

光学学报

基于光子灯笼的全光纤空间模式生成与自适应控制

姜宗福^{1,2,3*}, 陆瑶^{1**}, 刘文广^{1,2,3***}, 周琼^{1,2,3}, 姜曼^{1,2,3}, 陈子伦^{1,2,3}, 张汉伟^{1,2,3}, 刘鹏飞^{1,2,3}, 张江彬^{1,2,3}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;

³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 光子灯笼是一种将单模光纤和多模光纤的优势特点相结合的新型光子器件,在天文光子学、光纤通信模式复用、光纤激光模式控制等领域具有重要应用。本文主要介绍了光子灯笼的结构与模式演化理论,以及光子灯笼的制备与工艺,并基于光子灯笼的模式自适应控制,介绍了光子灯笼在高功率、大模场增益光纤激光放大器中抑制模式不稳定效应的应用,以及光子灯笼在大模场光纤中产生新型光束(如涡旋光束)的应用。

关键词 光纤激光; 模式; 光子灯笼; 自适应光学

中图分类号 O248 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230912

1 引言

光子灯笼 (photon lantern) 结构与概念最早是由巴斯大学的 Birks^[1]在天文学家 Bland-Hawthorn 的启发下于 2005 年提出的。当时光子天文学中地基天文观测已应用多模光纤收集和传输望远镜获得的星体光谱信息,但这些信息中存在一些干扰光谱,比如高空大气层的羟基(OH)在白天吸收太阳能,在晚上产生红外光谱,这些光谱可方便地通过光纤布拉格光栅(FBG)来滤除,但 FBG 只能刻制在单模光纤上,Bland-Hawthorn 访问巴斯大学时提出“多模光纤(MMF)能否实现单模光纤(SMF)的 FBG 的滤波性能”。受此启发,Birks 等^[2]提出了图 1(a)所示的光子灯笼结构,通过锥形过渡区将多根 SMF 与一根 MMF 连接在一起。在锥形过渡区可以实现空间模式(横模)在 MMF 与多根 SMF 之中的耦合与演化,如图 1(b)所示,当 SMF 数目与 MMF 所支持的空间模式数相互匹配时,可以实现双向几乎无损地传输,同时通过 FBG 实现滤波,为 SMF 的独特性能应用在大模场的 MMF 系统中提供了可能。2011 年,悉尼大学第一次获得了有实际应用效果的光子灯笼,将其应用于天体光子学观测中。

光子灯笼很快就作为绝热模式转化器吸引了通信领域研究者的关注。由于适合长距离传输的 SMF 系统在数据承载容量上存在限制,人们致力于发展空分

复用系统、模分复用系统以适应大数据时代的需求。2012 年,Ryf 等^[3]首次实现了基于光子灯笼设计的 12×12 低损耗模式多路复用器,实验中,40 Gbit/s 的正交相移键控(QPSK)信号复用到 6 个双偏振方向的空间模式中,有效传输距离超过 130 km。之后,埃因霍温理工大学^[4]、佛罗里达大学^[5]、南普顿大学^[6]、悉尼大学^[7]等科研机构相继对光子灯笼在通信系统中的应用展开了研究。

另一方面,空间模式控制与光束整形在诸多领域具有广泛应用,比如:荧光超分辨成像中确定形态的光束照明技术^[9];激光加工应用中,需要控制模式的偏振来影响材料的吸收能力,以及环形光束用于钻孔^[10];在光通信应用中,将信息加载在可控的高阶模上,以提升通信容量和数据传输速率^[11-13]等等。通过 MMF 系统实现模式控制、实现光束整形是一种具有吸引力的方式。特别是在高功率光纤激光领域,大模场增益光纤的应用,一定程度上克服了传统的非线性效应(受激拉曼散射、受激布里渊散射、自相位调制)^[14],但由于热效应产生高阶模式与基模的耦合的时间不稳定性问题,即横模不稳定效应(TMI)^[15-17],对光束质量产生严重影响。尽管人们提出了一些抑制 TMI 的方法,如通过盘绕光纤在一定程度上保持基模特性,但光纤弯曲会减小光纤的模场面积,给非线性效应的抑制带来不利影响^[18];同时人们通过自适应光学,进行光纤光束的模

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-05-26; 录用日期: 2023-06-12; 网络首发日期: 2023-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(61905281, 12074432)

通信作者: *jiangzongfu7@163.com; **lybenben1@163.com; ***lwg.kevin@163.com

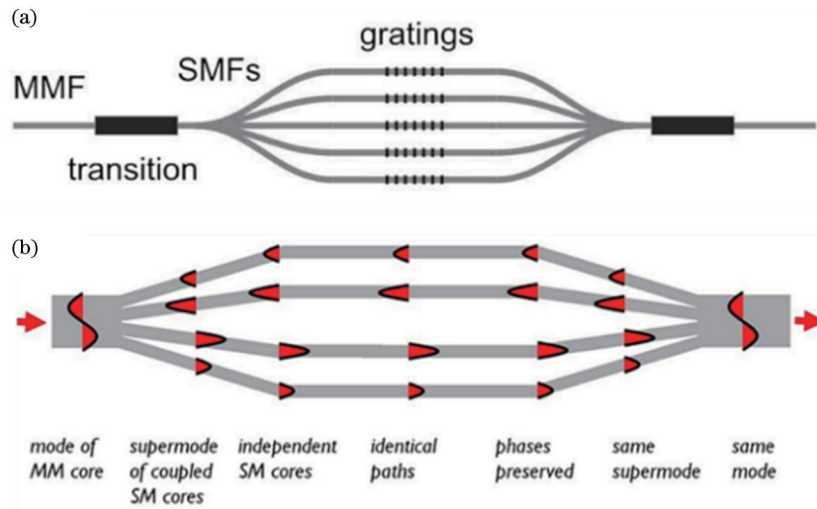


图 1 光子灯笼结构示意图^[8]。(a)由 MMF-SMFs-MMF 构成的光子灯笼对结构示意图。MMF 与 SMF 通过锥形过渡段连接,通过 SMFs 上的 FBGs 实现 MMF 的滤波;(b)光子灯笼中模式演化示意图

Fig. 1 Structure diagram of photonic lantern^[8]. (a) Structure diagram of a photonic lantern pair composed of MMF-SMFs-MMF. MMF and SMFs are connected through tapered transition segment, and MMF filtering is realized through FBGs on SMFs; (b) schematic diagram of mode evolution in photonic lanterns

式控制与整形,但传统自适应光学往往采用空间光路结构,不仅不利于全光纤化,而且在控制带宽、光机调整、系统的紧凑和质量等方面存在问题^[19-20]。

近年来,基于光子灯笼的全光纤结构空间模式的自适应控制,成为解决模式不稳定效应,以及实现模式控制的有效途径^[21-26]。大模场光纤中模式控制采用的光子灯笼结构如图 2 所示,是原始光子灯笼结构的一半(包含一个 SMFs 到 MMF 过渡结构),目前人们仍将图 2 所示的波导结构器件称为光子灯笼^[27]。该结构的光子灯笼是通过 N 根 SMF 在玻璃套管的束缚下经熔融拉锥而成,一般表述为 $N \times 1$ 光子灯笼(这里“ N ”表示 N 根 SMF 组成输入端,“1”表示 1 根 MMF 输出端),其结构外形与光纤合束器相似。它是一种 N 根 SMF 通过拉锥与单根 MMF 相连、实现光的横模转换、能量损耗较小的光波导器件。2016 年,林肯实验室 Montoya 等^[24]首次提出将光子灯笼应用于空间模式自适应控制中,利用随机并行梯度下降(SPGD)方法,对光子灯笼输入端光场的相位进行主动控制,实现了基于 3×1 光子灯笼的空间模式自适应控制,在 $25/400 \mu\text{m}$ 的 MMF 端得到了稳态基模输出,通过在系统中增加振幅、偏振控制,实现了 $\text{LP}_{11\text{e}}$ 和 $\text{LP}_{11\text{c}}$ 模式的稳态输出。当光子灯笼输出端与大模场光纤激光放大器相熔接时,实现了模式的选择性放大,并利用基于光子灯笼的模式自适应控制,实现了对高功率光纤放大器中 TMI 的有效抑制^[25]。他们还指出,光子灯笼所支持的多模输出扩大了输出光束远场的角度范围,将在光束控制和大气湍流补偿方面具有明显优势^[28]。

光子灯笼与光纤合束器其外形相同,制作工艺相近,为什么可以实现基于光子灯笼的大模场光纤模式

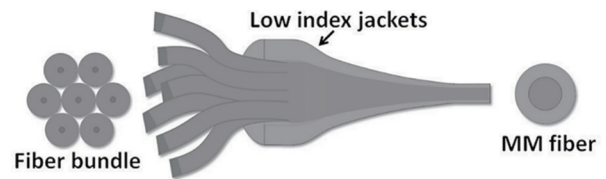


图 2 模式控制系统中采用的光子灯笼的结构示意图^[29]

Fig. 2 Structure diagram of photonic lantern used in mode control system^[29]

自适应控制以及光纤激光中的模式不稳定性抑制,而合束器不能?这种全新的模式控制机理与光子灯笼的锥区结构和模式演化的物理机制是什么?应该满足什么样的条件?工艺上如何实现?对以上这些物理问题的研究,对研究光子灯笼的物理性质以及其应用具有重要意义^[8,11],为基于更多通道数光子灯笼的模式控制与相干合束研究提供必要的理论基础。本文主要介绍了光子灯笼的结构与模式演化,并基于光子灯笼的模式自适应控制机理,介绍了光子灯笼在高功率、大模场增益光纤放大器中 TMI 抑制的应用,以及光子灯笼在大模场光纤中高阶模式涡旋光束的产生与应用。

2 光子灯笼模式演化理论

大模场光纤中模式控制采用图 2 所示的光子灯笼结构,其原理是通过拉锥使多根 SMF 与单根 MMF 实现低损传输与空间模式演化。关于光子灯笼的模式演化过程更好的理解方式是,将多根 SMF 作为一个组合波导,当各纤芯间没有耦合时,这些纤芯中的模式是简并的(即纤芯中的模式有相同的传输波数),因此单芯光纤间的模式相加可以构成正交模^[30],在拉锥过程中各单芯逐渐接近时,纤芯间模式形成耦合,此时形成超模,该

超模是由确定振幅与相位的单个模式的叠加组合而成,超模随着锥区变细进一步传输进入单根 MMF 端,演化为某一确定的模式或几个模式的叠加,如图 1(b)所示。实现上述模式演化,要求光子灯笼在结构设计上满足输入端 SMF 数与输出端模式数相匹配、SMF 排布具有对称性,以及具备光子灯笼的制备条件等。

