
基于3D纳米打印技术的微纳光子灯笼空间模式复用器（具有高折射率对比度、低损耗）

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28438.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于3D纳米打印技术的微纳光子灯笼空间模式复用器（具有高折射率对比度、低损耗）。导读

近日，来自以色列耶路撒冷希伯来大学应用物理学院的Dan M. Marom教授团队在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》发表了题Free-Standing Microscale Photonic Lantern Spatial Mode (De-)Multiplexer Fabricated using 3D Nanoprinting的高水平论文，Yoav Dana博士为本文的第一作者，Dan M. Marom教授为本文的通讯作者。研究团队提出了一种使用三维打印技术设计、制造和表征的六模混合光子灯笼（PL）结构，该PL结构包括源接口波导、空间复用器和输出锥形波导三个模块，通过遗传算法优化结构参数，最终实现了在具有高折射率对比度、较低的插入损耗、偏振依赖损耗和模式依赖损耗的微尺度光子灯笼结构。

研究背景

空间复用器在各种光相关领域得到了广泛应用，包括大容量模分复用（MDM）光纤通信网络、自由空间光通信、相干功率合成、自适应光学和波前传感等。空间模式复用器（及解复用器）将单个源（模式）转换为空间上重叠和正交的模式，理想情况下具有低损耗和紧凑形式。光子灯笼（PL）模式复用器由多模光波导和一组离散单模（SM）波导之间的绝热空间跃迁组成，具有匹配的模式和波导计数。它们可以无损地从多模域转换到单模阵列域，然后再转换回来，这是MDM赋能的技术之一。PL复用器可以被分类为模式保持装置或模式混合装置。两者都与需要多输入多输出（MIMO）均衡的光纤通信系统兼容，以消除光纤通道本身以及可能在PL中出现的混合现象。PL可以通过多种方法制造，如将单模光纤放置在一体的低折射率护套中、使用直接激光写入技术在玻璃中进行波导刻字、以及在光子集成电路中实现。由于需要绝热跃迁，PL设备通常较长并且使用低折射率对比度波导。

三维（3D）纳米打印技术已经彻底改变了光子学领域，使得能够制造用于操纵亚微米分辨率光波的复杂结构。这种高分辨率是通过基于非线性双光子聚合（TPP）的直接激光写入技术（DLW）获得的，可以实现具有任意形状和尺寸以及高保真度的光学结构。使用TPP技术，可以高精度地生产3D打印的光波导，从而可以创建长度在微米到毫米不等的独立或几乎独立的波导。该技术产生了空气包层波导，具有低损耗低优点，可用于许多光子应用。与玻璃介质中的DLW相比，3D纳米打印提供了可以在不同材料和衬底上制造的优势，实现了与不同平台的多功能灵活集成。它提供了实现高耦合效率和良好模式匹配的能力。此外，3D纳米打印允许制造高折射率对比度波导，其小的横向尺寸对于保持单模是必需的。

创新研究

光子灯笼（PL）空间复用器在多种应用中展现出极大的潜力，例如，大容量模分复用（MDM）光通信网络和自由空间光通信。然而，当前的制造方法将这些设备的大小强制到毫米量级，使得与微纳光子系统的集成变得相当具有挑战性。

