

## 光子灯笼研究进展

杨欢<sup>1,2,3</sup>, 陈子伦<sup>1,2,3</sup>, 刘文广<sup>1,2,3</sup>, 陈金宝<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410005;<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410005;<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410005

**摘要** 光子灯笼是近几年兴起的一种光电子器件,可实现多模系统与多个单模系统之间的低损耗耦合,其一端为一根满足特定模式条件的多模波导,另一端则由一束相对较细的单模波导组构成。主要分析了光子灯笼的工作原理和几种特定的实现方式,并对这几种特定结构的特点和应用进行了概述。介绍了光子灯笼在天文光学、多路复用、模式控制、高能激光方面的应用和研究进展,对光子灯笼作为一种低损耗光波导器件在未来光学系统中的应用进行了展望。

**关键词** 光学设计与制造;光子灯笼;模式控制;天体光子学;光纤激光器

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.120002

## Recent Progress in Photonic Lantern

Yang Huan<sup>1,2,3</sup>, Chen Zilun<sup>1,2,3</sup>, Liu Wenguang<sup>1,2,3</sup>, Chen Jinbao<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410005, China;<sup>2</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410005, China;<sup>3</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410005, China

**Abstract** The photonic lantern is an optoelectronic device emerging in recent years. It provides low-loss interfaces between single mode and multimode systems, with one side of the device being a multimode waveguide satisfying special designs, and the other side being a bunch of single mode waveguide. The theory and several typical structures are analyzed, and their characteristics and applications are summarized. The applications and research progress of the photonic lantern in astrophotonics, multiplexing, mode control, and high power laser are introduced, and its applications as a low-loss optical waveguide device in future optical systems is forecasted.

**Key words** optical design and fabrication; photonic lantern; mode control; astrophotonics; fiber laser

**OCIS codes** 220.2740; 060.2430; 220.4298; 220.4610

## 1 引言

天文光学是位于天文学和光学交界处的交叉学科,距今已有 400 多年的历史。天文光学相关器件在世界范围内的各个研究院所、诸多应用方向都得到了广泛的应用和发展。为满足天文探测仪器日益增长的性能需求,这一领域开发设计了多种器件,其中之一就是光子灯笼(PL)<sup>[1-2]</sup>。

光子灯笼是为了解决天文观测中的实际应用问题而开发的器件。由于羟基散射,当一个地基天文

望远镜对波长范围 600~1800 nm 进行天文观测时会受到这一波段的羟基散射光影响,过滤这些散射光谱能够极大地增强红外探测能力。巴斯大学 Leon-Saval 等<sup>[3]</sup>在 2005 年首次提出可将基于光纤布拉格光栅的单模光纤器件与多模光纤耦合,以滤除这些散射的红外光。这一设计在六年后由悉尼大学 Blandhawthorn 团队实现<sup>[4]</sup>,实验证明,通过在两个光子灯笼之间相同的七根单模光纤上刻写光纤光栅进行滤波,能够观测到更暗的夜空背景并有效滤除这一波段的羟基散射。光子灯笼也被用于激光通

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-29; 录用日期: 2018-06-13

\* E-mail: kdchenjinbao@aliyun.com

信,可以将多个单模(SM)光纤中传输的信息低损耗地耦合到一根少模或者多模(MM)光纤之中,在光谱分析等领域拥有广阔的潜在应用。由于光子灯笼能够在多模光纤和多个分离的单模光纤之间实现低损耗传输,保证了单模技术在多模系统中的应用,随着研究的推进,光子灯笼有望在大功率激光系统的模式控制中实现重要应用。

## 2 光子灯笼原理

光子灯笼是一种连接单个多模波导与多个单模波导的低损耗器件,一般通过低折玻璃管约束多根单模光纤熔融拉锥制作。在这种结构中,光子灯笼的一端是一根满足特定模式条件的多模光纤,另一端则是数根单模光纤。因光纤光子灯笼器件结构与灯笼相近,故称之为光子灯笼,如图 1 所示。光纤光子灯笼中的模式演变过程可以将沿光子灯笼过渡锥区的模态电磁传播特性与量子力学中的 Kronig-Penney 模型进行类比来解释<sup>[5]</sup>。假设该过程中光从多个单模端输入,由多模端输出,如图 2(d)所示。

空间模式由其传播常数  $\beta = Kn_{\text{eff}}$  ( $K$  为波数,  $n_{\text{eff}}$  为模的有效折射率)和横波矢量  $\mathbf{K}_T$  决定,在类比过程中,电磁波(EM) $\mathbf{K}_T$  和量子力学中的能量  $E$  (QM)在性质上表现相同,如图 2(a)和图 2(b)所示。由此,可以通过比较量子阱内电子驻波解的能量变化与波导空间模式变化来解释光子灯笼过渡锥

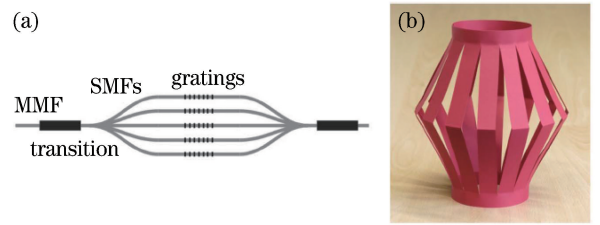


图 1 (a)最初的 MM-SM-MM 光子灯笼对示意图 (光栅为附带结构)<sup>[3]</sup>; (b)简易纸灯笼<sup>[6]</sup>

Fig. 1 (a) Schematic of an original MM-SM-MM lantern pair (the gratings are incidental)<sup>[3]</sup>; (b) photograph of a simple paper lantern<sup>[6]</sup>

区的模式变化。

为了能使光子灯笼的折射率分布与一维 Kronig-Penney 模型中的电势  $V$  以相同的方式表示,在垂直轴中折射率使用  $1/n$ 。选择适当的折射率  $n$  分布,光纤纤芯可以设计成仅有一个空间模式(一个基模)形态。其中,模式的电场集中在高折射率区域,故具有最高的有效折射率( $n_{\text{eff}}$ )和最大的传播常数  $\beta$ ,具有最小的横向波矢量  $\mathbf{K}_T$ [图 2(a)]。在量子力学中,孤立势阱只允许电子波函数的离散能量通过,电子波函数采取驻波的形式。通过选用合适的电势和几何形状可将势阱设计为仅允许一个离散的能级(基态)。独立势阱的驻波解能量( $E$ )最低,其幅度通常集中在低电势( $V$ )区域。因此,势阱的基态与波导的基模类似。

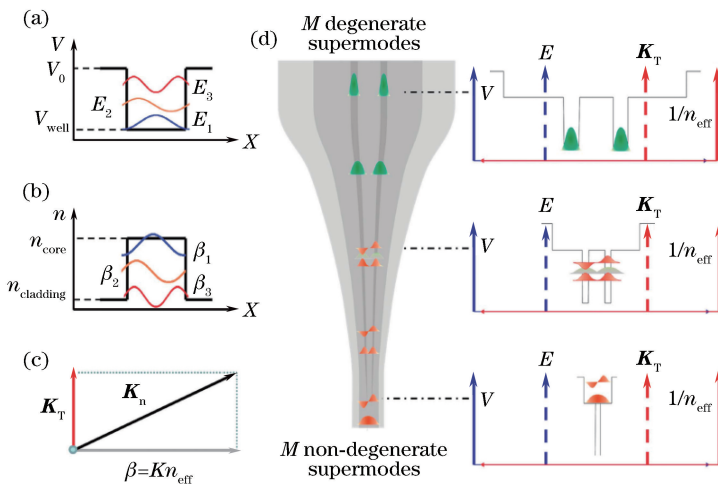


图 2 (a)一维量子阱和(b)一维波导的传播模式,说明光纤( $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ )和量子理论中的量子阱( $E_1, E_2, E_3$ )可以进行类比; (c)横向分量  $\mathbf{K}_T$  和传播常数  $\beta$  构成的  $\mathbf{K}_n$  波矢由有效折射率决定; (d)一个光子灯笼从  $M$  个单模端口(顶部)输入光束<sup>[4-5]</sup>

