

# 新型光纤通信器件之光子灯笼

随着社会信息化程度的逐渐提高，信息数据流量自 2000 年以来，呈现出飞速上涨的势头，10 年的增长速度超过了 100 倍，传输容量已经接近目前单模光纤通信系统的非线性香农极限。为了突破该种限制，国内外研究者提出了多种解决方案，其中利用空间维度的模分复用技术被认为是最具实用化的解决手段。模分复用技术是利用少模或多模光纤中不同模式之间的正交性，增加信息传输通道数来提高信息传输容量。具体表现为在发射端将多路不同信号加载在不同的模式上，在接收端进行分离来实现信息的收发，关键的器件之一就是模式复用及解复用器。其中全光纤的光子灯笼由于其损耗低、串扰小以及优异的抗电磁干扰性能，成为了最受欢迎的模式复用和解复用器。

## 1、光子灯笼的原理

光子灯笼的实现是基于少模光纤的模式复用技术，以少模光纤中几个相互独立的正交模式作为独立的信道来成倍的提升光纤的通信容量，少模光纤不同模式传递信息如图 1 所示。此外，少模光纤与单模光纤相比，模场面积更大，因此非线性效应的容限也会相对提高。这样既提高了传输容量，又提高了香农极限，从而极大的提升了整个光纤通信系统的通信容量。

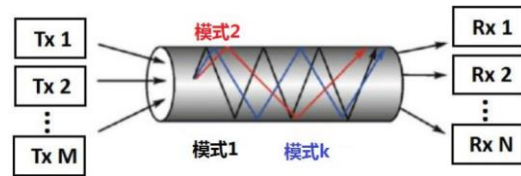


图 1 少模光纤不同模式传递信息的示意图

以拉锥型三模选模光子灯笼为例阐述模式复用技术：三模选模光子灯笼将三根单模光纤紧密对称的分布在折射率略低于光纤包层的玻璃套管里，然后对整个套管进行拉锥处理，拉锥过程中单模光纤纤芯直径逐渐减小，以至于激光大部分从纤芯泄漏到包层，纤芯与原有包层成为无效波导结构。同时，每根光纤的原有包层也和邻近光纤的原有包层进行熔合，逐渐形成新的导光纤芯，外层玻璃套管在拉锥的过程中变为新的包层，整体结构形成新的纤芯/包层波导。光子灯笼的拉锥末端同少模光纤相连接，实现了多个基模向高阶模的转换，达到模式复用的效果。三模选模光子灯笼的有效折射率及模式演变如图 2 所示。

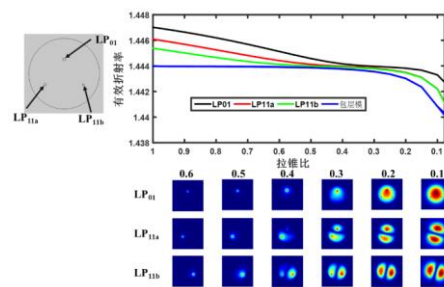


图 2 三模选模光子灯笼示意图、有效折射率曲线及模式演变图

## 2、光子灯笼的制备

目前为止，已报道的光子灯笼主要有超快激光刻字光子灯笼、多芯光纤光子灯笼和光纤簇光子灯笼三大类，前两类在单独的波导输入或输出及与标准单模光纤连接时需要引入额外的设备或者增加光学接口，技术复杂并可能引起附加损耗。

光纤簇光子灯笼的基本结构是将单模光纤簇嵌入低折射率毛细管中进行熔融拉锥，在锥区尖端形成类似少模光纤的波导结构。理论和实验研究表明，对每个光子灯笼而言，光纤数量取决于所需模式的数量，单模光纤最理想的数目和排布都是唯一确定的。无损光子灯笼设计的目标为单模光纤簇经过拉锥后，其最终尺寸需要与相熔接的少

