研究高性能、集成化等离激元器件开辟了新的机会。

研究成果发表于《Nano Letters》期刊【Lufang Liu *et al.* Atomically smooth single-crystalline platform for low-loss plasmonic nanocavities, *Nano Lett.* **22**, 1786 (2022) DOI: [10.48550/arXiv.2201.09003](https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.09003)】



基于超平整单晶基底的低损耗等离激元纳腔

科研进展

超低损耗硅光波导延迟线

波导延迟线是很多片上光学干涉系统的核心部件, 如何实现超低损耗是其关键, 对于实现可调真延迟线、光学相干断层扫描系统、微波光子相控阵波束成形等系统至关重要。

科研进展

超小型薄膜铌酸锂电光调制器

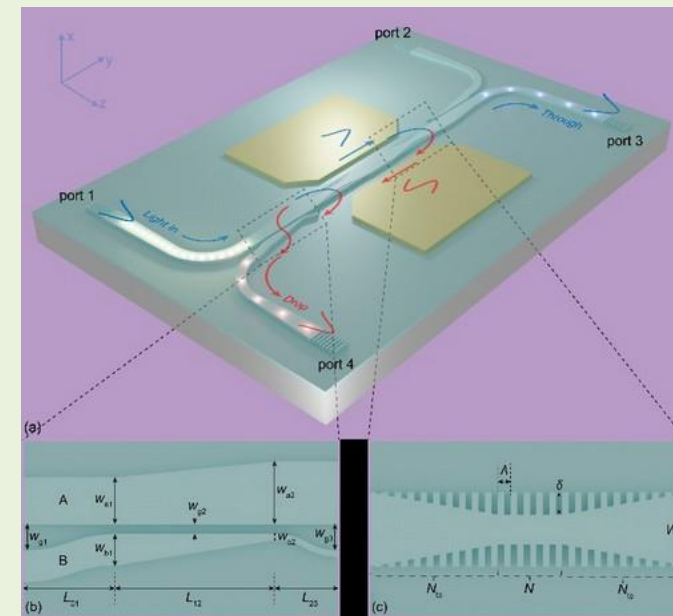
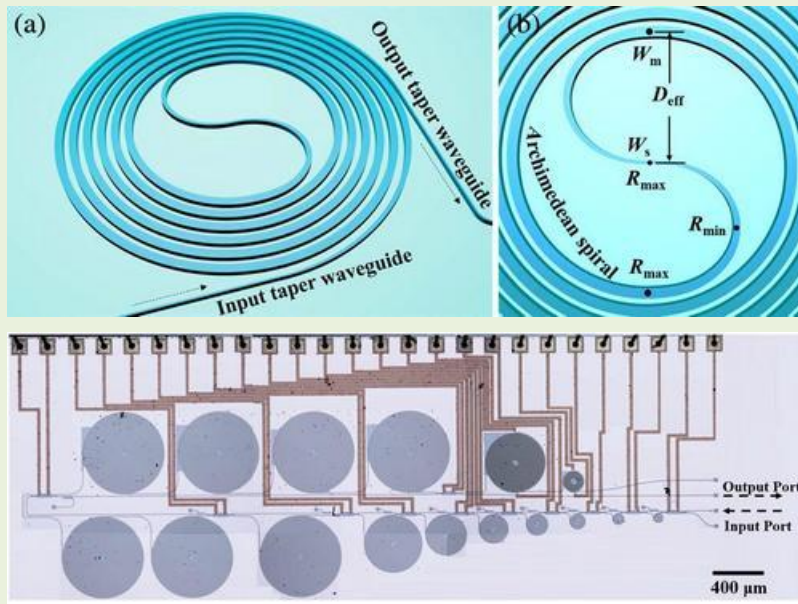
高速电光调制器是高容量、可重构和智能光学系统的关键组件。最近薄膜铌酸锂电光调制器以其优越性能受到极大关注，通常采用马赫-泽德干涉仪或环形谐振腔结构。然而，即使采用薄膜铌酸锂技术，调制器长度通常为厘米量级。如何实现超小型薄膜铌酸锂电光调制器是一个当前面临的极具挑战的难题。