2.1 SMF 数与模式数匹配

光子灯笼的重要特征是多根 SMF 束端的超模模式与多模端所支持的模式存在确定的对应关系,在多根 SMF 端有确定的单模组合方式输入时,单芯 MMF

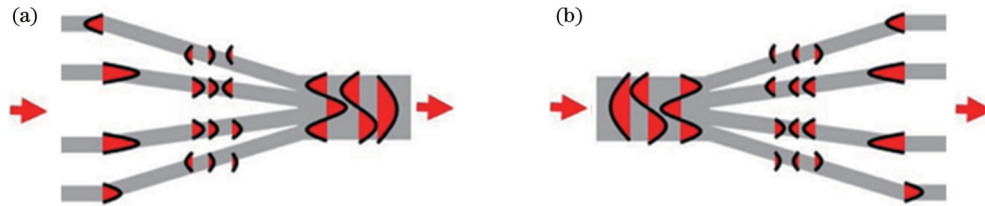


图 3 光子灯笼输入输出模式之间的一一对应关系。(a)从 SMFs 到 MMF;(b)从 MMF 到 SMFs

Fig. 3 Correspondence between input and output modes in photonic lantern. (a) From SMFs to MMF; (b) from MMF to SMFs

2.2 SMF 排布与对称性

光子灯笼模式匹配不仅对输入端与输出端正交模式数具有一定的要求,同时还与拉锥时 SMF 组束时的排布存在一定的关系,即要求排布满足一定的对称性。比如三根 SMF 按两种不同排布构成的 3×1 光子灯笼,输入模式输出模式分布与演化存在较大区别,如图 4 所示。正三角形排布时的 3×1 光子灯笼从超模演

端存在确定的模式输出;反之,该确定模式从多模端输入,在 SMF 束端得到的输出单模组合与原输入相同^[31],如图 3 所示。光子灯笼输入输出模式的这种一一对应关系,要求光子灯笼输入端的 SMF 数等于输出端 MMF 所支持的模式数:

$$N_{in} = N_{out}, \quad (1)$$

式中: N_{in} 表示输入端的 SMF 数; N_{out} 表示输出端 MMF 所支持的模式数。这是光子灯笼与光纤合束器不同的主要特征。光子灯笼这种模式匹配关系,起到两个作用:一是减小传输损耗;二是有利于模式自适应控制。

化到单芯多模端的三个模式 LP_{01} 、 LP_{11o} 和 LP_{11e} 模,它们的演化都约束在纤芯中;直线排布的 3×1 光子灯笼,3 个 SMF 的超模为 LP_{01} 、 LP_{11e} 和 TEM_{20} ,通过锥区演化, TEM_{20} 模演化到多模端的包层中,进而产生损耗^[11],这种损耗称为对称性损失。因此,Fontaine 等^[11]同时提出了一种 SMF 的几何排布尽可能与 MMF 模式强度分布相接近的方法,避免对称性损失的产生。

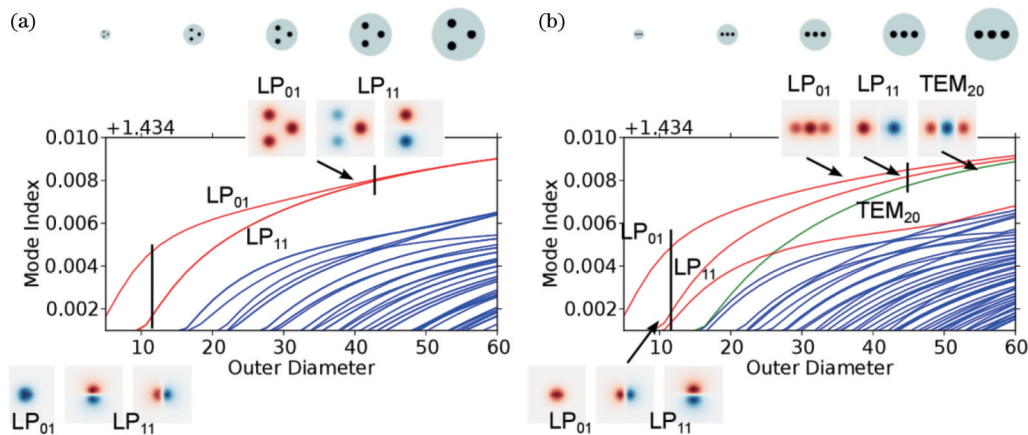


图 4 SMFs 按不同排布构成 3×1 光子灯笼的模式演化对比^[11]。(a)正三角形排布;(b)直线排布

Fig. 4 Comparison of mode evolution in 3×1 photonic lantern with SMFs in different arrangements^[11]. (a) Equilateral triangle arrangement; (b) linear arrangement

2.3 光子灯笼拉锥绝热条件

前面讨论了模式数匹配与对称性产生高阶模模式间的交叠,从而引起光子灯笼的传输损耗,是基于光子灯笼理想拉锥的假设,即锥区是理想的渐变状态条件下产生的。锥区理想渐变称为光子灯笼拉锥的绝热条件,这与光纤合束器的绝热条件相同^[8]。光子灯笼拉锥的绝热条件满足下式时,光在光子灯笼中的传输损失非常小^[3,29]:

$$\left| \frac{2\pi}{\beta_1 - \beta_2} \frac{d\rho}{dz} \int \Psi_1 \frac{d\Psi_2}{d\rho} dA \right| \ll 1, \quad (2)$$

式(2)表明锥区模式横向变化越剧烈传输损耗越大,其中各参量可参考文献[8],这里不再详述。光子灯笼拉锥绝热条件、模数匹配、SMF 排布对称性条件三者间的关系,与光束模式演化、能量传输损耗间的相互作用与影响,以及对制备工艺的影响与要求是需要深入研究的课题^[8]。

在优化设计光子灯笼时,满足绝热条件、多模端的模式数与 SMF 束端的光纤个数匹配、SMF 的排布满足对称性的条件下,原则上可以通过光子灯笼获得期望的模式,图 5 给出了 3×1 、 6×1 、 8×1 、 10×1 、 12×1 和 15×1 等 6 种光子灯笼可以支持的输出模式情形。比如,多模端的 V 数在 $3.83 \sim 5.13$ 之间时,支持 6 个模式,如图 5 第二行前三列所示,SMF 最佳组束根数为 6 根,排布方式如图 5 第一行第三列所示,这样制作的

6×1 光子灯笼可以实现前 6 个模式的输出或它们的组合输出,由 SMF 输入条件确定,亦即通过控制输入条件进行输出模式的产生。再比如 15×1 光子灯笼,当 15 个 SMF 按图 5 第一行最后一列方式排布时,多模端的 V 数在 $7.016 \sim 7.588$ 之间时,支持如图 5 第二行所示的 15 个模式,这样制作的 15×1 光子灯笼可以实现 15 个不同模式的输出或它们的组合输出。

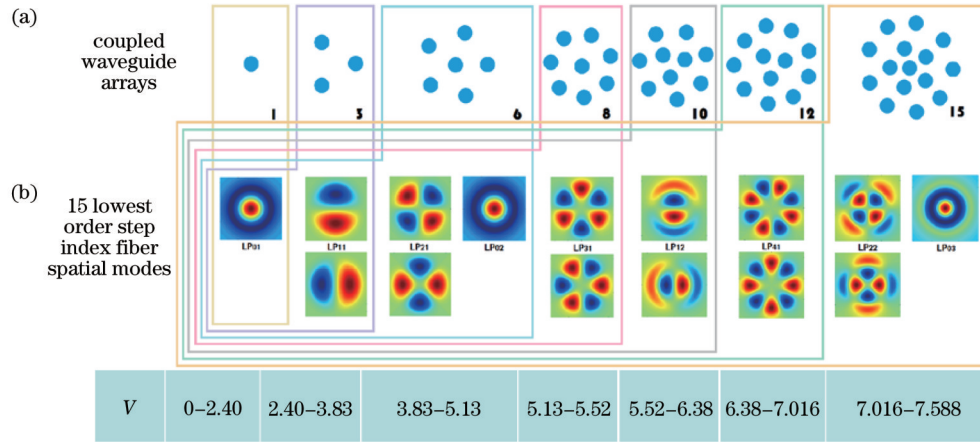


图 5 几种典型的光子灯笼。(a)SMF 束排布方式;(b)支持的空间模式

Fig. 5 Several typical photonic lanterns. (a) SMF bundle arrangement; (b) corresponding spatial modes

2.4 光子灯笼模式演化

光子灯笼模数匹配、SMF 排布对称性条件下,通过绝热拉锥可以获得理想的光子灯笼,这种光子灯笼模式演化为线性过程,且满足图 3 所示的传输可逆,即光子灯笼的模式输入与输出满足一一对应关系,比如希望单芯多模端输出模式为基模,通过模式的逆向传输,可获得在 SMF 束端每一根 SMF 的输入条件。这里以 3×1 光子灯笼为例进行简单讨论,图 6(a)为 3×1 光子灯笼结构示意图,三根 SMF 对称排布,插入玻璃套管进行熔融拉锥,多模端 V 数在 $2.40 \sim 3.83$ 之间,支持 3 个模式与 SMF 数相等,此时光子灯笼输入输出间存在的一一对应关系,可以采用矩阵形式描述,将输入端 3 个基模的输入光场组合用矢量 \boldsymbol{v} 表示,多模端三个模式用矢量 \boldsymbol{u} 表示,比如 LP_{01} 模表示为 $\boldsymbol{u} = (1, 0, 0)$ 。应用传输理论数值仿真计算结果,如图 6(b)所示,获得 3×1 光子灯笼输出端模式与输入端光场组合的演化矩阵形式为

$$\boldsymbol{u} = A\boldsymbol{v}, \quad (3)$$

式中,演化矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

图 6(b)第一行显示,当在 3 个 SMF 端同强度相位差为 0 的基模输入时,在多模端的输出为基模,与演化矩阵第一行相匹配;图 6(b)第二、三行显示,特定强度比不同相位差输入时产生高阶模(LP_{11})输出,与演化矩阵第二、三行相匹配。以不同模式为目标的演化过程及相应的 \boldsymbol{u} 和 \boldsymbol{v} 的取值如图 6(c)所示。