Fig. 2 Schematics of (a) a one-dimensional quantum well and (b) a one-dimensional waveguide illustrating the close analogy between the propagating modes in an optical fibre ( $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ) and the energy levels of a quantum well ( $E_1, E_2, E_3$ ); (c)  $\mathbf{K}_n$  wavevector made up of a transverse component  $\mathbf{K}_T$  and a mode propagation constant  $\beta$  is defined in terms of the effective refractive index seen by the mode; (d) a photonic lantern taper starting at the input bundle of  $M$  single-mode fibers (top)<sup>[4-5]</sup>

在量子(模式)转换开始时(图2),每个量子阱只允许处于其最低能态(基模)的一个电子(模式)。转化区域表征为量子阱逐渐变窄(锥区变细),使得单个电子开始穿过其量子阱(模式由单模向多模过渡),并且逐渐变为多个状态。在锥形结束的区域,这些量子阱靠得更近时,阱基本消失,这些电子进入一个更宽的量子阱(图2,低折玻璃套管此时等效为新的包层)。

通过熵增定律可知,在自然界中一个孤立系统的总混乱度(熵)是不会减小的,据此比较光子灯笼系统在不同分段的模式数。为了简化分析,假设多模纤芯的各个模式沿着单模纤芯阵列的不同超模过渡演变,反之亦然。在任何情况下,如果光在输入系统(多模纤芯或单模纤芯阵列)的模式数量  $N_{in}$  不可预测或呈不相干分布,为了降低器件损耗,由热力学第二定律可得,光子灯笼不同分段的模式数目需要满足

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

式中:  $N_{out}$  为输出端口的模式数,  $N_{in}$  为输入端口的模式数。否则,光子灯笼输入与输出端的模式数量不匹配<sup>[5]</sup>,会增加光子灯笼的传输损耗。为便于设计,减小在任意波导条件下的模式数失配损耗,在多模波导作为输入端、一束单模波导作为输出端时,光子灯笼两侧的端口数目需要满足  $N_m \leq N_{sm}$ , 其中  $N_m$  为多模端模式数,  $N_{sm}$  为单模端的端口数,此时,光可以实现从多模端口向多个单模端的低损耗耦合。类似地,当多个单模波导作为输入端、多模波导作为输出端时,需要满足  $N_m \geq N_{sm}$ 。相比于完全匹配光子灯笼单模端与多模端的模式数,该方法更容易实现,并且在单模波导保持单模式传输的前提下,能够保证在任意的波长范围内不存在模式数目不匹配损失( $N_{out} \geq N_{in}$ ),如图3所示。系统中输出端的模式容量大于输入端,即使传输模式存在小的扰动也能保证不引入太大的对称性损耗。然而在热力学中,这种设计的传输方向不可逆,即这种设计的光子灯笼只在一个方向上低损耗<sup>[5]</sup>。

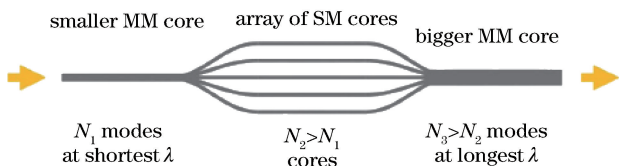


图3 背靠背耦合的两个光子灯笼,输出端的模式容量大于输入端<sup>[6]</sup>

Fig. 3 In an back-to-back lantern pair, each section supports more modes than the previous one<sup>[6]</sup>

模式数量不匹配是造成光子灯笼损耗的根本原因。理想条件下,若传输过程中光子灯笼能包含的所有模式都被同等激发,光子灯笼模式匹配损耗  $L$  的理论值可由光子灯笼两侧端口数  $N_{in}$ 、 $N_{out}$  表示<sup>[3]</sup>:

$$L = \left| 10 \lg \frac{N_{out}}{N_{in}} \right| \text{ [dB]}. \quad (2)$$

当一组不可预测或激励不一致的输入模式可以可逆映射到一组输出模式上时,模式数匹配是必要条件。光子灯笼的单模端口模式数量可以通过控制单模波导的数目进行调整,但多模端的模式数与  $V$  值相关。在多模纤芯折射率为  $n_1$ 、包层折射率为  $n_2$ 、直径为  $d$  的圆形阶跃折射率光纤中,光在波长  $\lambda$  处的模式数量  $N$  由  $V$  值决定:

$$V = \frac{\pi d \cdot NA}{\lambda}, \quad (3)$$

式中:  $NA$  为数值孔径,表示折射率的变化程度,  $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 。

由于  $V$  值由贝塞尔函数的零点定义,模式数量  $N$  与  $V$  之间的关系复杂,且  $N(V)$  随  $V$  非线性递增,一般情况下采用渐进表达式:

$$N \sim \frac{V^2}{4}. \quad (4)$$

(4)式并未计算空间模的两个极化态,当计算两个极化态时,

$$N \sim \frac{V^2}{2}. \quad (5)$$

将(3)式代入(4)式中可得拉锥制作光子灯笼多模端口模式数  $N_m$  的近似表达式为

$$N_m \approx \left( \frac{\pi d \cdot NA}{2\lambda} \right)^2. \quad (6)$$

由(6)式可知,光子灯笼多模端口的模式数  $N_m$  与直径  $d$ 、波长  $\lambda$ 、数值孔径  $NA$  相关,联立(2)式可以得到光子灯笼的损耗与  $N_m$  的对数绝对值线性相关。

为定量研究光子灯笼锥形区域中的模式演化过程,Sergio等<sup>[5]</sup>以Noordegraaf团队<sup>[7]</sup>描述的全光纤  $7 \times 1$  光子灯笼为蓝本进行了模拟。光源波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ,在过渡区域的较厚端,将7根包层直径  $80 \mu\text{m}$ 、纤芯直径  $d = 6.5 \mu\text{m}$ 、纤芯折射率  $n_{co} = 1.45397$ 、单模光纤包层折射率  $n_{cl} = 1.4440$  的单模纤芯,嵌入内径  $224 \mu\text{m}$ 、外径  $437 \mu\text{m}$  的二氧化硅 ( $n = 1.4431$ ) 玻璃套管,如图4所示。从模拟结果中可以看到,为了正好容纳7个模式,最终套管外径需要拉锥到  $90 \mu\text{m}$ ,此时光子灯笼过渡转换区域

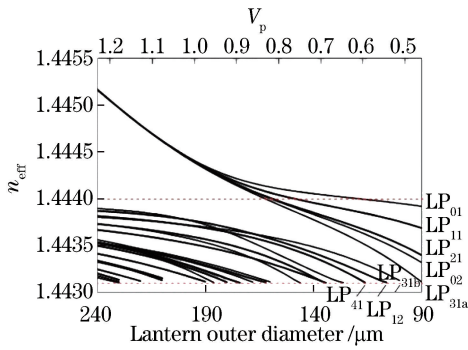


图4 光子灯笼锥区的模式演变过程:14个纤芯模式在大纤径处简并,但在小纤径处非简并,并在演变过程结束时覆盖多模纤芯中可用的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  范围。红色水平虚线表示最终多模端的纤芯和包层折射率( $n_{\text{co}}=1.4440, n_{\text{cl}}=1.4431$ )<sup>[5]</sup>

Fig. 4 Evolution of modes throughout the tapered transition of the photonic lantern. The 14 core modes are degenerate at large diameters but become non-degenerate at smaller diameters and fill the range of effective refractive index  $n_{\text{eff}}$  available in the multimode core at the end of the transition. The red horizontal dashed lines indicate the core and cladding indices of the final multimode core ( $n_{\text{co}}=1.4440, n_{\text{cl}}=1.4431$ )<sup>[5]</sup>

(90  $\mu\text{m}$ )能容纳7个LP模:LP<sub>01</sub>,LP<sub>11a</sub>,LP<sub>11b</sub>,LP<sub>21a</sub>,LP<sub>21b</sub>,LP<sub>02</sub>,LP<sub>31a</sub>。由于7×1的光子灯笼尺寸相对小于7×1合束器,可以看到光子灯笼的模式数匹配需求对多模端口的直径尺寸提出了很高的要求。

在设计方面,光子灯笼的单模端一般为若干根单模光纤。光子灯笼的单模端口模式数量固定,仅与单模波导的数目有关,其多模端的模式数受V值影响,可以通过选择特定的多模波导尺寸以及选择适当波长的光源减小传播损耗,但这种设计仍存在对称性损耗<sup>[8]</sup>。