最近，戴道铎教授团队提出并实现了一种基于非对称布拉格反射镜式 FP 谐振腔的薄膜铌酸锂电光调制器，所研制的电光调制器具有超低插损 (0.9 dB)，超高消光比 (~20 dB)，实现了 40 Gbit/s OOK 和 80 Gbit/s PAM4 高速调制，其调制区长度仅为 ~80 μm ，其功耗仅为

8

为此，戴道铎教授团队基于散射损耗理论分析，提出基于展宽硅光波导及其模场调控机理的低损耗硅光波导螺旋线设计新思路，创新性地引入了阿基米德螺旋线以及欧拉渐变 S 型弯曲新结构，解决了弯曲波导模式失配以及高阶模串扰问题，并基于标准工艺实现了 0.28 dB/cm 的超低损耗基模光场传输，相较于原单模波导传播损耗 (5.5 dB/cm) 降低到了 1/20。在此基础上，团队进一步实现了基于 CMOS 流片的 10-bit 片上可调延迟线，最大延迟量高达 5120 ps，是目前报道延迟量最大的硅基片上延迟线。

相关成果发表于《Photonics Research》(硕士生洪仕瀚为第一作者)。【Shihan Hong, Long Zhang, Yi Wang, Ming Zhang, Yiwei Xie, and Daoxin Dai*, Ultralow-loss compact silicon photonic waveguide spirals and delaylines, *Photonics Research*, 10: 1-7, 2021. DOI: [10.1364/PRJ.437726](https://doi.org/10.1364/PRJ.437726)】



4.5fJ/bit。此外,该结构还可用作 2×2 超高速光开关,并可扩展为大规模阵列。

相关成果发表于《Photonics Research》【Bingcheng Pan, Hongyuan Cao, Yishu Huang, Zong Wang, Kaixuan Chen, Huan Li, Zejie Yu*, and Daoxin Dai*. Compact electro-optic modulator on lithium niobate[J]. *Photonics Research*, 10(3):697, 2022.DOI: [10.1364/PRJ.449172](https://doi.org/10.1364/PRJ.449172)】(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、国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重大计划支持。

科研进展

超表面助力半固态 Lidar 扫描系统重焕生机

近年来,随着智能驾驶、室内建模等新兴技术的发展,激光雷达(Lidar)作为三维感知的核心工具一直是学术研究热点,备受社会关注。其中,光束控制扫描器件是 Lidar 的核心部件。高分辨、大视场、高扫描速度、小型化以及大的探测距离是光束扫描器件追求的主要目标,而现有机电或固态激光扫描方案在综合权衡优化这些指标参数上有很大的先天性技术难度。

最近,本实验室马云贵教授等提出了一种半固态激光雷达波束扫描技术,它由两组离轴微透镜阵列与压电陶瓷驱动模块组成,利用离轴微透镜阵列之间的微位移来控制输出光束指向,能够兼具大口径、高分辨、大视场角、高扫描频率和高负载功率的技术优势。实验上制作了两组高数值孔径($\text{N.A.}=0.77$)超表面微透镜阵列,核心光学部件尺寸 $2\times 2\times 1\text{ mm}^3$,在 $70\mu\text{m}\times 70\mu\text{m}$ 的最大离轴位移下获得 $30^\circ\times 30^\circ$ 视场角和 0.14° 分辨率扫描参数,通过测试模拟街景演示了它的三维深度扫描探测功能。得益于超表面的轻薄化设计和压电陶瓷的快速微位移能力,半固态式方案有望成为未来激光雷达发展的重要路线。

研究成果在线发表于《Nano Letters》期刊上。【Rui Che, Yifan Shao, Yi Zhou, Yongdi Dang, Hongguang Dong, Sen Zhang, Yubo Wang, Jian Chen, Jian, Bing-feng Ju, and Yungui Ma*, A Semisolid Micromechanical Beam Steering System Based on Micrometa-Lens Arrays, *Nano Letters* **22**, 1595-1603 (2022) DOI: [10.1021/acs.nanolett.1c04493](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c04493)】浙江大学光电学院博士研究生陈瑞为第一作者,马云贵教授为通讯作者。