2.5 光子灯笼结构优化与涡旋光束

尽管图 5 给出的光子灯笼 SMF 排列方式使损耗最小化,并且适用于空分复用系统,但它给模式自适应控制带来一些困难。比如,如果按照图 5 中的排布方式,利用 6×1 光子灯笼实现 LP_{01} 模式,则中间 SMF 输入的振幅与外围 SMF 输入的振幅比值需为 4:1,这将为实际模式控制系统带来一定的难度。在大量理论仿真的基础上,发现光子灯笼结构设计除了满足模数匹配、SMF 排布对称性条件和绝热拉锥三个基本条件外,还应该考虑模式自适应控制的简洁。当把 6×1 光子灯笼的中心 SMF 去除,改为 5×1 光子灯笼时,其结构如图 7 所示,输出基模的输入条件更为简单(各路输入振幅相等即可)。

图 8 给出了 5×1 光子灯笼中的模式演化和生成特殊模式的输入条件:当具有相等振幅和相同相位的五个基模光束被输入时,输出为基模;当两个相邻 SMF 之间输入具有相等振幅和 0.4π 相位差的基模光束时,输出模式为 OAM_0^{+1} 模;同理,获得 OAM_0^{-1} 、 OAM_0^{+2} 、 OAM_0^{-2} 模式的输入条件亦可从图 8(b)的演化矩阵中得到^[32]。

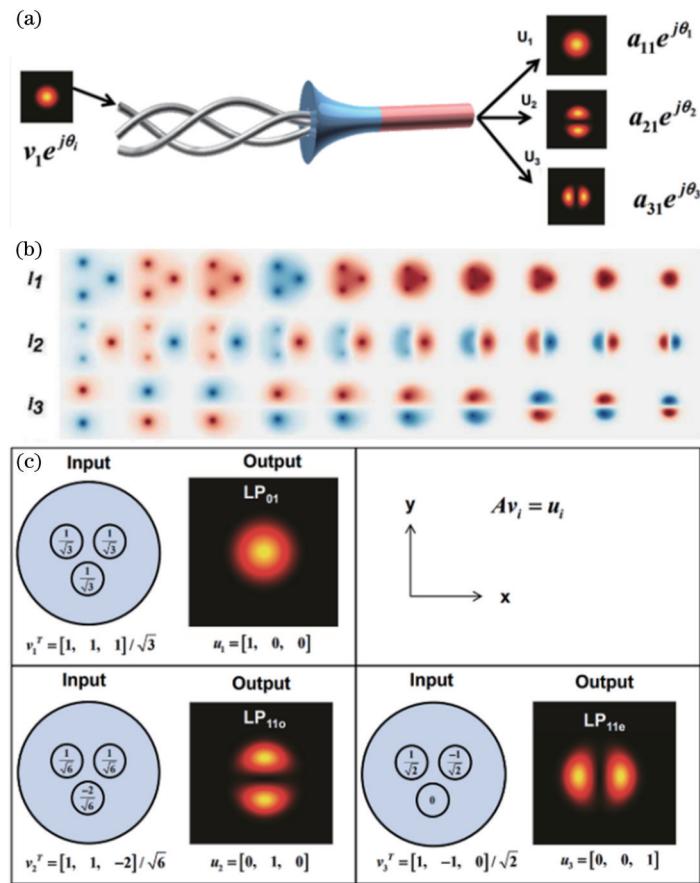


图 6 3×1 光子灯笼模式演化^[24]。(a) 结构示意图; (b) 三种模式演化过程; (c) 输入输出对应关系

Fig. 6 Mode evolution in 3×1 photonic lantern^[24]. (a) Schematic diagram of structure; (b) three mode evolution processes; (c) input-output correspondence

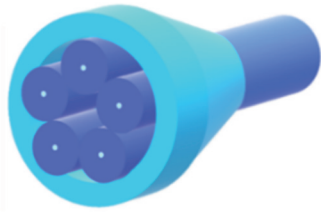


图 7 5×1 光子灯笼结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of 5×1 photonic lantern

3 光子灯笼制备工艺与测试

光子灯笼制备工艺有 SMF 插光子晶体光纤空气孔拉锥法、多芯光子晶体光纤塌缩法、多芯光纤拉锥法、超快激光 3D 刻蚀法和 SMF 束套管拉锥法等五种方法。

3.1 早期光子灯笼制备方案

最初光子灯笼是通过将 SMF 插入光子晶体光纤的空气孔再熔融拉锥而成^[33]。如图 9(a) 所示, 在光子晶体光纤的 7 个空心孔中分别插入 SMF, 在光纤拉丝塔上进行拉制, 采用这种方式制作的第一款光子灯笼, 实现了多模光束从单多模到多单模再到另一单多模的传输, 并在 SMF 段刻蚀上布拉格光栅实现了一定效果

的滤波^[1]。

多芯光子晶体光纤塌缩法是将多芯光子晶体光纤外围孔堵塞, 在拉锥装置上通过放电加热, 使被加热的未堵塞部位的空心孔产生塌缩, 形成单芯多模光子晶体光纤^[34], 图 9(b) 从左向右展示了三芯单模光子晶体光纤的塌缩过程, 最左边的图显示了三芯单模光子晶体光纤未塌缩的横截面结构, 最右边的图显示了三芯单模结构已完成到多模单芯的转换。

光子天文学应用中需要具有几十甚至上百根单模纤芯构成的光子灯笼, 以上两种方法很难实现, 为此, 人们提出了第三种光子灯笼制作方法——多芯光纤拉锥法, 拉锥前多芯光纤中每一单芯传输模式均为基模, 将其插入低折玻璃套管中, 通过熔融拉锥使得多芯光纤和玻璃套管同时变细最终构成支持多模的新的波导结构。图 9(c) 为 120 根多芯光纤制备的光子灯笼横截面结构图^[31]。

超快激光 3D 刻蚀法, 是在基底材料上刻蚀集成光波导。用显微物镜将超短激光脉冲聚焦到玻璃样品上, 诱导非线性吸收的发生, 进而使相应部位局部折射率发生变化, 再配合位移平台的移动, 刻蚀出多个单模导芯从分离到逐渐变细变近, 最终形成一个多模单芯波导的光子灯笼结构^[35], 如图 9(d) 所示。

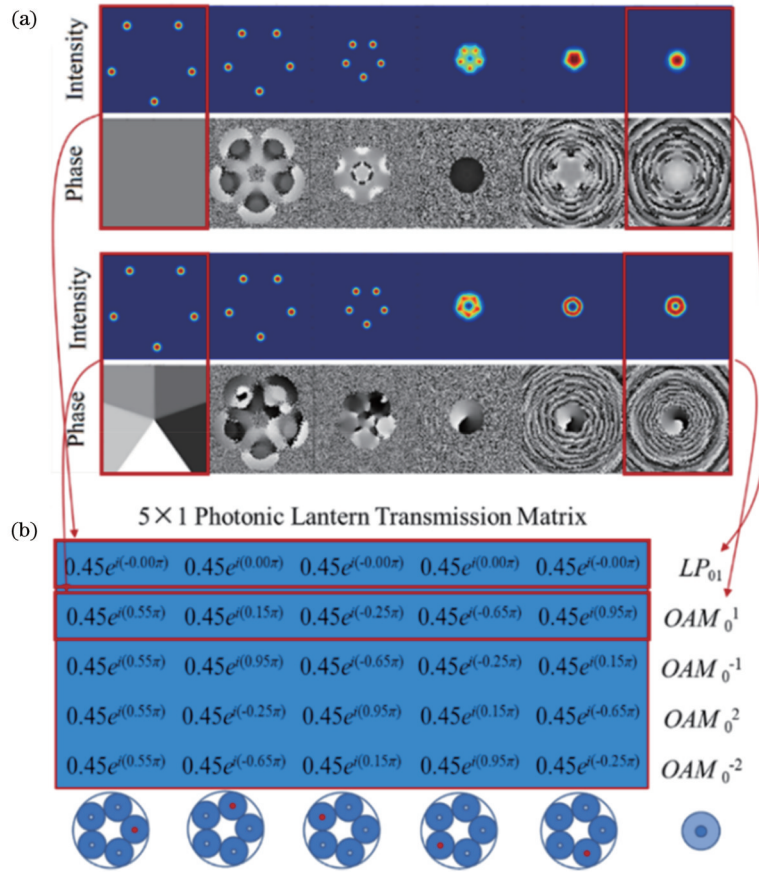


图 8 5×1 光子灯笼模式演化^[32]。(a)基模和 OAM₀⁺¹模的模式演化过程；(b)5×1 光子灯笼的演化矩阵

Fig. 8 Mode evolution in 5×1 photonic lantern^[32]. (a) Evolution processes of fundamental mode and OAM₀⁺¹ mode; (b) evolution matrix of 5×1 photonic lantern

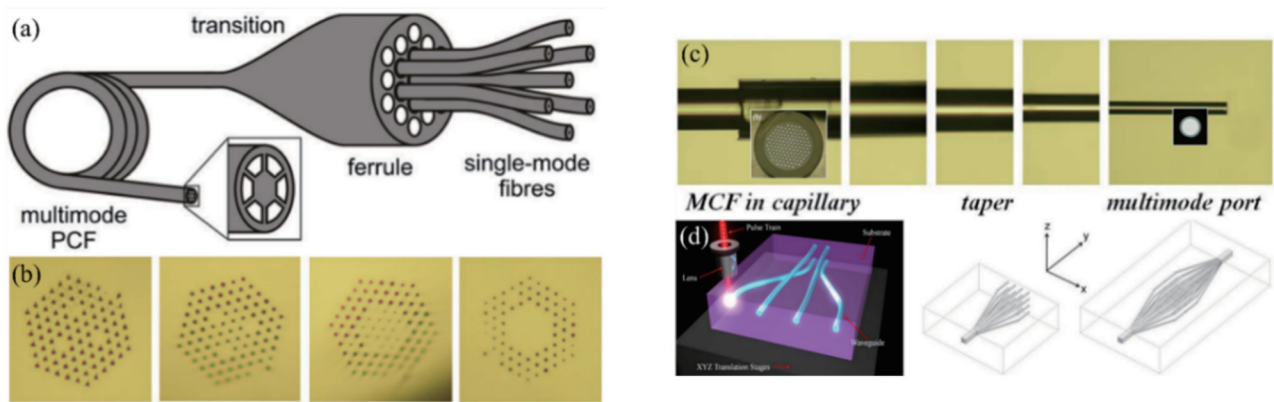


图 9 早期的光子灯笼制备方案^[1,31,34-35]。(a)光子晶体光纤(PCF)套管拉锥法；(b)多芯 PCF 塌缩法；(c)多芯光纤拉锥法；(d)超快激光刻蚀法