### 3 光子灯笼的排布优化

为减小对称性损耗,优化光子灯笼器件性能参数,Fontaine等<sup>[9]</sup>将光子灯笼作为空分多路复用(SDM)系统的绝热模式转换器件,把多个单模光纤连接到多模光纤。使用模态分析、光束传播法和传输矩阵法分析光子灯笼的输入输出与模式相关损耗,结果表明只有通过优化单模光纤核心排布才能实现单模光纤和多模光纤之间的单一耦合。模拟优化排布的光子灯笼与非优化排布的光纤光子灯笼并进行对比,图5所示为一个双包层光纤的本征模式以及 $N=15$ 时两种不同纤芯排布下的超模。在第

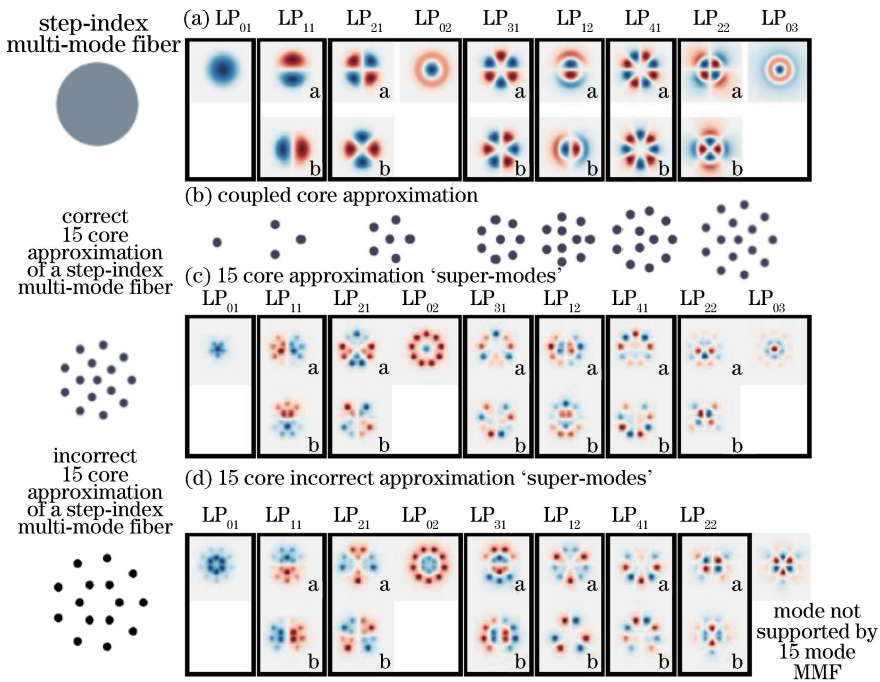


图5 (a)圆形光纤纤芯的15个最低阶模式的计算模式;(b)光子灯笼单模端纤芯的优化排布;(c)优化排布的单模纤芯阵列的超模;(d)选择性较差的排布的单模纤芯超模<sup>[9]</sup>

Fig. 5 (a) Spatial modes of the 15 lowest order modes in the step index fiber core; (b) coupled waveguide arrays whose super-modes closely match the fiber modes; (c) 15 lowest order modes of nearly optimal 15 core arrangement; (d) 15 lowest order modes of an incorrect 15 core arrangement<sup>[9]</sup>

一种情况下,每个超模在多模纤芯的 15 个最低阶模式之间没有对称性损耗。在另一种情况下,第 15 种模式不受多模光纤的引导,存在 0.3 dB 的损耗。优化排布的方式如下:当单模光纤数目为特定值时,在一根多模光纤允许的所有模式中,角向模最大值为  $m$ ,径向模最大值为  $n$  时,多根单模光纤按照以下方法进行排布:1)分为  $n$  个圆环排列;2)在最外层圆环上排列  $2m+1$  根光纤。

图 5(a)所示为 15 个最低阶 LP 模式,每个方框表示截止频率相同的模式。通过展示 LP 模的 15 个低阶模式,可得最合适的空间模式数分别为 3, 6, 8, 10, 12, 15 个。模拟结果显示,在优化排布光子灯笼的单模端口选择性地输入基模可以得到特定的高阶模式。与优化排布相比,传统排布容易产生少量耦合损耗和无限的模式依赖损耗(模式丢失)。但是,当端口增加时,可以得到更多的模式,也会得到更大的容量。由于允许通过更多模式,单模波导排布不当的影响在一定程度上也能忽略。所以目前通过结构优化减小光子灯笼损耗有两个方向:1)在特定单模端口数量下进行优化排布;2)增加单模端口数量。

## 4 光子灯笼的结构

在光子灯笼的制作过程中需要将多根单模波导接入一根多模波导,并保证它们之间的绝热波导过渡,或者说需要单模端与多模端之间的平缓锥区足够长、锥角足够小,以此保证光子灯笼器件的低损耗特性。

光子灯笼的分类目前有多种说法<sup>[6,8]</sup>。从结构上讲,光子灯笼主要有三种类型。其中,两种使用光纤结构[图 6(a)和图 6(b)];另外一种则通过激光雕刻技术在玻璃基底上雕刻制作[图 6(c)]。使用光纤结构的光子灯笼可以发展为全玻璃结构的器件:第一种是通过低折套管(或者玻璃管)对单模光纤进行拉锥制作;第二种光纤结构的光子灯笼是在第一种制作方法的基础上使用多纤芯光纤(MCF)替代单模光纤。

### 4.1 套管拉锥光子灯笼

第一个光子灯笼是 Leon-Saval 团队于 2005 年在他们提出的光子灯笼概念基础上由 19 根单模光纤与一根多模光纤制作的转换器件<sup>[3]</sup>。通过使用多孔套圈作为多单模端的包层结构对 19 根单模光纤进行拉锥制作光子灯笼,如图 7 所示。

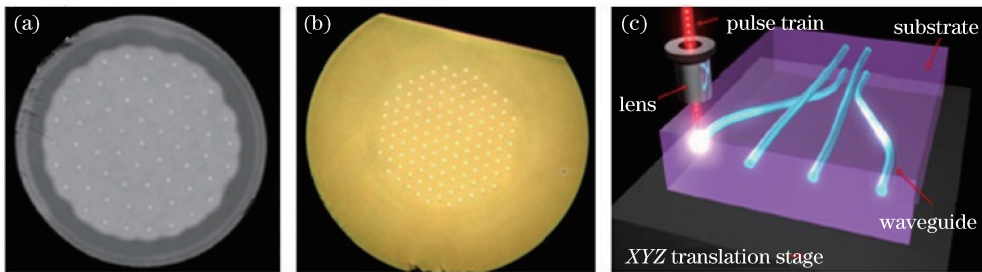


图 6 (a)使用 61 根单模光纤拉锥套低折玻璃管制作的 61 端口光子灯笼截面<sup>[10]</sup>; (b)使用多纤芯光纤制作的光子灯笼截面<sup>[11]</sup>; (c)超快激光雕刻玻璃基底形成波导结构制作集成光子灯笼<sup>[6]</sup>

Fig. 6 (a) Cross section of the 61-port photonic lantern fabricated by 61 tapered single-mode fibers and capillary tube<sup>[10]</sup>; (b) optical micrograph of the multi-core fiber fabricated photonic lantern<sup>[11]</sup>; (c) inscription of an integrated-optic waveguide using a focused femtosecond laser beam<sup>[6]</sup>

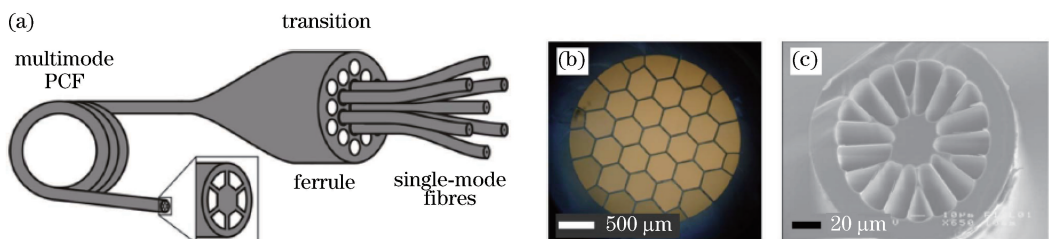


图 7 (a)通过制作一个填满单模光纤的多孔套圈进行多模光纤到单模光纤的过渡; (b)多孔套圈的光学显微图(包层厚度约 260 nm); (c)在套圈中心 19 个孔各自填充单模光纤之后,拉锥制作的多模光子晶体光纤(PCF)截面显微图<sup>[3]</sup>