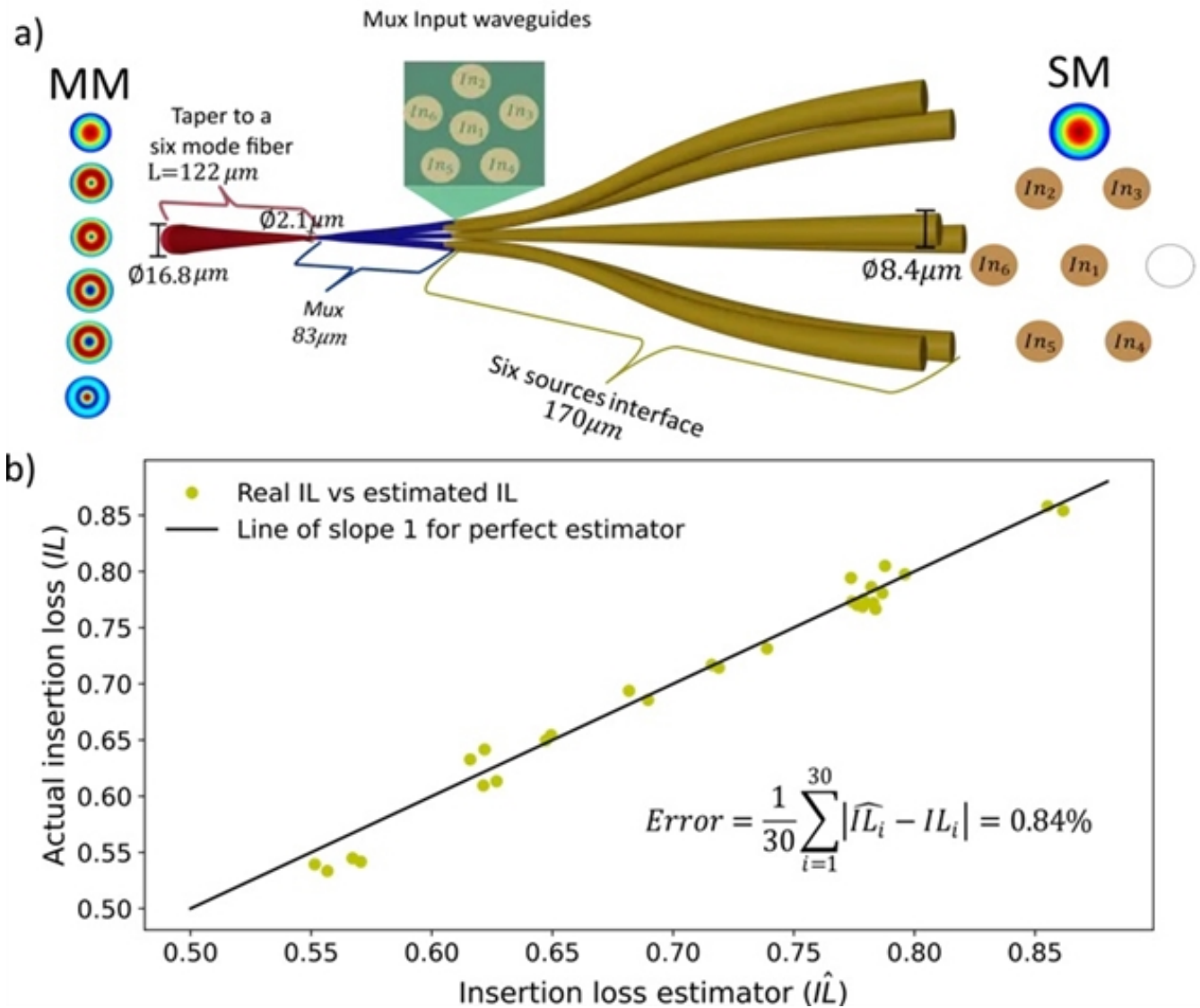


图1、光子灯笼结构。（a）PL分为三个部分：源接口、空间复用器（MUX）和输出锥形波导。右图：MUX的六个输入波导的布局；（b）通过12次FDTD模拟计算的IL与仅通过2次FDTD仿真估算的IL的对比。