Fig. 9 Early photonic lantern fabrication schemes^[1,31,34-35]. (a) Photonic crystal fiber (PCF) drawn from filled ferrule; (b) multicore PCF collapse method; (c) multicore fiber tapering method; (d) ultrafast laser etching

3.2 SMF 束套管拉锥法制备光子灯笼

SMF 束套管拉锥法能够灵活地选择 SMF 根数和排布方式,在光纤激光模式产生与自适应控制中具有独特的应用价值。该方法是将一定数量的 SMF 按一定方式排布,插入低折玻璃套管中进行熔融拉锥,其光子灯笼整体结构与不同位置的横截面结构如图 10 所示。该方式制备的光子灯笼优点是方便控制 SMF 端

的输入光场,进而可以灵活地在多模端得到想要的输出模式。

SMF 束套管拉锥法制备光子灯笼的过程中,在满足第 2 节中模数匹配、空间排布等基本要求外,为更便捷地实现特定模式的可控输出,在理论和实验探索中发现,SMF 的纤芯尺度与其包层尺度之比,对光子灯笼输出模式特性具有重要作用,将这个比值定义为

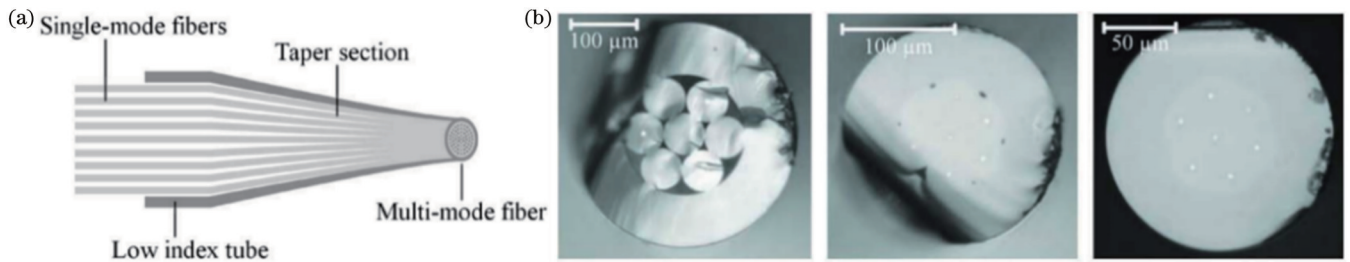


图 10 SMF 束套管拉锥法制备光子灯笼^[36]。(a)结构示意图;(b)不同截面的光学显微图

Fig. 10 Photonic lantern fabricated by SMF-bundle-tube tapering method^[36]. (a) Structure diagram; (b) optical micrographs of different sections

SMF 的“芯包比”^[37]。

基于光束传播方法,模拟由不同芯包层比 SMF 拉制而成的光子灯笼中的模式演化过程,以演化目标模式为基模为例,采用输出光场的 M^2 因子作为评价参量。图 11 表明,光子灯笼输出光束的 M^2 因子随着输入 SMF 的芯包比(纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$)的变化而产生明显变化。为了使输出光束的 M^2 因子更接近 1, SMF 的芯包比需要足够大^[32]。例如,为了在具有 $30\ \mu\text{m}$ 芯径 MMF 的 5×1 光子灯笼输出端获得准基模 ($M^2 <$

1.1), 输入 SMF 的包层应小于 $72\ \mu\text{m}$, 即芯包比应大于 0.138; 为了在具有 $35\ \mu\text{m}$ 芯径 MMF 的 5×1 光子灯笼输出端获得准基模, 则输入光纤的包层直径应小于 $80\ \mu\text{m}$, 即芯包比应大于 0.125。对于 3×1 光子灯笼, 为了在 $30\ \mu\text{m}$ 芯径输出光纤端获得准基模, 输入 SMF 的包层应小于 $98\ \mu\text{m}$, 即芯包比应大于 0.102; 如果输出光纤的纤芯直径为 $35\ \mu\text{m}$, 则输入光纤的包层直径应小于 $105\ \mu\text{m}$, 即芯包比应大于 0.095。

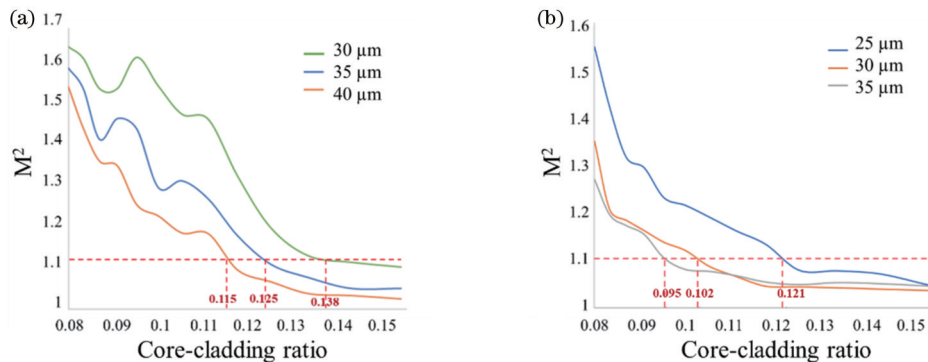


图 11 光子灯笼输出光束 M^2 因子随输入光纤芯包比变化曲线^[32]。(a) 5×1 光子灯笼;(b) 3×1 光子灯笼

Fig. 11 M^2 factor of photonic lantern output beam varies with input fiber core cladding ratio^[32]. (a) 5×1 photonic lantern; (b) 3×1 photonic lantern

在制备过程,将输入端的每根 SMF 剥离一定长度的涂覆层,再将剥去涂覆层的部分浸入氢氟酸溶液中,对其包层进行腐蚀,使其芯包比达到理想值。将处理过的 SMF 束根据一定的几何形状组束插入低折玻璃管中。在绝热近似条件下进行熔融拉锥,使纤维管束逐渐变细。将玻璃套管-SMF 束的锥区末端切平角,并与输出 MMF 相熔接,完成光子灯笼制备^[32]。

图 12(a)是 3×1 光子灯笼锥区末端切割端面的光学显微图,该光子灯笼输入端 SMF 参数为 $10/110\ \mu\text{m}$ ($NA=0.08$), 将 SMF 束插入低折玻璃管 ($510/1000\ \mu\text{m}$) 中, 逐渐变细至 $25/45\ \mu\text{m}$ (SMF 束/玻璃管外径), 与参数为 $25/125\ \mu\text{m}$ ($NA=0.065$) 的少模光纤熔接。图 12(b)给出了 5×1 光子灯笼锥区末端切割端面的光学显微图, 这里选择 $10/70\ \mu\text{m}$ ($NA=0.08$) 的 SMF 作为输入端, 输出端少模光纤参数为 $30/125\ \mu\text{m}$

($NA=0.065$), 拉锥后 SMF 束-套管的尺寸为 $30/60\ \mu\text{m}$ 。输出光纤与锥区末端熔接点的显微图如图 12(c) 所示。

4 基于光子灯笼的模式自适应控制

理想的光子灯笼可以被视为线性光学元件, 如式 (3) 所示, 输入端光场的条件锁定后, 输出端能够生成确定的模式。但在实际光子灯笼系统中, SMF 端的路径之间的相位差扰动和偏振起伏对模式演化产生严重的影响, 导致光子灯笼输出端模式不断变化。在光子灯笼中引入自适应控制方法, 产生特定模式光束, 还可以对大模场增益光纤 ($42/250\ \mu\text{m}$, $50/400\ \mu\text{m}$) 放大器实现模式自适应控制, 以及产生高功率特殊空间分布光束, 如携带轨道角动量的涡旋光束 (OAM 模)。

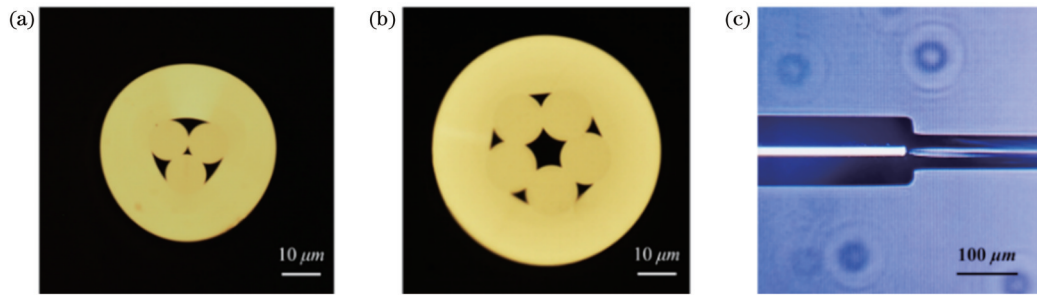


图 12 光学显微图^[32]。(a) 3×1 光子灯笼锥区末端切割端面; (b) 5×1 光子灯笼锥区末端切割端面; (c) MMF 与 SMF 束-玻璃套管锥区末端的熔接点

Fig. 12 Optical micrographs^[32]. (a) End face at end of taper of 3×1 photonic lantern; (b) end face at end of taper of 5×1 photonic lantern; (c) splicing point of MMF and SMF bundle-end of taper of glass tube

4.1 基于光子灯笼的光纤模式自适应控制

在 2.1 节中讨论光子灯笼设计的基本原则之一是 SMF 数与输出端 MMF 所支持的模式数相互匹配。将光子灯笼应用到自适应模式控制后, 这一设计要求最先被林肯实验室 Montoya 等^[21, 24-25]突破。他们使用 3×1 光子灯笼在芯径为 $20 \mu\text{m}$ 的 MMF (该光

纤支持六种模式) 中实现基模输出, 其基于光子灯笼的自适应模式控制光路原理如图 13(a) 所示。通过对输入端 SMF 相位、偏振和强度的控制, 在光子灯笼输出端获得基模和高阶模式的稳定输出, 如图 13(b) 所示。其中自适应控制算法选择 SPGD 算法。