Fig. 7 (a) Schematic of the first photonic lantern, which has a ferrule to realize the transition from a multi-mode fiber to single-mode fibers; (b) optical micrograph of the silica cane with 19 holes (cladding is about 260 nm thick); (c) scanning electron micrograph of the multimode PCF drawn from the filled ferrule<sup>[3]</sup>

多孔套圈制作的光子灯笼端口受到多孔套圈的限制,制约了光子灯笼的结构发展。2009年,丹麦技术大学 Noordegraaf 团队提出并制作了首个全玻璃结构的光子灯笼,如图 8 所示<sup>[7]</sup>。将一束 7 根 SM 光纤嵌入低折射率玻璃细管中,然后将填充单模光纤的细玻璃套管熔融拉锥逐渐减小外径成为实心玻璃元件<sup>[7]</sup>。此时,在锥形区域的较细一端,光纤结构的光子灯笼锥形区域将成为由熔融单模光纤形成的纤芯和低折射率玻璃细管作为包层的多模波导。该方法制作的光子灯笼多模部分不是通过多孔套管方式制作而是仅通过不同折射率的玻璃限制。全玻璃结构的光子灯笼器件制造简单,并具有良好的反向特性。该团队通过套低折玻璃管制造的 7 端口光子灯笼在多模到单模渐变过渡区域耦合损耗仅为 0.32 dB,从单模到多模的平均耦合损耗为 0.24 dB。

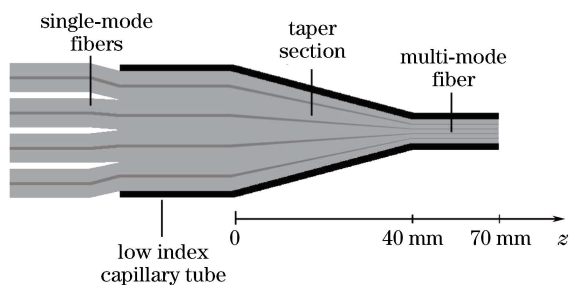


图 8 套玻璃管法制作的光子灯笼<sup>[7]</sup>

Fig. 8 Photonic lantern fabricated by the application of low index capillary tube technique<sup>[7]</sup>

该方法制作的光子灯笼结构不再受限于多孔套管,证明了光子灯笼技术的可行性。同时验证了光子灯笼的损耗原理:该器件有 7 个单模端口,意味着在光子灯笼的多模—单模转换过程中只有 7 个最低阶模式可以耦合到单模光纤。假设多模光纤的所有 13 种模式都被激发,并且每种模式都等效耦合,那么损耗为  $7/13 \approx 3$  dB<sup>[3]</sup>,与实验结果相差较大。所以此时只激发 7 个最低阶的模式,损耗显著减小。利用光子灯笼的反向特性可以确保激发正确数量的模式,方法是将两个器件进行背对背耦合,使用来自一个光子灯笼的多模输出耦合到另一个灯笼的多模端。

实验证明,光子灯笼可以在多模光纤和多根单模光纤之间实现高效、可逆的耦合。同时, Noordegraaf 等<sup>[7]</sup>还指出在将空间非相干光耦合到多模光纤中并分成多束单模光纤的实际应用中存在的困难:1) 输入多模光纤端口的激发模式数量少于或等于单模光纤的数量(可通过确保耦合器件数值孔径足够小来实现);2) 为使多模光纤具有较高的

整体耦合效率,单模光纤的数量必须足够大。

多根单模纤芯上套玻璃管进行拉锥制作、拥有天文光学应用潜力的 7 单模端口、19 单模端口、61 单模端口的传统合束器排布的光子灯笼系统先后实现<sup>[4,10,12]</sup>。对 7 根刻写了光纤布拉格光栅的单模光纤套玻璃管拉锥制作的光子灯笼亮红外天文滤光系统进行测试,在进入光谱仪之前过滤羟基散射,观测到了更暗的夜空<sup>[4]</sup>。通过从多模纤芯直径到多端口的单模光纤束并传输到另一个相同尺寸的多模纤芯系统,测试 61 端口[图 6(a)]、19 端口光子灯笼结构的多模—单模—多模转换,系统损耗低至 0.76 dB(61 端口)和 1.1 dB(19 端口)。在天体光学系统中,使用光子灯笼将观测到的多模星光耦合到单模光纤束证明了基于光纤布拉格光栅光谱滤波的可行性。同时,光子灯笼在天体光子学领域的应用具有先天优势。通过光子灯笼,天文光学观测系统不需要将分光器直接安装在望远镜焦平面。相比于传统排布方式,优化排布方式的光子灯笼可以实现单模端模式与多模端多个模式之间的单一耦合<sup>[9]</sup>,可以进行模式选择,进一步应用于高功率光纤激光器件中的动态空间模式控制。

优化排布光子灯笼单模端口制作的模式选择光子灯笼,可对通过器件的特定数量的基模进行选择放大。这种光子灯笼最大的特点在于为了让每个单模端口允许通过一个特定基模,其单模端口参数并不统一。光子灯笼的单模端与多模端的模式之间并不需要严格的一一对应关系<sup>[6]</sup>。但若存在这种对应关系且满足特定条件,光子灯笼在保证低损耗的同时可以进行模式选择,称为模式选择光子灯笼<sup>[14]</sup>。目前,3 端口(图 9)、6 端口的模式选择光子灯笼已经通过带掺杂光纤结构,在保证低损耗、高模式保真度的同时控制抽运光模态含量,实现 3 基模、6 基模的选择性空间模式放大<sup>[13,15-16]</sup>,得到放大至几瓦特的输出功率。随着端口数的增加,模式选择光子灯笼器件的制作难度也随之提高。目前已经实现了 10 空间模式优化排布的低损耗全光纤光子灯



图 9 3 端口模式选择光子灯笼<sup>[13]</sup>

Fig. 9 3-port mode selective photonic lantern<sup>[13]</sup>

笼器件<sup>[17]</sup>,使用  $20 \times 20$  多通道输入多通道输出 (MIMO) 数字信号处理解析空间通道,提高了系统的空分复用程度,验证了将单纤芯多模系统传输性能提高多倍的可行性。

此外,通过制作优化排布的 10 模式光子灯笼<sup>[18]</sup>,使用扫描波长干涉 (SWI) 研究该光子灯笼锥区的模式耦合及模式演化过程,证明优化排布的全光纤光子灯笼技术可以进一步应用于多路模式复用的过程分析。多路复用方面,基于 6, 10, 15 端口的全光纤光子灯笼信号传输器件已经实现并进行了测试<sup>[17, 19-20]</sup>,得到了  $12 \times 12$ ,  $20 \times 20$ ,  $30 \times 30$  的 MIMO 信号传输系统。这种基于全光纤设计的光子灯笼系统拓展了多路复用应用潜力。

通过增加端口可以进一步提升光子灯笼的性能,但是,随着光子灯笼单模光纤端口数量的增加,光子灯笼外径不可避免地增加。为保证实现锥区锥角绝热过渡,必须保证相应的锥区长度<sup>[21]</sup>,这也给制作带来了一定的困难。可以在设计上简化多端口情况下的光子灯笼器件结构。对比类似参数的阶跃折射率光子灯笼和渐变折射率光子灯笼发现,在 6 端口优化排布结构的全光纤光子灯笼中使用渐变折射率光纤可以减小光子灯笼绝热锥区过渡部分的长度<sup>[22]</sup>。

#### 4.2 多纤芯光纤光子灯笼

第二种光子灯笼是由多纤芯光纤发展而来的。提升光子灯笼性能最直接的方法就是增加光子灯笼的端口,但是单模端光纤端口数量的增加将不可避免地增大光子灯笼的整体尺寸。基于多纤芯光纤制作的光子灯笼结构由 Birks 等<sup>[11]</sup>于 2012 年提出,该结构能够在增加光子灯笼端口数的同时有效保证光子灯笼结构紧凑性。通过使用低折射率玻璃套管拉锥的多纤芯光纤连接多模光纤端口[图 6(b)],制作了能够应用于天文光学的结构紧凑型多模光子灯笼滤波器。