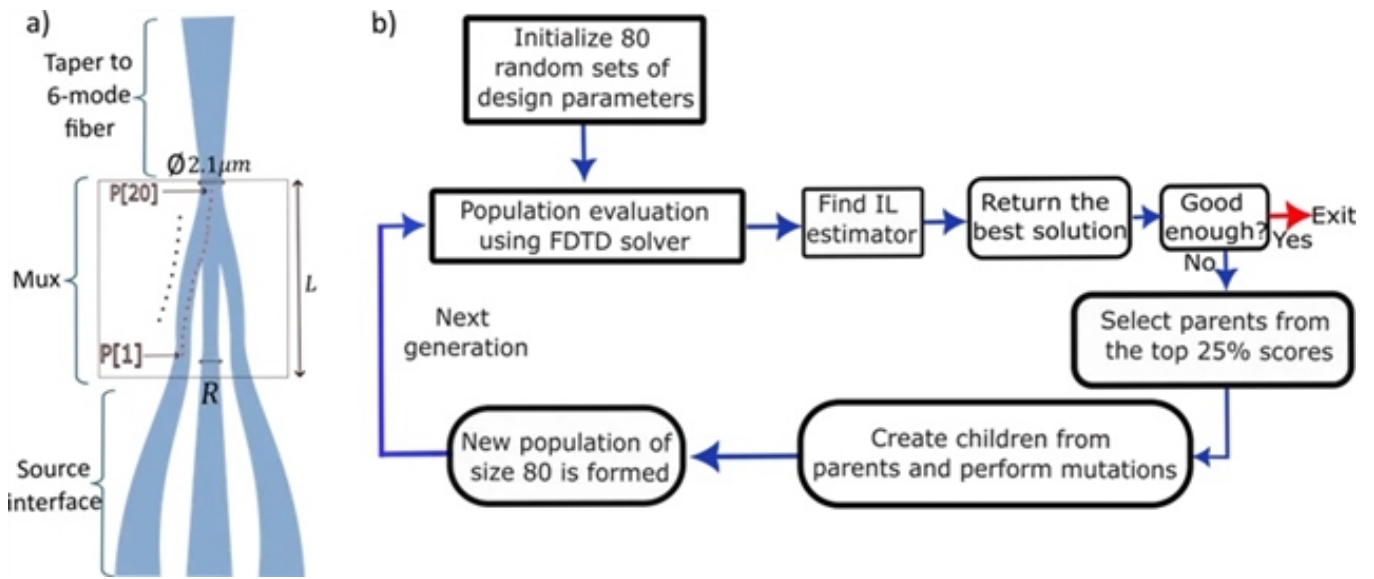


图2. 光子灯笼的设计：a) PL布局，识别优化设计参数：P[1], P[2], ..., P[20]定义了曲线路径，R是PL的输入直径（在源接口波导的末端），L是MUX长度。b) 框图的优化过程，使用遗传算法进行参数优化。

研究结合3D微纳打印技术，提出了一种制造出高折射率对比度的六模混合光子灯笼（PL）结构的新思路，其总长度仅为 $375\ \mu\text{m}$ 。这种小型PL包括三个模块，分别为用于与六个单模（SM）光源连接的源接口波导、空间复用器（MUX）和用于与六模光纤连接和匹配的输出锥形波导，能够实现六个单模输入与一个六模模式波导之间的转换。PL内发生模式转换的空间复用器（MUX）元件长度仅为 $83\ \mu\text{m}$ 。