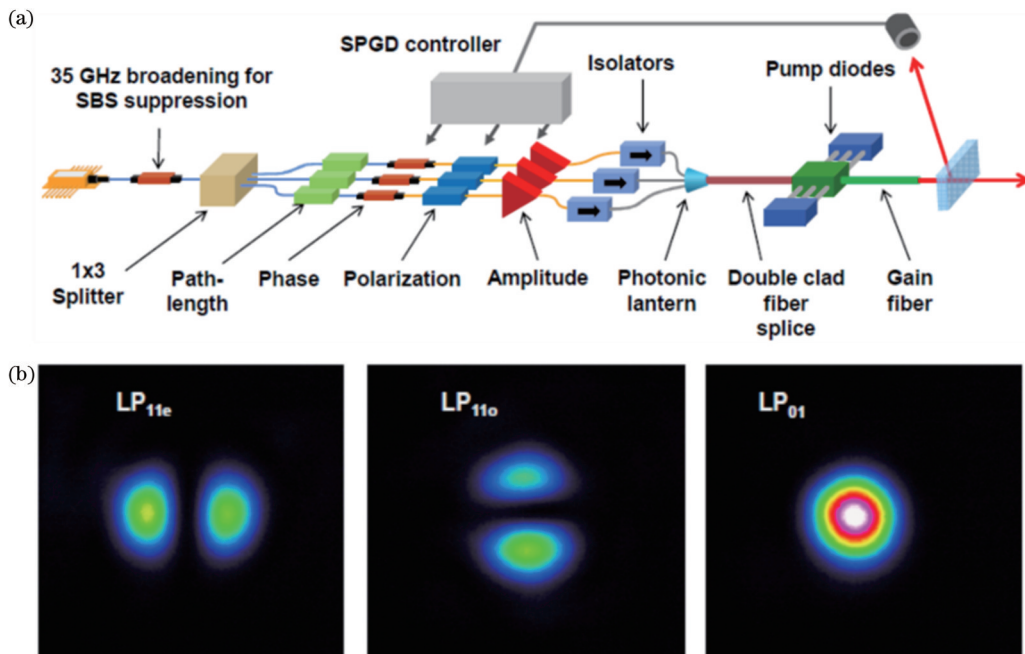


图 13 基于光子灯笼的模式自适应控制^[25]。(a) 模式控制系统原理图; (b) 模式控制效果

Fig. 13 Mode adaptive control based on photonic lantern^[25]. (a) Schematic diagram of mode control system; (b) mode control effect

再将光子灯笼输出端与纤芯为 $25 \mu\text{m}$ 的 MMF 放大器熔接后, 通过模式自适应控制有效抑制输出光束的模式不稳定效应。实验结果表明, 在没有模式自适应控制时, 该放大器模式不稳定功率阈值为 800 W 左右, 输出功率随泵浦功率上升的速度明显下降; 在模式自适应控制条件下, 当输出功率达到 1200 W 时, 仍未出现模式不稳定效应, 如图 14 所示^[25]。

4.2 基于光子灯笼的大模场光纤模式自适应控制

受林肯实验室 Montoya 等所提出的实验结构的启发, 通过理论和实验发现, 通过优化设计 SMF 芯包比,

制备优化设计后的 3×1 光子灯笼, 分别在纤芯为 $30 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$ 芯径的 MMF 端实现了模式的自适应控制输出。

利用第 3.2 节拉制出的 3×1 光子灯笼, 搭建自适应控制系统。根据光子灯笼多模端探测到的输出光束的桶中功率, 利用 SPGD 算法对 SMF 输入端的相位进行主动控制。如图 15 所示, 在自适应控制系统开环时, 输出光斑形态不断变化, 光束质量 M^2 因子也随时间不断波动; 在控制闭环情况下, 光斑稳定在准基模形态, 模式分解计算表明, 闭环条件下基模占比在 95%

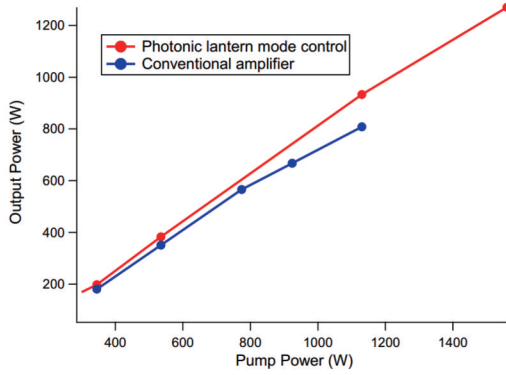


图 14 光纤放大器中光子灯笼模式自适应控制部分的添加对输出功率随泵功率变化的影响^[25]

Fig. 14 Influence of addition of photonic lantern-based mode adaptive control system in fiber amplifier on variation of output power with pump power^[25]

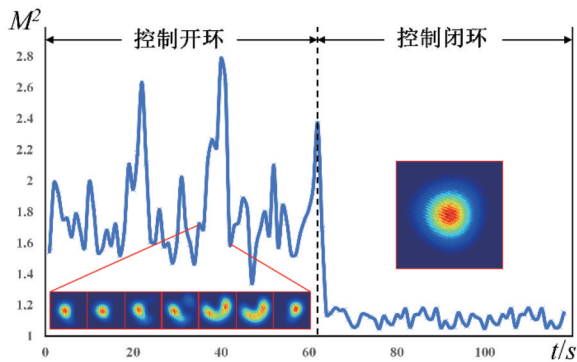


图 15 控制系统开环与闭环时输出光束的光斑形态与 M^2 因子的变化情况^[38]

Fig. 15 Spot shapes of output beam and change of M^2 factor in open and closed loop of control system^[38]

以上, 光束质量 M^2 因子稳定在 1.18 以下^[38]。

当控制目标模式为 LP_{11} 模时, 评价函数选取为 LP_{11} 模的模式占比作为反馈信号, 在控制闭环后, 相机探测到的近场光斑强度分布如图 16 左图所示; 图 16 右图为

通过数值分析法计算得到的模式分解结果重构出的光斑强度分布, 此时实测光斑与重构光斑的互相关系数为 0.9778, 计算得到的 LP_{11} 模的模式占比为 96.33%。

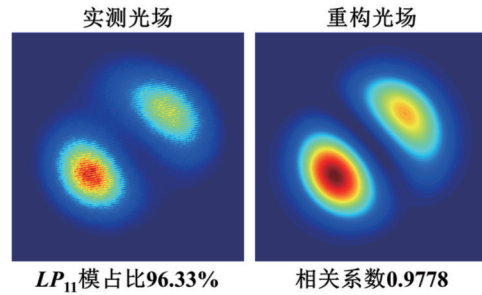


图 16 光子灯笼模式自适应控制系统实现稳定 LP_{11} 模输出的效果及其模式分解情况^[38]

Fig. 16 Achieving stable LP_{11} mode output and corresponding mode decomposition in photonic lantern-based mode adaptive control system^[38]

将此优化设计后的 3×1 光子灯笼、两端包层尺寸不同但纤芯都为 $50 \mu\text{m}$ 的 MMF 依次熔接, 构成输出端 MMF 纤芯为 $50 \mu\text{m}$ 的新型光子灯笼^[37], 如图 17 所示。对于 MMF 区域, 第一段 MMF 的纤芯直径应等于三个 SMF 拉锥后的外接圆直径, 以确保两个端面之间较高的基模重叠积分。

这种新型结构的 3×1 光子灯笼在模式自适应控制下获得了比较理想的实验结果, 如图 18 所示。上方的曲线显示输出光束的 M^2 因子变化, 而下方的曲线显示控制闭环前后通过数值分析方法计算得出的基本的模式含量。图上方还显示了以 5 s 为间隔的输出光束强度分布。很明显, 在 SPGD 开环条件下, 功率在不同模式之间耦合, 光束质量较差, 基模的含量不断变化且较小 (几乎总是低于 0.5), M^2 因子随之变化并保持较大值 (几乎总是高于 2.5)。而在 SPGD 闭环条件下, 输出光束稳定在准基模状态下 (基模的含量一直高于 0.95) 并且 M^2 因子低于 1.4^[37]。

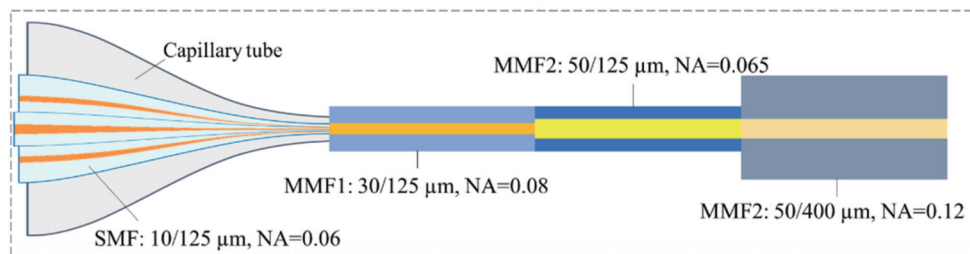


图 17 优化设计后的 3×1 光子灯笼结构示意图^[37]

Fig. 17 Structure diagram of 3×1 photonic lantern after optimization design^[37]

为了验证 MMF 分段熔接策略的有效性, 在熔接中, 分别测量了每一熔接段熔接前的模自适应控制效果, 从图 19 可以看到, 三个不同输出位置的基模控制效果差异并不明显, 光束质量 M^2 因子有轻微退化。理论和实验证明, 只有光子灯笼拉锥的腰区域芯直径为

$30 \mu\text{m}$ 左右时, 才更利于实现单横模, 光束质量较好 (详细讨论可参考文献 [39])。

4.3 基于光子灯笼的大模场光纤放大器模式不稳定效应抑制

将 4.2 节新型光子灯笼优化方法应用到 5×1 光子

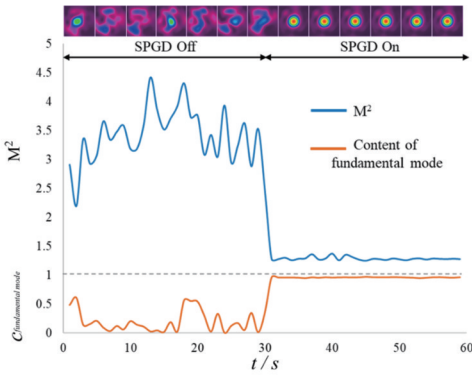


图 18 优化设计后的 3×1 光子灯笼在模式自适应控制系统中实现基模控制的效果^[37]

Fig. 18 Control effect of fundamental mode in optimized 3×1 photonic lantern-based mode adaptive control system^[37]

灯笼制备中,实现了对纤芯 42 μm 的光纤激光放大器的模式控制与模式不稳定效应的有效抑制^[39],实验结

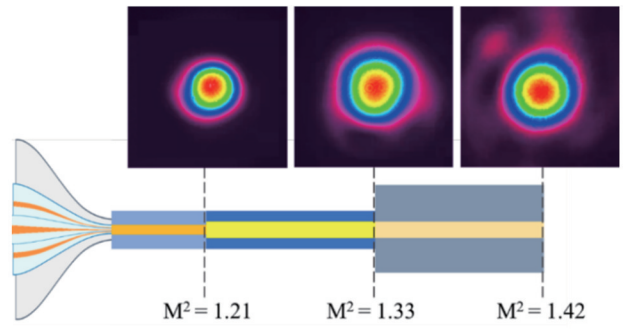


图 19 三个不同输出位置的基模控制效果^[37]