除了对单根多纤芯光纤进行拉锥制作光子灯笼外,还可以用多根多纤芯光纤来代替单模光纤套管拉锥制作光子灯笼,进一步增加光子灯笼的端口数目<sup>[23]</sup>,其中多纤芯光纤可以设计成具有模式选择功能的排布。图 10 中多纤芯光子灯笼器件能选择性激发 7 根多纤芯光纤中的  $LP_{01}$ ,  $LP_{11a}$ ,  $LP_{11b}$  模式,从而产生 21 个空间模式通道,光纤核心区至芯线串扰低于 38 dB,插入损耗低于 0.4 dB。同时验证了多纤芯多路复用器可扩展到更大数量的纤芯端口和纤芯模式的可行性,并且可以与超高带宽少模多纤芯光纤通信系统实现集成。

目前由 7 根多纤芯光纤制作的光子灯笼最多允

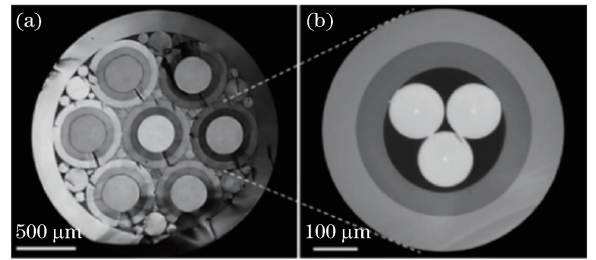


图 10 (a)多纤芯光纤制作的光子灯笼横截面显微图像,由 7 个外径为 2 mm 的掺氟套管组成六边形阵列;(b)内径为  $275 \mu\text{m}$  的一根掺氟细管的横截面图,由 3 种渐变折射率纤维填充,两种不同纤芯尺寸为  $13 \mu\text{m}$  和  $11 \mu\text{m}$ ,分别用于选择性激发  $LP_{01}$ ,  $LP_{11a}$ ,  $LP_{11b}$  模式<sup>[23]</sup>

Fig. 10 (a) Microscopic image of the cross section of the photonic lantern consisting of 7 fluorine-doped tubes in a hexagonal array with an outer diameter of 2 mm; (b) cross section image of one fluorine-doped capillary with an internal diameter of  $275 \mu\text{m}$ , filled with 3 graded-index fibers of two different core sizes of  $13 \mu\text{m}$  and  $11 \mu\text{m}$  and designed to selectively excite  $LP_{01}$ ,  $LP_{11a}$  and  $LP_{11b}$  modes<sup>[23]</sup>

许激发 511 个模式<sup>[24]</sup>。多纤芯光纤不同的纤芯直径增强了超模的相位和幅度扰频,从而抑制模式噪声,允许在很宽的波长范围内进行低损耗耦合。可以看到这两种光子灯笼[图 10(a)和图 11(b)]为了减小损耗对单模光纤间空隙进行了填充。

#### 4.3 集成光子灯笼

为了减小单模端口之间的空隙对光子灯笼器件性能的影响,2011 年,Thomson 等<sup>[25]</sup>首次提出并使用超快激光刻写制造三维集成的光学转换器件[图 6(c)和图 12],将多模波导光高效耦合到单模波导二维阵列制作集成光子灯笼,实现了多模模式与非简并单模模式之间的有效耦合。可在一块玻璃基底上使用激光雕刻制作的光子灯笼进行多模输入,在单个芯片上结合散射、模式操作和检测等功能,消除了元件之间的耦合损耗,降低制作成本并提高器件稳定性。虽然第一个集成光子灯笼器件在  $1539 \text{ nm}$  波长的平均插入损耗为 5.7 dB,但考虑到其模式耦合损耗只有 0.7 dB,如果后续研究能够使输入耦合损耗为零,这种装置将进一步应用于天体光子学和遥感。集成光子灯笼的制作方法为:在  $1550 \text{ nm}$  处折射率  $n$  约为 1.49 的硼硅酸玻璃基底上进行集成光子灯笼制作,使用由 IMRA 提供的主振荡功率放大器光纤激光系统产生的超短脉冲内部雕刻光子灯笼结构。

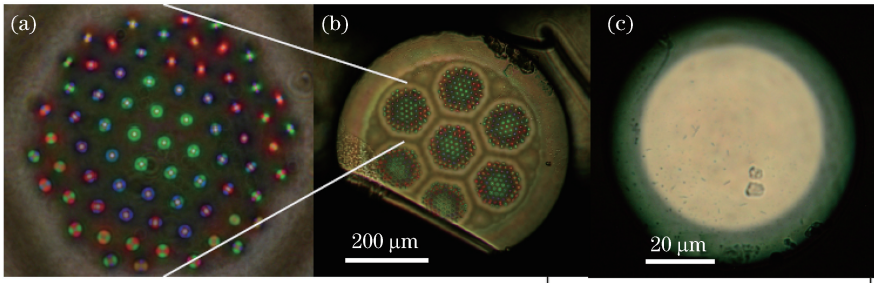


图 11 (a)显示 73 纤芯细节的 MCF 显微图;(b)511 纤芯的 MCF 光子灯笼;(c)拉锥 MCF 制作的光子灯笼多模端口<sup>[24]</sup>  
Fig. 11 (a) Micrograph showing details of the 73-core MCF; (b) entire photonic lantern with 511-core MCF;  
(c) multi-mode port of a photonic lantern made by tapering the MCF<sup>[24]</sup>

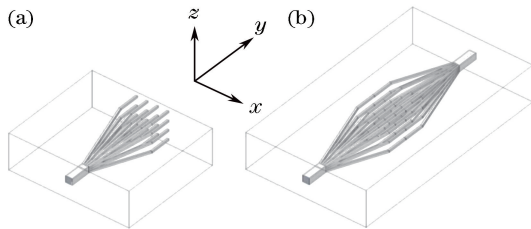


图 12 (a) MM-SM 集成光子灯笼结构;(b)背靠背结构的 MM-SM-MM 光子灯笼<sup>[25]</sup>

Fig. 12 (a) Sketch of a MM-SM integrated photonic lantern; (b) sketch of a back-to-back MM-SM-MM integrated photonic lantern<sup>[25]</sup>

2013 年澳大利亚麦格理大学的团队制作了 19 端口的集成光子灯笼,该器件的耦合和传输损耗均低于 5%<sup>[26]</sup>。三年后,该团队使用激光雕刻制作了第一组优化排布的 6 模式的模式选择集成光子灯笼<sup>[27]</sup>。集成光子灯笼在主体结构以及制作方法上与前两种在全光纤基础上制作的光子灯笼器件有较大区别,消除了单模端口间空隙的影响,并提高了结构强度。

## 5 光子灯笼的应用

制作光子灯笼的初衷是希望提供一个多模光纤与单模光纤波导之间的低损耗端口,并通过在单模光纤上进行光纤布拉格光栅的刻写实现滤光功能<sup>[3, 6]</sup>。光子灯笼作为一种新型低损耗模式复用/解复用光纤器件可以广泛应用于天文光学和空间光学。作为一种特殊的单模-多模耦合器件,可以保证单模光子技术在多模系统中的应用。作为一种光谱过滤器件,能够使多模光纤系统拥有单模光纤的性能。光子灯笼在光谱分析、激光模式稳定等方面也展示了较高的潜在应用价值。

### 5.1 天文光子学

目前国内尚未开展基于光子灯笼的天文应用。

哈尔滨工程大学于海娇<sup>[28]</sup>对光子灯笼和光纤刷组成的新型天文光纤像切分器进行了相关设计和分析,并基于光束传播法为后续基于光子灯笼在天文方面的相关理论研究提供了参考。第一台利用单模光纤上刻写光纤布拉格光栅的光子灯笼建造的天文光学观测原型机 GNOSIS 建造于 2012 年<sup>[29]</sup>,如图 13 所示。GNOSIS 系统在 MM-SM-MM 耦合的两个光子灯笼组之间的 7 个由 19 根单模光纤组成的光子灯笼上刻写光纤布拉格光栅,利用光纤布拉格光栅和光子灯笼的组合有效地抑制了 1.47~1.7  $\mu\text{m}$  之间的 103 个最亮的散射峰,测试中 GNOSIS 系统与 Anglo-Australian 望远镜、IRIS2 光谱仪组成观测系统,且具有与其他系统有效耦合的可能,有广泛的应用潜力。但 GNOSIS 系统的行间背景出现了一定的减少。