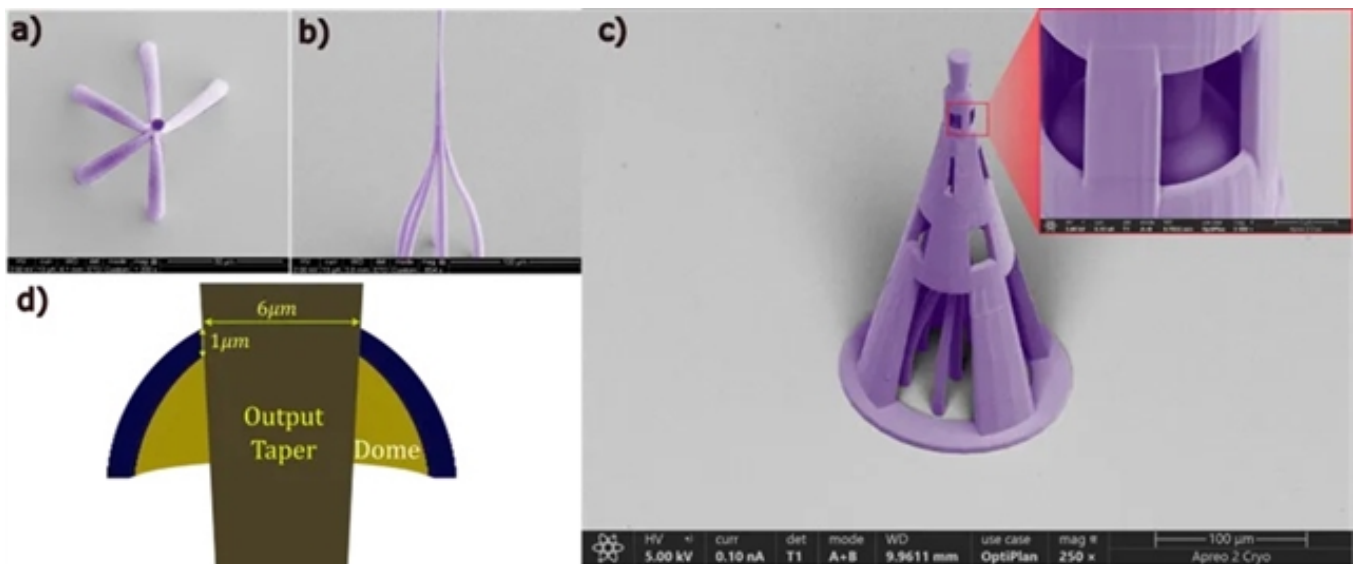


图3. 制造的光子灯笼示意图。a-b) 玻璃基板上原型PL结构的SEM俯视图和侧视图。c) 扫描电镜下的PL结构的图像。d) 输出锥度处支撑圆顶区域的剖切侧视图，来自3D CAD模型。

研究人员通过基于遗传算法的逆向设计方法进行结构参数优化，并且直接使用商用的基于两光子聚合的3D打印机和光聚合物，在一根多芯（7芯）光纤（MCF）端面上进行了PL的制造。所制造的PL是一个紧凑的、自立的设备，证明了该PL可以直接三维打印在几乎任何光源或其他基底上

，表明该PL的独特设计和制造技术使其可以轻松集成到各种光源和系统中。同时，研究人员通过特殊的外部结构来进一步增强其机械稳定性，并最大限度地减少对性能的影响。

Dan M. Marom教授团队呈现的3D打印PL展示出高折射率对比度，并具有较低的插入损耗（-2.6 dB）、偏振依赖损耗（-0.2 dB）和模式依赖损耗（-4.4 dB）。与基于全光纤PL、玻璃内刻PL和多平面光转换（MPLC）自由空间技术的其他多路复用器相比，虽然该PL表现出略高的插入损耗（IL）和模式依赖损耗（MDL）值，这归因于制造上的不完善。但是其尺寸却只有其他模式复用器的1/102，这在直接集成到不同平台上以及消除可能影响占地面积和尺寸并可能引入差分光纤延迟的光纤互连方面提供了显著优势。