Fig. 19 Control effects of fundamental modes at three different output positions^[37]

构如图 20 所示,其中主放大级选用的增益光纤是 NA=0.075 的非保偏光纤,吸收系数约为 18 dB/m@976 nm,采取前向泵浦的方式,光子灯笼输出端(即主放大级输入端)功率约为 5 W。

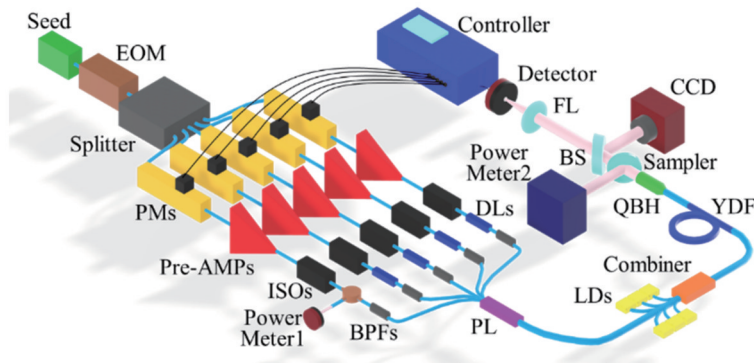


图 20 基于 5×1 光子灯笼的模式自适应控制与光纤激光放大器 TMI 抑制系统示意图^[39]

Fig. 20 Schematic diagram of mode adaptive control and fiber laser amplifier TMI suppression system based on 5×1 photonic lantern^[39]

为了确定放大器的固有 TMI 功率阈值,首先使用传统的种子源,随着放大器功率不断增大,对 TMI 发生前后输出光束的时频域特征进行测量和分析,结果

如图 21 所示:随着泵浦功率的提升(此时主放大级斜率效率约为 75%),当输出功率放大到 100 W 左右时,功率计监测到的输出功率开始不断起伏,满足标

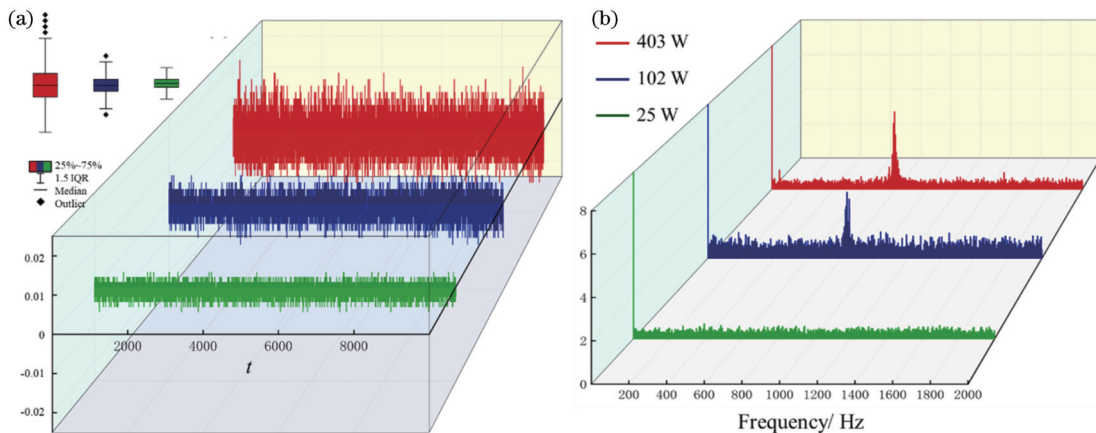


图 21 传统种子源掺镱光纤放大器输出光束随着功率放大时的时域和频谱变化情况^[39]。(a)时域变化;(b)频域变化

Fig. 21 Temporal and frequency variations when output beam amplifies with power in a conventional seed Ytterbium-doped fiber amplifier^[39]. (a) Temporal variation; (b) frequency variation

准差与平均功率的比值高于 $0.1\%_0/W$ 的 TMI 阈值条件^[40], 对应的傅里叶频谱上 800 Hz 附近开始出现特征峰, 此时放大器处于 TMI 的过渡态, 表明放大器的 TMI 阈值 $P_{thr} \approx 100\text{ W}$ 。当泵浦功率在此基础上进一步提升时, 时域信号振荡幅度进一步增大, 当输出功率超过 160 W 时, 功率信号的傅里叶频谱上不间断地呈现特征峰, 判断此时放大器已进入 TMI 的混沌态^[39]。

当使用基于光子灯笼的模式控制系统做种子源时, 掺镱光纤放大器的时域和频谱变化情况如图 22 所示, 其中绿色、蓝色、红色对应光子灯笼模式控制系统控制闭环条件下输出功率分别为 25、102、403 W 时的观测结果, 而紫色为模式控制系统控制开环时 403 W 测量点的观测结果^[39]。由图 22 左上角时域信号的箱形图

可见, 在控制闭环条件下, 即使输出功率高于固有 TMI 阈值 (P_{thr}), 甚至是 4 倍于 P_{thr} 时, 时域信号的分散度仍旧维持在与稳定态相同的水平, 只是随着功率升高, 会有个别异常值出现, 图 22(a) 直观地显示出了时域信号振荡幅度并没有随着输出功率的增加而明显加大; 同时, 图 22(b) 的傅里叶频谱图中也没有特征峰的出现。而在光子灯笼模式控制系统开环(控制算法关闭)情况下, 当输出功率高于放大器 TMI 阈值时, 时域信号的四分位距大幅度增大、异常值大幅度增多、振荡幅度大幅度增大; 且在傅里叶频谱上出现峰值较低的、宽度较大的特征峰(频率覆盖 0~600 Hz), 此时系统的输出光束呈现一种新的模式之间的能量耦合, 此时输出模式的不稳定不仅来自于增益光纤中的热效应, 同时也来自于开环状态下光子灯笼提供的不断变化的种子光场。

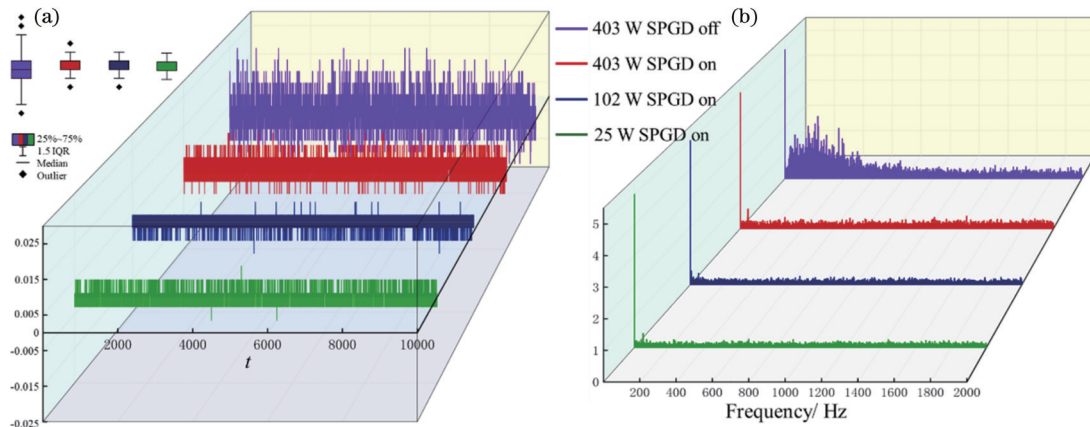


图 22 使用光子灯笼模式控制系统做种子源时掺镱光纤放大器的时域和频谱变化情况^[39]。(a) 时域变化; (b) 频域变化
Fig. 22 Temporal and frequency variations in photonic lantern mode control system-seeded Ytterbium-doped fiber amplifier^[39].
(a) Temporal variation; (b) frequency variation

图 23 给出了使用不同种子源, 放大器输出功率为 367 W 时, M^2 分析仪测得的光束质量对比。当使用传统种子源时, 由于 TMI 的发生, 输出光束的光束质量很差, M_x^2 、 M_y^2 分别为 2.646、2.503; 当使用光子灯笼模式控制系统做种子源时, 系统闭环条件下, 输出光束

的光束质量为: $M_x^2 = 1.762$, $M_y^2 = 1.567$ ^[39]。说明光子灯笼模式控制系统不仅极好地抑制了 TMI, 而且使得放大器输出光束的光束质量得到了显著提升, 满足了实际应用中, 对高功率、高亮度、大模场光纤激光输出的需求。

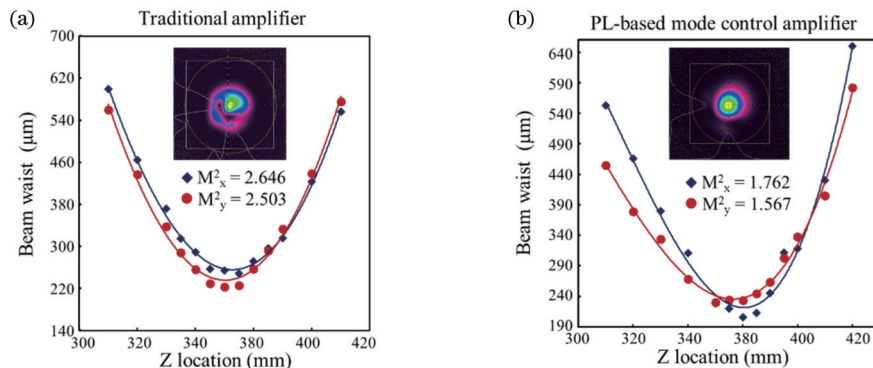


图 23 传统种子源放大器与光子灯笼模式控制种子源放大器高于 TMI 阈值输出时的 M^2 因子^[39]。(a) 传统种子源放大器; (b) 光子灯笼模式控制种子源放大器
Fig. 23 M^2 factors of conventional seed amplifier and photonic lantern mode control system-seeded amplifier when output is above TMI threshold^[39]. (a) Conventional seed amplifier; (b) photonic lantern mode control system-seeded amplifier

在实现对 TMI 抑制的基础上,试探性地验证光子灯笼模式控制系统让放大器实现对高阶模进行选择放大的能力。通过改变系统外光路中探测器位置,将整个放大器的控制目标从基模改变为高阶模,图 24 给出了输出功率为 150 W 时(超过放大器固有 TMI 阈