套玻璃管法拉锥制作的光子灯笼是目前可用的一种成功的器件结构,但是随着光子灯笼系统端口数量的增加,单模光纤的数量也会相应提高,当端口数目足够大时,光子灯笼系统结构会变得繁琐而笨重(GNOSIS 系统需要在 7 个 19 端口的光子灯笼上刻写光栅),通过拉锥多个多纤芯光纤制作光子灯笼可以在增加光子灯笼端口的同时简化结构<sup>[11]</sup>。在多纤芯光纤基础上制作的光子灯笼天文观测器件可以容纳更多模式,拥有更加广阔的应用前景。

2014 年,PRAXIS 系统在 GNOSIS 系统上进一步改进,并且首次部署在望远镜上(图 13)。PRAXIS 通过更低的器件噪声消除了部分 GNOSIS 系统中存在的行间背景的影响,使用多纤芯光纤制作的光子灯笼简化了制作过程,相比 GNOSIS 得到了更加轻便的结构。此外,GNOSIS 系统中使用了现有的 IRIS2 光谱仪,PRAXIS 使用专门抑制光纤布拉格光栅羟基散射设计的新型光谱仪,并优化了 1.47~1.7  $\mu\text{m}$  波段的观测效果,得到了较高的信号



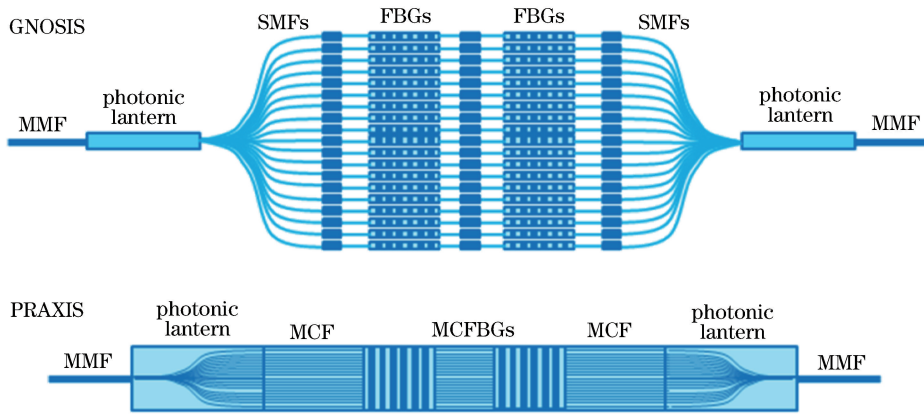


图 13 基于单模光纤的羟基散射抑制装置 GNOSIS 系统光子灯笼与基于多纤芯光纤布拉格光栅的 PRAXIS 系统光子灯笼的对比。GNOSIS 中每个光纤都必须人工手动刻写和熔接,共 133 个端口(由 7 个  $1 \times 19$  光子灯笼组成),每个器件需要多个端口,制作费时,且制作的设备较笨重。多纤芯光纤的光子灯笼只需要对所有纤芯进行一次性刻写,不需要单独刻写<sup>[30]</sup>

Fig. 13 Differences between GNOSIS's single-mode fiber-based OH suppression unit and its planned multi-core fiber Bragg grating-based replacement in PRAXIS. Each individual fiber Bragg grating in GNOSIS has to be written and spliced manually, with a total of 133 ports (made up of seven  $1 \times 19$  lanterns) each requiring multiple splices that were time-consuming and resulted in a bulky device once packaged. The multi-core fiber version requires only a single exposure for all cores and no splices<sup>[30]</sup>

增益。下一步的优化方向为:在 PRAXIS 中使用专门为多纤芯光纤布拉格光栅设计的抑制单元。光子灯笼在天文光学中过滤羟基散射的功能主要通过单模光纤上进行刻写和加工来实现。此外,还能够两个光子灯笼之间的单模光纤上使用环形谐振滤波器来过滤羟基散射。2017 年,用于抑制羟基散射的基于 Si 环形谐振滤波器和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  环形谐振滤波器的光子灯笼实现了控制多环设备自由光谱范围和波长分离,在高效耦合的前提下,使用基于环形谐振滤波器的光子灯笼能够过滤天文观测系统中的羟基散射<sup>[31]</sup>。同年,吉林大学陈威成团队对基于光纤环形器的光子灯笼进行了少模光纤熔接点耦合测量<sup>[32]</sup>。

虽然天文光学系统通过光子灯笼能够有效地过滤羟基散射,但将这些设备直接与大型望远镜进行高效耦合非常困难。麦格理大学 Jovanovic 团队通过细微控制望远镜非理想条件下孔径的几何形状和残余波前误差,证明了实现大型天文光学与单模设备高效耦合的可行性<sup>[33]</sup>。在实验室条件下,在 1550 nm 处耦合效率达到理论极限的 86%。

## 5.2 多路复用

光子灯笼能够实现光学多模系统与单模系统之间的转换,增加了多模系统的功能和潜在应用。杨康团队验证了基于光子灯笼的可重构光分插复用

器,证明在基于光子灯笼的复用系统中可以得到较小的模式串扰和较高的隔离度<sup>[34]</sup>。MIMO 系统方面,吉林大学陈嘉轲团队在 2017 年通过基于光子灯笼的  $3 \times 3$  模分复用系统实现了 10 km 少模光纤中  $3 \times 4.25$  Gb/s 的模式复用传输<sup>[35]</sup>。同年,中佛罗里达大学与天津大学联合团队通过光子灯笼实现了 20 km 少模光纤中  $3 \times 10$  Gb/s 的模式复用传输<sup>[36]</sup>。 $12 \times 12$  (6 端口)、 $20 \times 20$  (10 端口)、 $30 \times 30$  (15 端口)的 MIMO 低损耗信号传输已经在实验室条件下实现<sup>[17, 19-20]</sup>,并且在较长的传输回路上进行了相关测试,测试中基于光子灯笼设计的  $12 \times 12$  低损耗模式多路复用器信号在 65 km 的循环回路中传输超过 130 km,通过离线 MIMO 数字信号处理并恢复信号;在 22.8 km 的多模光纤中实现  $30 \times 30$  的 MIMO 信号传输,传输了 30 种空间和偏振模式,通过多路复用相干接收机测量了 30 个通道的信号。

通过基于光子灯笼的 SDM 系统实现多模端口与多个单模端口之间的低损耗耦合,控制抽运光模式含量,进行少模掺铒光纤功率放大<sup>[15]</sup>,保持高模式保真度的同时,在 5 m 长掺铒光纤中将 6 种空间模式放大到平均功率 6.2 dBm。通过在 976 nm 工作的两个简并  $\text{LP}_{21}$  模式选择性正向抽运,实现器件内所有模式之间小于 1 dB 的模式增益和 1550 nm 处约 16 dB 的信号增益。非模式选择的光子灯笼在

1 km 的多模光纤 SDM 三路 WLAN 信号传输中<sup>[37]</sup>, 2.4 GHz 链路错误向量幅度 (EVM) 性能最低可达 2.38%, 2.97%, 2.11%。基于光子灯笼的 SDM 器件拥有很大的潜力, 目前光子灯笼空分复用器已经能够使用 36 纤芯光纤 (每个纤芯允许容纳 3 个模式) 耦合 108 路信号光, 该器件平均插入损耗为 4.7 dB, 平均模式依赖损耗为 11.0 dB<sup>[38]</sup>。

由于光子灯笼的低插入损耗和模式依赖损耗、多功能宽带模式选择性、易于与现有电信技术集成的特性, 光子灯笼有潜力成为近期空分复用应用中的最佳模式复用技术。

### 5.3 模式控制

对单模端的光进行调谐从而在多模端得到选择性多模式输出是光子灯笼的一大特点。目前可以通

过双层掺铒大模场光纤制作的光子灯笼实现三种基模下的选择性空间模式放大, 得到放大至几瓦特的功率输出<sup>[13]</sup>。2018 年, Li 等<sup>[40]</sup>进一步验证了优化排布光子灯笼中的模式选择特性, 制作了 3 端口的模式选择光子灯笼, 其中所有模式的耦合效率均大于 95%。通过在 6 模式优化排布光子灯笼的少模输出端接入一个少模掺铒光纤作用于控制抽运光模态含量的少模掺铒光纤放大器 (EDFA), 系统在保持高模式保真度的同时, 在掺铒光纤中可以选择性地对 6 个空间模式进行放大<sup>[15-16]</sup>。在光子灯笼单模输入前进行抽运, 输出端直接接入掺铒光纤制作的光纤激光放大器也得到了验证 (图 14), 在放大后能够保持输出光束模式的强度分布稳定, 且适用于整个 C 波段<sup>[39]</sup>。