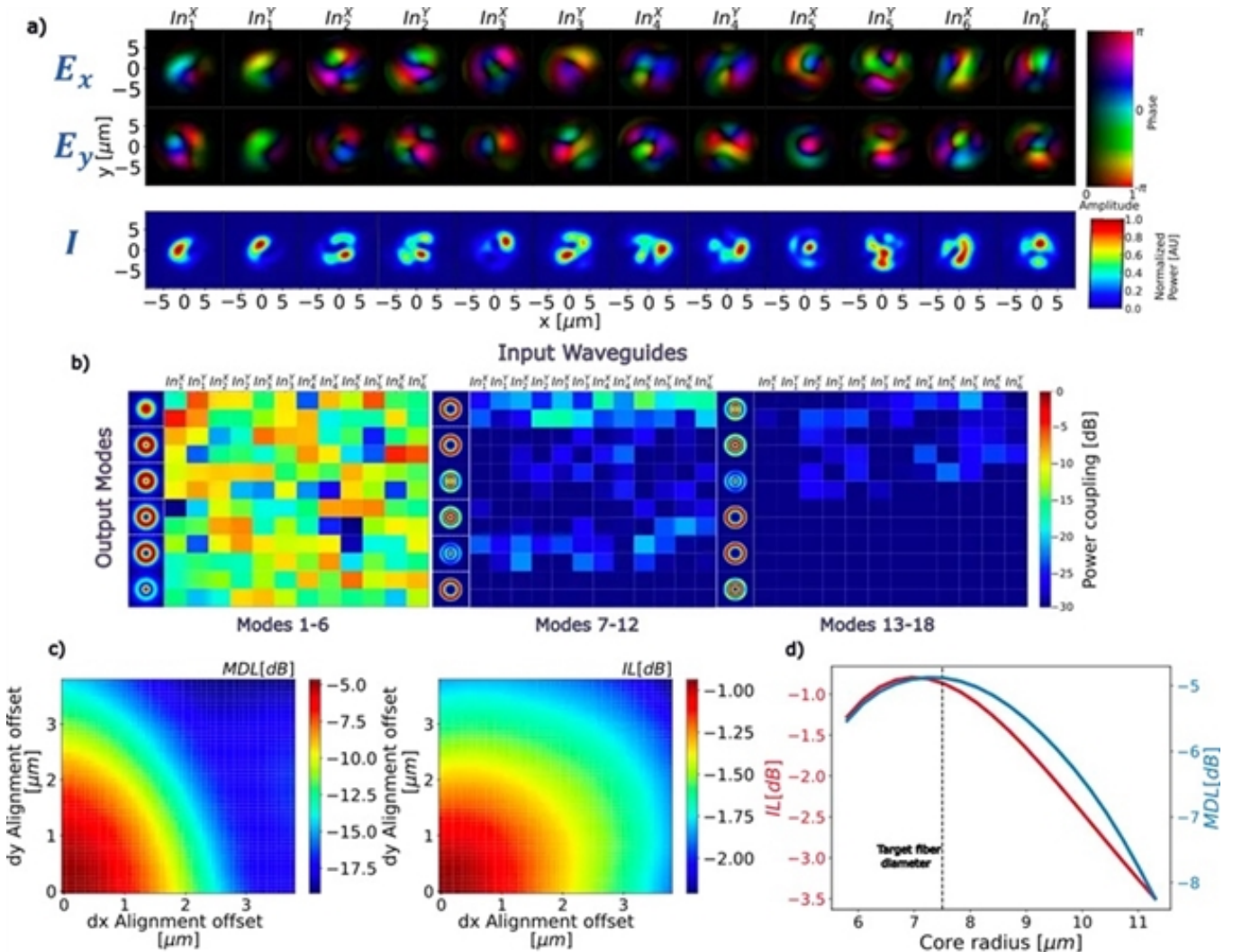


图4、光子灯笼输出场特征。（

a) PL的每个输入模式产生的重构电场包含两个正交复场分量；(b) 耦合矩阵的绝对平方值相对于1-6模光纤模式（左）、波导模式7-12（中）和波导模式13-18（右）示出；(c) IL和MDL作为x和y方向上光纤偏移的函数；(d) IL和MDL关于光纤芯半径的函数曲线。

此外，研究人员设想这种微小的三维打印PL可以与微尺度集成光子电路和密集的垂直腔面发射激光器（VCSEL）阵列无缝集成。这种由附加3D打印技术实现的集成功能，结合其紧凑性和独立的能力，可以使其成为超越光纤系统的各种光相关应用的理想选择。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