值),得到的三个稳定的高阶模输出。经模式分解,得到目标高阶模的模式含量均超过 0.8^[39],说明该系统能够较好地实现高阶模的选择性放大,该成果有望服务于激光加工等实际应用领域。

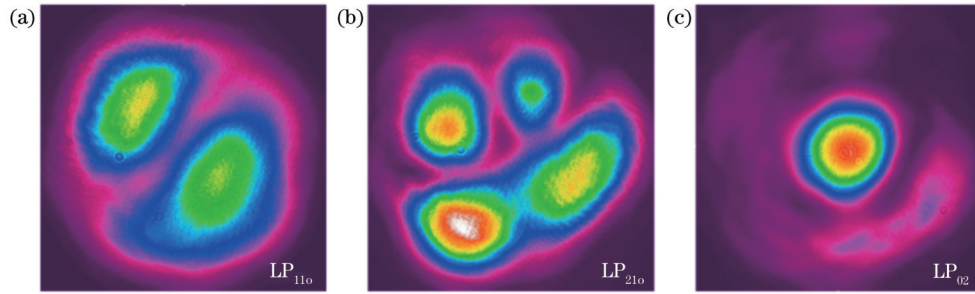


图 24 利用光子灯笼模式控制种子源放大器在 TMI 阈值以上实现稳定的高阶模输出^[39]。(a)LP₁₁₀模;(b)LP₂₁₀模;(c)LP₀₂模
Fig. 24 Achieving stable higher-order mode output above TMI threshold using photonic lantern mode control system-seeded amplifier^[39]. (a) LP₁₁₀ mode; (b) LP₂₁₀ mode; (c) LP₀₂ mode

4.4 基于光子灯笼的涡旋光束控制输出

由 2.5 节可知,利用光子灯笼可以产生携带轨道角动量的涡旋光束——OAM 模。图 25 给出了利用

5×1 光子灯笼产生 OAM 模的理想输入条件和输出效果^[41]。

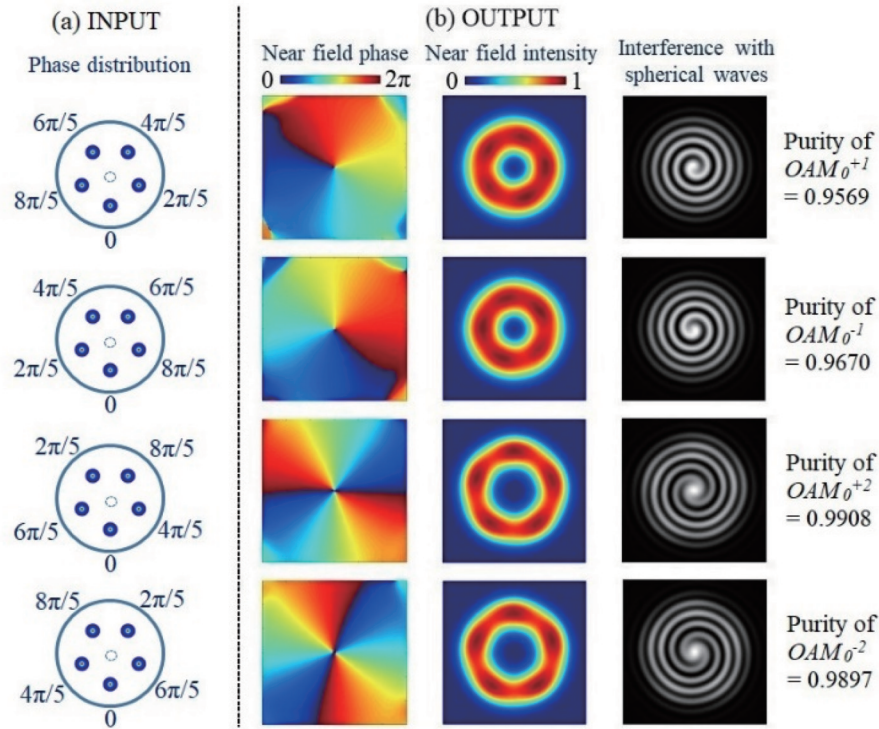


图 25 利用 5×1 光子灯笼产生 OAM 模的理想输入条件和输出效果^[41]。(a)输入条件;(b)输出效果
Fig. 25 Ideal input condition and output effect of OAM modes using 5×1 photonic lantern^[41]. (a) Input condition; (b) output effect

实验上应用 3×1 模式选择性光子灯笼,采用 SPGD 算法控制输入通道的相位,在 30/130 μm 光纤中获得了模式纯度为 0.98 的稳定 OAM₀¹模式输出,如图 26(a)所示。将 3×1 模式选择性光子灯笼的输出端与 42/250 μm 掺铒光纤激光放大器熔接,在模式自适应控制闭环条件下,实现了涡旋光束的功率, OAM₀¹模

光束的功率达到了 50 W,模式纯度为 0.96,如图 26(b)所示^[42]。

通过理论模拟,发现该系统不仅可以在一定程度上补偿大气湍流引发的波前畸变,而且可以生成具有不同拓扑电荷数的可切换 OAM 模式,为其在实际通信系统中的应用提供了很大的可能性。图 27 为基于

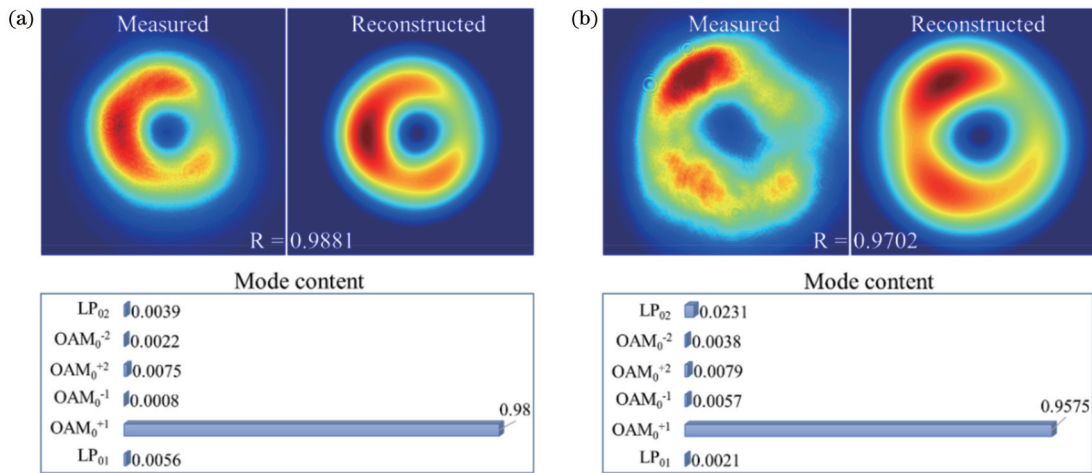


图 26 利用 3×1 模式选择性光子灯笼产生稳定 OAM_0^{-1} 模^[42]。(a) $30 \mu\text{m}$ 低功率输出; (b) $42 \mu\text{m}$ 高功率输出
 Fig. 26 Generation of stable OAM_0^{-1} mode based on 3×1 mode selective photonic lantern^[42]. (a) $30 \mu\text{m}$ low power output; (b) $42 \mu\text{m}$ high power output

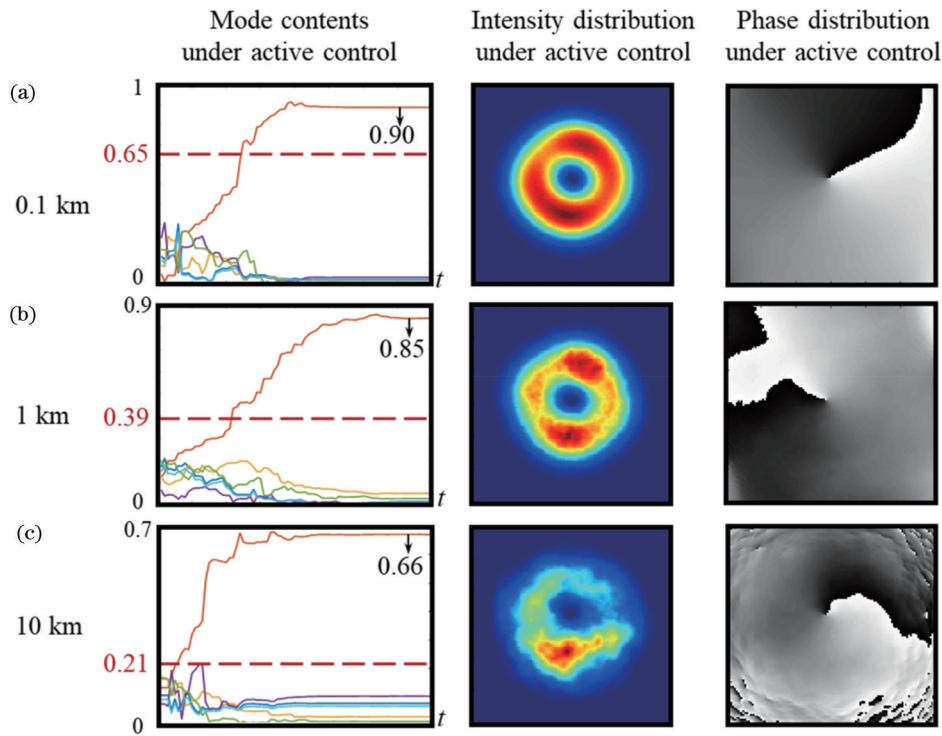


图 27 不同传输距离下基于光子灯笼模式自适应控制抑制外光路大气湍流造成的波前畸变^[39]。(a) 传输距离为 0.1 km ; (b) 传输距离为 1 km ; (c) 传输距离为 10 km

Fig. 27 Suppressing wavefront distortion caused by atmospheric turbulence in external optical path using photonic lantern mode adaptive control system under different transmission distances^[39]. (a) Transmission distance is 0.1 km ; (b) transmission distance is 1 km ; (c) transmission distance is 10 km

光子灯笼的模式自适应控制下涡旋光束在大气中传输的理论仿真结果,图中给出了弱大气湍流条件下,传输不同距离后,光子灯笼模式自适应控制系统得到的 OAM 模式畸变情况,其中虚线为系统中未包含主动相位控制模块时的 OAM 模式纯度情况。结果显示,通过内光路相位调制可以有效抑制外光路大气湍流造成的波前畸变。

5 结 论

通过理论模拟与实验的不断探索,对光子灯笼原设计与制备准则进行提升,增加了用于自适应空间模式控制的光子灯笼的两个关键设计准则:1)优化输入光纤排列以提高控制带宽;2)选择适当的输入光纤芯包比以扩大输出光纤的可选范围。按照上述设计要求制备