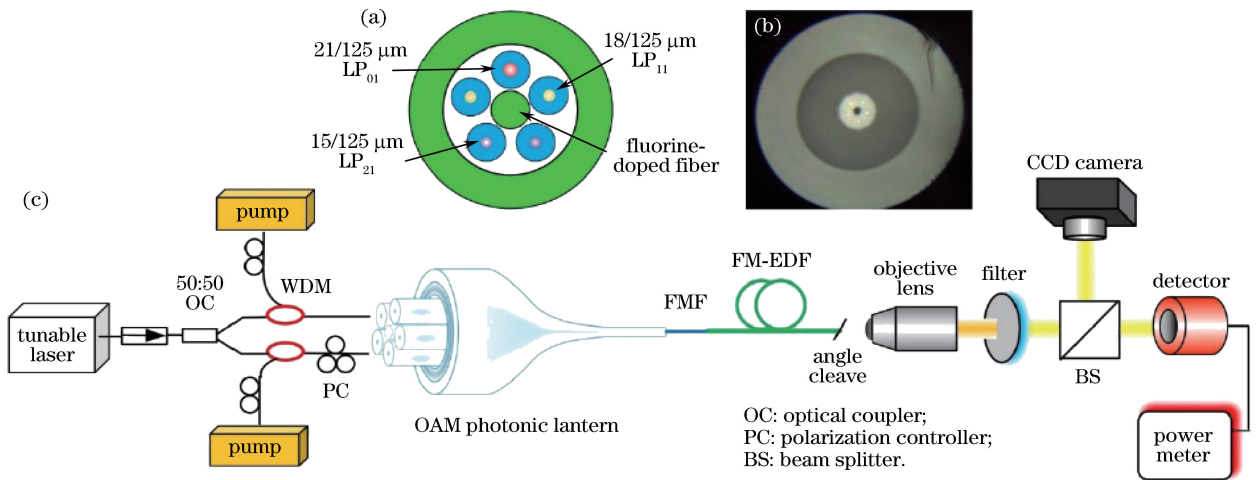


图 14 (a) 6 模式优化排布光子灯笼的横截面示意图; (b) 6 模式优化排布光子灯笼的横截面显微图; (c) 基于纤芯优化排布光子灯笼的轨道角动量 (OAM) 掺铒光纤放大器实验装置<sup>[39]</sup>

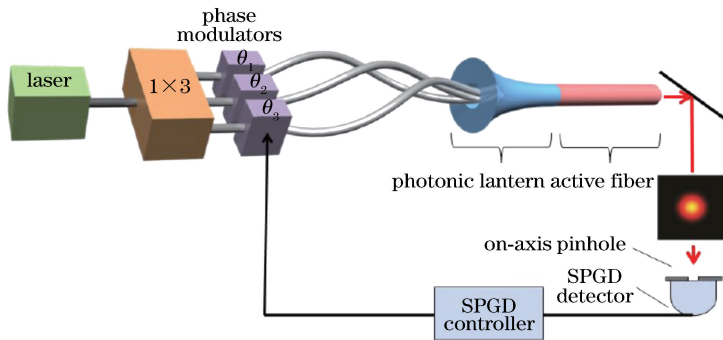
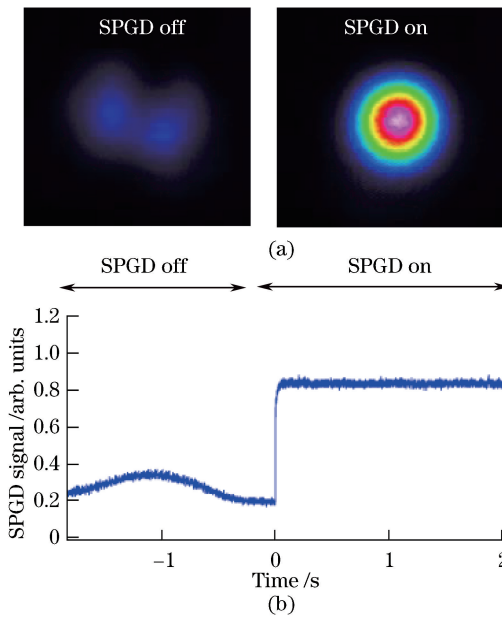
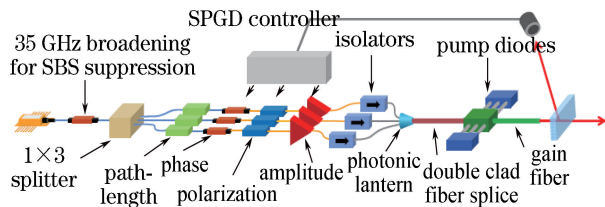
Fig. 14 (a) Schematic of cross section of the 6-mode annular-core photonic lantern; (b) micrograph of cross section of the fabricated 6-mode annular-core photonic lantern; (c) experimental setup of the orbital angular momentum (OAM) erbium-doped fiber amplifier based on the annular-core photonic lantern<sup>[39]</sup>

随机并行梯度下降 (SPGD) 算法可以极大地改善光子灯笼中的光束质量, 实现模式的稳定输出。2016 年, 麻省理工学院将自适应空间模式控制 (ASMC) 系统应用于 SPGD 算法快速调整输入的相位和幅度, 并保持基波输出, 如图 15 所示<sup>[41]</sup>, 得到了高质量的光子灯笼输出光束, 如图 16 所示。在基于 SPGD 算法的光子灯笼系统中将三个单模光纤输入多模增益光纤, 使用 SPGD 自适应算法注入适当的输入模式进行叠加, 通过调整单模输入的相对相位, 实现相干组合, 在输出端能够得到单个基模<sup>[42]</sup>, 目前基于 SPGD 算法的光子灯笼模式稳定系统可以实现极化、相位和振幅的同时控制, 在光子灯

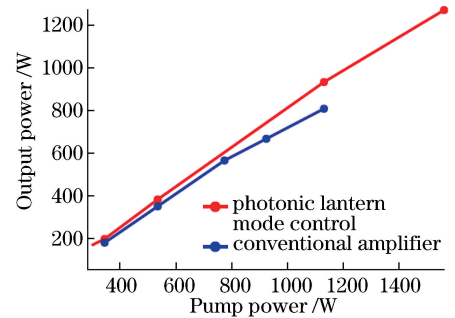
笼输出端接入抽运信号耦合器实现千瓦级抽运, 如图 17 所示<sup>[43-44]</sup>。光子灯笼优越的绝热特性和模式稳定功能使基于光子灯笼的放大器拥有比传统抽运方式更大的发展潜力, 如图 18 所示, 传统功率放大器效率在抽运功率大于 800 W 时出现了明显下降。

## 6 结束语

光子灯笼作为一种基于单模技术的多模系统, 能够实现单模—多模之间的低损耗转换。此外, 通过对光子灯笼的单模光纤系统进行进一步加工, 可以实现一些在多模光纤系统中无法实现的功能, 例如光纤布拉格光栅刻写、相位调制、偏振调制等。光子

图 15 基于 SPGD 算法相位控制的  $1 \times 3$  光子灯笼<sup>[41]</sup>Fig. 15 Schematic of phase-only SPGD based  $1 \times 3$  photonic lantern<sup>[41]</sup>图 16 应用自适应空间模式控制系统前后的(a)光束质量和 (b)SPGD 信号轨迹<sup>[41]</sup>Fig. 16 (a) Beam profile and (b) SPGD signal trace before and after application of the ASMC system<sup>[41]</sup>图 17 光子灯笼相干耦合系统<sup>[43]</sup>Fig. 17 Schematic of photonic lantern coherent coupling system<sup>[43]</sup>