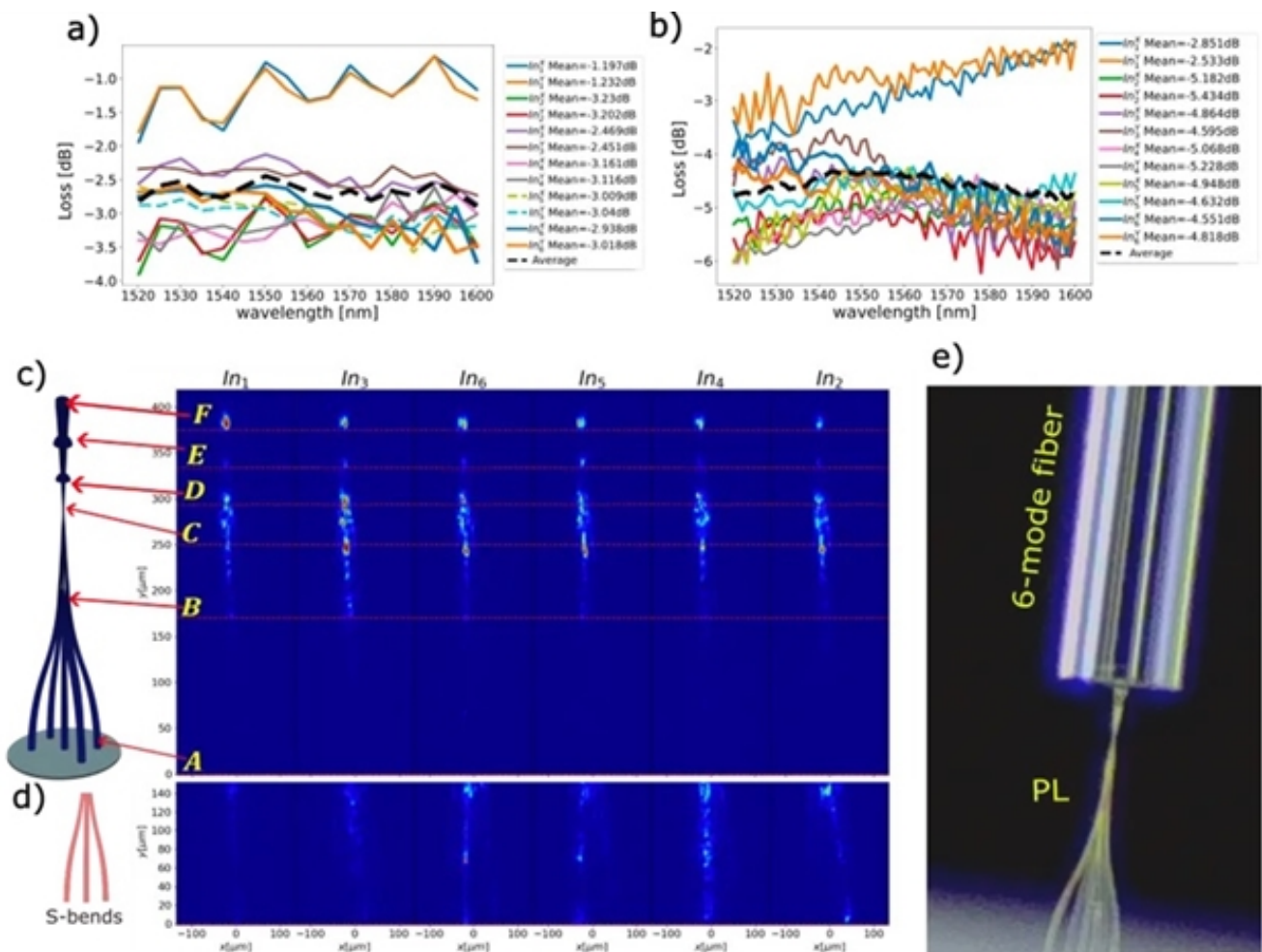


图5、光子灯笼对自由空间和光纤的损耗。(a) 每个输入模式的输出功率损耗与波长的关系；(b) 对接耦合到6模光纤后的输出功率；(c) 用于识别散射的PL的俯视图的IR图像；(d) 具有较高曝光时间的截面的IR图像；(e) 耦合到光纤的PL对接的显微镜图像。