了性能优良的 $N \times 1$ 光子灯笼 ($N=3, 5, 6, 7, \dots$)。采用 SPGD 算法, 对输入相位进行主动调制, 在具有 $30/125 \mu\text{m}$ 输出光纤的新型 5×1 光子灯笼的输出端得到稳定的基模输出, 输出光束的 M^2 因子低于 1.2; 获得了携带 OAM 的模式 (OAM_0^1 或 OAM_0^2 模式) 和高阶线偏振模式 (LP_{11} 或 LP_{21} 模式), 相应的模式纯度超过 0.85。

基于光子灯笼的空间模式自适应控制系统, 在芯径为 $50 \mu\text{m}$ 的大模场光纤中, 实现了 $M^2 \sim 1.4$ 的稳定基模输出; 在纤芯直径为 $42 \mu\text{m}$ 的光纤放大器中实现了对模式不稳定效应的有效抑制, 为进一步提升大模场高亮度近衍射极限光纤激光的功率提供了可能的技术方案。

参 考 文 献

- [1] Leon-Saval S G, Birks T A, Bland-Hawthorn J, et al. Multimode fiber devices with single-mode performance[J]. Optics Letters, 2005, 30(19): 2545-2547.
- [2] Bland-Hawthorn J, Ellis S C, Leon-Saval S G, et al. A complex multi-notch astronomical filter to suppress the bright infrared sky[J]. Nature Communications, 2011, 2: 581.
- [3] Ryf R, Fontaine N K, Mestre M A, et al. 12×12 MIMO transmission over 130-km few-mode fiber[C]//Frontiers in Optics 2012/Laser Science XXVIII, October 14-18, 2012, Rochester, New York, United States. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2012: FW6C.4.
- [4] van Weerdenburg J, Velázquez-Benitez A, van Uden R, et al. 10 Spatial mode transmission using low differential mode delay 6-LP fiber using all-fiber photonic lanterns[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24759-24769.
- [5] Eznaveh Z S, Zacarias J C A, Lopez J E A, et al. Photonic lantern broadband orbital angular momentum mode multiplexer[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30042-30051.
- [6] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [7] Leon-Saval S G, Fontaine N K, Amezcua-Correa R. Photonic lantern as mode multiplexer for multimode optical communications[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35: 46-55.
- [8] Birks T A, Gris-Sánchez I, Yerolatsitis S, et al. The photonic lantern[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(2): 107.
- [9] Fischer J, Wegener M. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(1): 22-44.
- [10] Duocastella M, Arnold C B. Bessel and annular beams for materials processing[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(5): 607-621.
- [11] Fontaine N K, Ryf R, Bland-Hawthorn J, et al. Geometric requirements for photonic lanterns in space division multiplexing[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27123-27132.
- [12] 陈健, 黄青青, 张倩武, 等. 基于光子灯笼的正交频分/模分复用 IM-DDMMF 传输系统[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606008. Chen J, Huang Q Q, Zhang Q W, et al. Orthogonal frequency division/mode division multiplexing IM-DD multimode fiber transmission system based on photonic lanterns[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0606008.
- [13] 陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽. 基于光子灯笼的 3×3 模分复用通信实验系统[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106009. Chen J K, Hu G J, Han Y Y. Communication experimental system with 3×3 mode division multiplexing based on photonic lantern[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106009.
- [14] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- [15] Jansen F, Stutzki F, Otto H J, et al. Thermally induced waveguide changes in active fibers[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 3997-4008.
- [16] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [17] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [18] Wielandy S. Implications of higher-order mode content in large mode area fibers with good beam quality[J]. Optics Express, 2007, 15(23): 15402-15409.
- [19] Ma H T, Liu Z J, Xu X J, et al. Simultaneous adaptive control of dual deformable mirrors for full-field beam shaping with the improved stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Optics Letters, 2013, 38(3): 326-328.
- [20] Grosset-Grange C, Barnier J N, Chappuis C, et al. Design principle and first results obtained on the LMJ deformable mirror prototype[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6584: 658403.
- [21] Wittek S, Bustos Ramirez R, Alvarado Zacarias J, et al. Mode-selective amplification in a large mode area Yb-doped fiber using a photonic lantern[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2157-2160.
- [22] Velázquez-Benitez A M, Guerra-Santillán K Y, Caudillo-Viurquez R, et al. Optical trapping and micromanipulation with a photonic lantern-mode multiplexer[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1303-1306.
- [23] Zeng X L, Li Y, Feng L P, et al. All-fiber orbital angular momentum mode multiplexer based on a mode-selective photonic lantern and a mode polarization controller[J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4779-4782.
- [24] Montoya J, Aleshire C, Hwang C, et al. Photonic lantern adaptive spatial mode control in LMA fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3405-3413.
- [25] Montoya J, Hwang C, Martz D, et al. Photonic lantern kW-class fiber amplifier[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27543-27550.
- [26] Lu Y, Liu W G, Jiang Z F, et al. Mode evolution in photonic lanterns and requirements for achieving good beam quality and mode control[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10844: 108440K.
- [27] Leon-Saval S G, Argyros A, Bland-Hawthorn J. Photonic lanterns: a study of light propagation in multimode to single-mode converters[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 8430-8439.
- [28] Montoya J C, Belley C C, Reed P A, et al. High brightness photonic lantern kW-class amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 1051202.
- [29] Leon-Saval S G, Argyros A, Bland-Hawthorn J. Photonic lanterns[J]. Nanophotonics, 2013, 2(5/6): 429-440.
- [30] Bilodeau F, Hill K O, Faucher S, et al. Low-loss highly overcoupled fused couplers: fabrication and sensitivity to external pressure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 6(10): 1476-1482.
- [31] Birks T A, Mangan B J, Diez A, et al. "Photonic lantern" spectral filters in multi-core fibre[J]. Optics Express, 2012, 20(13): 13996-14008.
- [32] Lu Y, Liu W G, Chen Z L, et al. Spatial mode control based on photonic lanterns[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 41788-41797.
- [33] 杨欢, 陈子伦, 刘文广, 等. 光子灯笼研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120002. Yang H, Chen Z L, Liu W G, et al. Recent progress in photonic lantern[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120002.
- [34] Yerolatsitis S, Gris-Sánchez I, Birks T A. Adiabatically-tapered fiber mode multiplexers[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 608-617.
- [35] Thomson R R, Birks T A, Leon-Saval S G, et al. Ultrafast

- laser inscription of an integrated photonic lantern[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5698-5705.
- [36] Noordegraaf D, Skovgaard P M, Nielsen M D, et al. Efficient multi-mode to single-mode coupling in a photonic lantern[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1988-1994.
- [37] Lu Y, Chen Z L, Liu W G, et al. Stable single transverse mode excitation in 50 μm core fiber using a photonic-lantern-based adaptive control system[J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 22435-22441.
- [38] 陆瑶, 姜宗福, 刘文广, 等. 3×1 光子灯笼实现 30 μm 纤芯光纤激光模式控制[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1736001.
Lu Y, Jiang Z F, Liu W G, et al. Laser mode control in fiber with core diameter of 30 μm based on 3×1 photonic lantern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1736001.
- [39] 陆瑶. 基于光子灯笼的光束模式自适应控制研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2023.
Lu Y. Research on mode adaptive control based on photonic lantern[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2023.
- [40] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [41] Lu Y, Jiang Z F, Liu W G, et al. Orbital angular momentum mode generation system based on photonic lantern[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(12): 125702.
- [42] Lu Y, Jiang Z F, Chen Z L, et al. High-power orbital angular momentum beam generation using adaptive control system based on mode selective photonic lantern[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023: 1-8.

All-Fiber Spatial Mode Excitation and Adaptive Control Based on Photonic Lanterns

Jiang Zongfu^{1,2,3*}, Lu Yao^{1**}, Liu Wenguang^{1,2,3***}, Zhou Qiong^{1,2,3}, Jiang Man^{1,2,3},
Chen Zilun^{1,2,3}, Zhang Hanwei^{1,2,3}, Liu Pengfei^{1,2,3}, Zhang Jiangbin^{1,2,3}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²Nanku Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Significance The photonic lantern is a new type of photonic device that combines the advantages and characteristics of single-mode fiber and multi-mode fiber. It has important applications in the fields such as astronomical photonics, optical fiber communication mode division multiplexing, and optical fiber laser mode control.

Progress This review introduces the structure and mode evolution theory of photonic lanterns, fabrication technology, the mode adaptive control based on photonic lanterns, their application in high-power fiber laser amplifiers to suppress the transverse mode instability, and utilization in large mode area fiber to excite special structural beams (such as orbital angular momentum modes). Through theoretical simulations and experimental exploration, the original design and fabrication criteria of photonic lanterns are improved. Meanwhile, two key design criteria for mode adaptive control are added: 1) optimizing the input fiber arrangement to improve the control bandwidth; 2) selecting the appropriate input core cladding ratio to expand the optional range of the output fiber. According to the above design requirements, $N\times 1$ photonic lanterns with excellent performance are prepared ($N=3, 5, 6, 7, \dots$), as shown in Fig. 12. The phase of the input beams is actively modulated by the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm. The output beam of the optimized 3×1 photonic lantern with 30/125 μm output fiber is stable, and the M^2 factor is lower than 1.18 (Fig. 15). Orbital angular momentum modes (OAM₀¹ or OAM₀² modes) and higher-order linear polarization modes (LP₁₁ or LP₂₁ modes) are obtained, and the corresponding modes purities are more than 0.85, as shown in Figs. 16 and 26(a). The mode adaptive control system based on photonic lanterns achieves stable fundamental mode output with M^2 factor ~ 1.4 in large mode area fiber with a core diameter of 50 μm . By adopting photonic lanterns, the transverse mode instability is suppressed in a fiber amplifier with a core diameter of 42 μm (Figs. 22 and 23). Finally, a possible technical solution is provided for further increasing the power of near-diffraction-limit fiber lasers with large mode areas and high brightness.

Conclusions and Prospects The mode adaptive control system based on photonic lanterns can effectively suppress TMI in the 42 μm core fiber amplifier. The results of selective amplification of high-order mode and OAM beams achieved by this technique has a wide application prospect in the fields requiring high power special beams. Further research will be focused on the design and fabrication of the photonic lanterns with more channels and better performance, as well as increasing the modulated parameters of the adaptive control system such as polarization and intensity.

Key words fiber lasers; modes; photonic lanterns; adaptive optics