灯笼拓展了单模以及多模系统的功能,增大了应用潜力。为进一步减小损耗,在光子灯笼结构上需要进一步增加端口,但是在保证绝热过渡的前提下单纯地增加端口会使光子灯笼结构更加复杂,并且端口之间的空隙会造成一定损耗。为了解决这些问题,目前有三

图 18 未使用光子灯笼种子源的传统放大器抽运与使用光子灯笼模式控制的放大器抽运的功率输出对比。传统功率放大器中的斜率下降表示效率下降<sup>[43]</sup>Fig. 18 Output power versus pump power for amplifiers without photonic lantern seeding and with photonic lantern mode control. The decreased slope in the conventional amplifier curve depicts a decrease in efficiency<sup>[43]</sup>

个研究方向:1) 优化单模端口排布;2) 使用多纤芯光纤;3) 制作集成光子灯笼。使用优化排布搭配 SPGD 算法可以进一步实现模式控制,在制作、控制算法上仍然有很大改进空间;多纤芯光纤光子灯笼可以增加最多 511 个端口,能够进一步制作优化排布的多纤芯光纤光子灯笼;集成光子灯笼消除了单模端口之间空隙的影响,但目前传统排布以及优化排布的集成光子灯笼端口数目较少,在控制上也有很大发展空间。

简单介绍了光子灯笼的原理、制作、优化、结构及应用方面取得的进展。光子灯笼作为一种多功能设备,在多个领域拥有广阔的应用前景,作为一种特殊的单模-多模转换器件,在保证光学系统功能的基础上可为增强激光输出稳定性提供可行方案。随着研究的推进,光子灯笼可以实现更多端口、更加优化的排布结构,以实现更小的损耗和更加突出的模式控制功能,并有望在大功率系统的模式控制方面实现低损耗传输。

## 参 考 文 献

- [1] Bland-Hawthorn J, Kern P. Astrophotonics: a new era for astronomical instruments[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1880-1884.
- [2] Bland-Hawthorn J, Leon-Saval S G. Astrophotonics: molding the flow of light in astronomical instruments [invited] [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15549-15557.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Birks T A, Gris-Sánchez I, Yerolatsitis S, *et al.* The photonic lantern[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 107-167.
- [7] 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.
- [8] Leon-Saval S G, Argyros A, Bland-Hawthorn J. Photonic lanterns [J]. *Nanophotonics*, 2013, 2: 429-440.
- [9] 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.
- [10] Noordegraaf D, Skovgaard P M W, Maack M D, *et al.* Multi-mode to single-mode conversion in a 61 port photonic lantern [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4673-4678.
- [11] 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.
- [12] Noordegraaf D, Skovgaard P M W, Sandberg R H, *et al.* Nineteen-port photonic lantern with multimode delivery fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 452-454.
- [13] 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.
- [14] Fontaine N K, Ercan B, Ryf R, *et al.* Mode-selective dissimilar fiber photonic-lantern spatial multiplexers for few-mode fiber [C] // 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), London, UK, 2013.
- [15] Lopez-Galmiche G, Sanjabi Eznaveh Z, Antonio-Lopez J E, *et al.* Few-mode erbium-doped fiber amplifier with photonic lantern for pump spatial mode control [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2588-2591.
- [16] Lopez-Galmiche G, Eznaveh Z S, Antonio-Lopez J E, *et al.* Gain-controlled erbium-doped fiber amplifier using mode-selective photonic lantern [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9774: 97740P.
- [17] 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.
- [18] Huang B, Chen H, Antonio-Lopez J, *et al.* Experimental analysis of the modal evolution in photonic lanterns[C] // *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, IEEE*, 2017: Tu2J.7.
- [19] Ryf R, Fontaine N K, Mestre M A, *et al.*  $12 \times 12$  MIMO transmission over 130-km few-mode fiber[C] // *Frontiers in Optics 2012, OSA*, 2012: FW6C. 4.
- [20] Fontaine N K, Ryf R, Chen H S, *et al.*  $30 \times 30$  MIMO transmission over 15 spatial modes[C] // *Optical Fiber Communication Conference, OSA*, 2015: Th5C.1.
- [21] Yu H J, Yan Q, Huang Z J, *et al.* Photonic lantern with multimode fibers embedded [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(8): 1046-1054.
- [22] Velázquez-Benitez A M, Alvarado J C, Lopez-Galmiche G, *et al.* Six mode selective fiber optic spatial multiplexer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1663-1666.
- [23] Sanjabi Eznaveh Z, Antonio-Lopez J E, Alvarado Zacarias J C, *et al.* All-fiber few-mode multicore photonic lantern mode multiplexer[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16701-16707.
- [24] Gris-Sánchez I, Haynes D M, Ehrlich K, *et al.* Multicore fibre photonic lanterns for precision radial velocity science [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 475(3): 3065-3075.
- [25] 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.
- [26] Spaleniak I, Jovanovic N, Gross S, *et al.* Integrated photonic building blocks for next-generation astronomical

- instrumentation II: the multimode to single mode transition[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27197-27208.
- [27] Gross S, Ams M, Leon-Saval S G, *et al.* Ultrafast laser inscribed mode-group-selective 6-mode photonic lanterns for mode-division multiplexing[C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), OSA, 2017, CM\_4\_1.
- [28] Yu H J. Design and research of related devices of optical fiber image slicer [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.  
于海娇. 光纤像切分器相关器件的设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [29] Trinh C Q, Ellis S C, Bland-Hawthorn J, *et al.* GNOSIS: the first instrument to use fiber Bragg gratings for OH suppression [J]. *The Astronomical Journal*, 2013, 145(2): 51.
- [30] Content R, Bland-Hawthorn J, Ellis S, *et al.* PRAXIS: low thermal emission high efficiency OH suppressed fibre spectrograph [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9151: 91514W.
- [31] Ellis S C, Kuhlmann S, Kuehn K, *et al.* Photonic ring resonator filters for astronomical OH suppression [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15868-15889.
- [32] Chen W C, Hu G J, Liu F, *et al.* Measurement of mode coupling at a splice point between few-mode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1206005.  
陈威成, 胡贵军, 刘峰, 等. 少模光纤熔接点处模式耦合测量[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1206005.
- [33] Jovanovic N, Schwab C, Guyon O, *et al.* efficient injection from large telescopes into single-mode fibres: enabling the era of ultra-precision astronomy [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 604: A122.
- [34] Yang K, Li G Y, Li Y, *et al.* Reconfigurable optical add-drop multiplexer based on space division multiplexing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100601.  
杨康, 李国玉, 李燕, 等. 基于空分复用的可重构光分插复用器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100601.
- [35] Chen J K, Hu G J, Han Y Y. Communication experimental system with  $3 \times 3$  mode division multiplexing based on photonic lantern [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106009.  
陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽. 基于光子灯笼的  $3 \times 3$  模分复用通信实验系统 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106009.
- [36] Liu H Y, Wen H, Zacarias J C A, *et al.*  $3 \times 10$  Gb/s mode group-multiplexed transmission over a 20 km few-mode fiber using photonic lanterns [C] // Optical Fiber Communication Conference, OSA, 2017: M2D.5.
- [37] Lei Y, Li J Q, Fan Y T, *et al.* Space-division-multiplexed transmission of  $3 \times 3$  multiple-input multiple-output wireless signals over conventional graded-index multimode fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28372-28382.
- [38] Rommel S, Mendinueta J M D, Klaus W, *et al.* Few-mode fiber, splice and SDM component characterization by spatially-diverse optical vector network analysis [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22347-22361.
- [39] Wang N, Eznaveh Z S, Alvarado Zacarias J C, *et al.* Erbium-doped fiber amplifier for OAM modes using an annular-core photonic lantern [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA, 2017: STu4K.4.
- [40] Shen L, Gan L, Yang C, *et al.* Highly mode selective 3-mode photonic lantern through geometric optimization [C] // Optical Fiber Communication Conference, OSA, 2018: W2A.14.
- [41] Aleshire C, Montoya J, Hwang C, *et al.* Photonic lantern mode control in few-moded fiber amplifiers using SPGD [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA, 2016: SM2Q.6.
- [42] 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.
- [43] Montoya J, Hwang C, Martz D, *et al.* Photonic lantern kW-class fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27543-27550.
- [44] Montoya J, Aleshire C, Hwang C, *et al.* Transverse-mode instability mitigation using photonic-lantern adaptive spatial mode control [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA, 2017: SM1L.6.