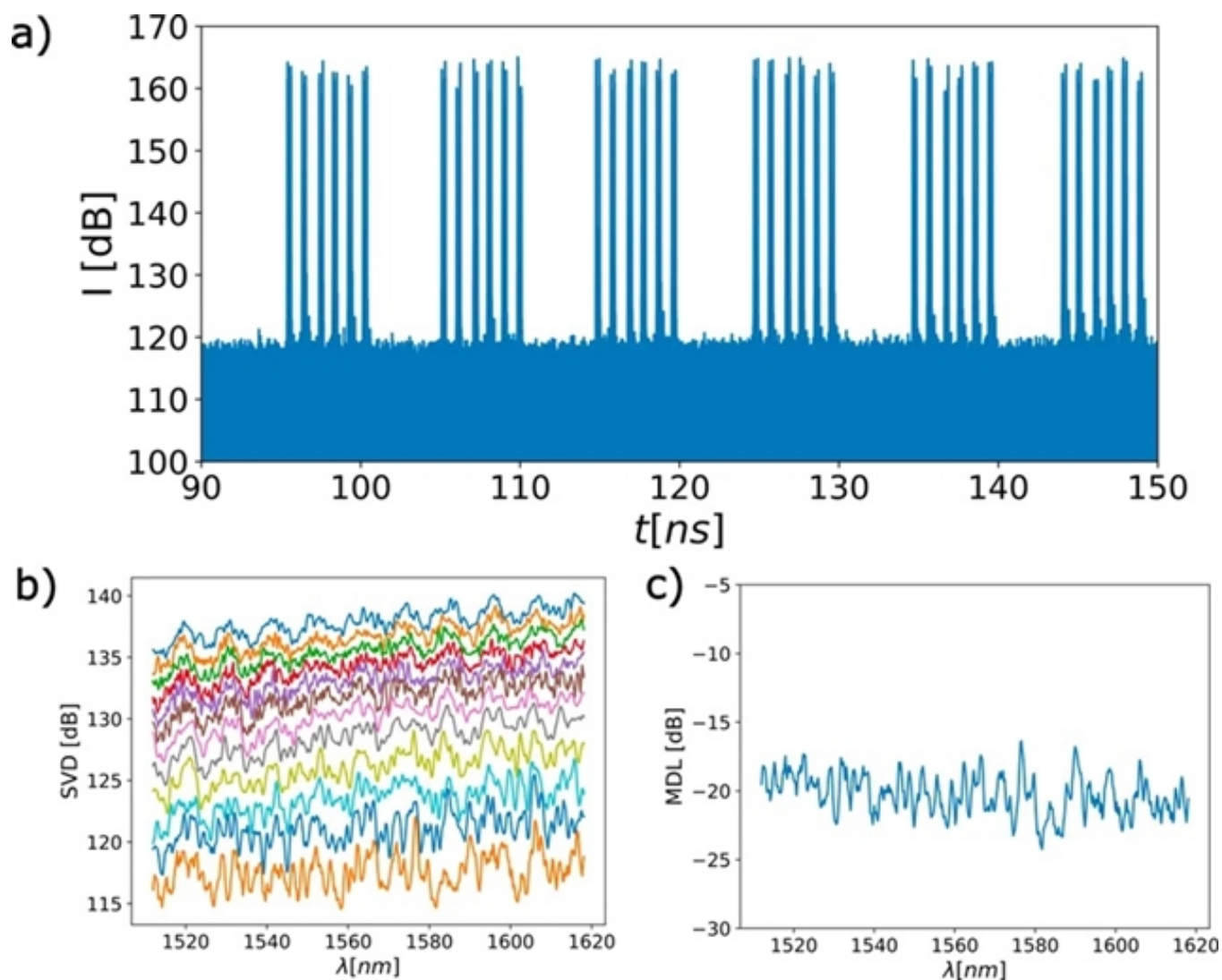


图6.系统实验测试结果，使用PL MUX、6模光纤和保模DEMUX。(a) 时域光学矢量网络分析仪(OVNA)测量强度图；(b) 12 奇异值分解(SVD)值关于波长的函数；(c) 模式依赖损耗(MDL)关于波长的函数，根据b)中的值计算。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01466-6>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：Dan M. Marom 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发