模光纤纤芯尺寸相近。当纤芯孤立或者弱耦合时，其超模或超模的组合将与最终的少模波导结构相似（耦合模式的场分布可以被看作是孤立模式的叠加，也被称为超模）。

长飞光纤光缆股份有限公司（以下简称长飞公司）与北京邮电大学光研院伍剑教授团队合作，在自有的光纤处理平台上，优化了拉锥工艺，以自产的特种光纤与低折射率毛细管，用绝热拉锥工艺制作出了首款国产化成品光纤簇光子灯笼(图 3)。在该项研究的基础上，成功申报了国家自然科学基金项目《面向弱耦合模分复用通信系统的全光纤型模式选择复用/解复用器的理论与实验研究》（项目批准号：61875019）。

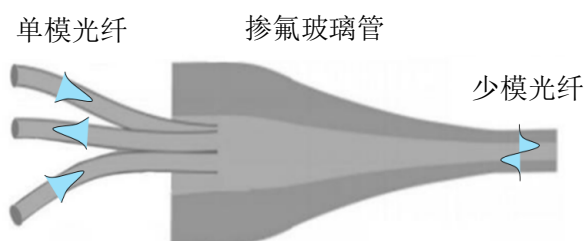
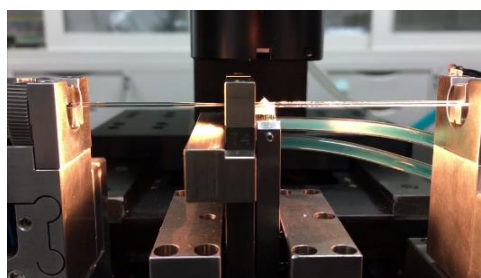


图 3 光纤处理平台与三模选模光子灯笼制作示意图

图 4 展示了我们制作的三模选模光子灯笼的输入输出模式，以及不同模式之间的串扰情况。图 5 展示了该光子灯笼在

1530nm~1600nm 的插入损耗测试结果，均在 5dB 以下。

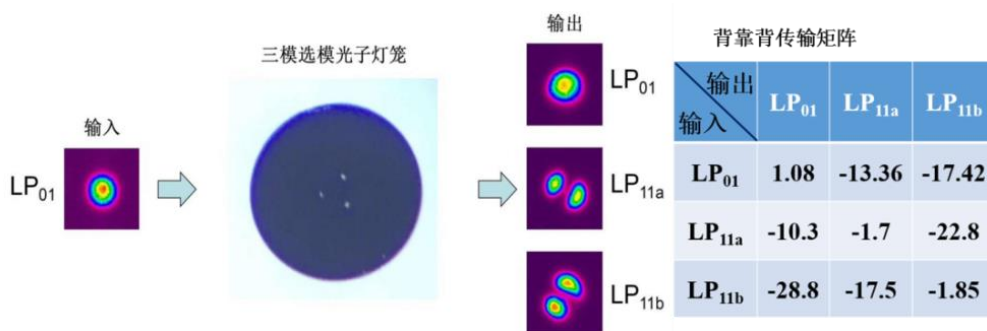


图 4 三模选模光子灯笼显微端面与输入输出示意图



图 5 三模选模光子灯笼 1530nm~1600nm 损耗

长飞公司与北京邮电大学合作制作的光纤簇光子灯笼作为一种全光纤结构的器件，具有低损耗、低模间串扰的优点（表 1 为该产品的技术指标）。该技术及产品达到国际先进水平，已成功应用于空分复用系

统。未来，长飞公司将依托多年的光纤制备技术以及成熟的光纤处理平台，研制更高容量、更宽带宽的器件系统，为光通信的技术发展提供有力支持。

表 1 三模选模光子灯笼技术指标

参数	单位	规格
输入端光纤数	EA	3
工作波长	nm	1530~1600
输入端光纤类型	/	YOFC PH 1010-A
输出光纤类型	/	YOFC 少模光纤
插入损耗	dB	<5.0
模式相关损耗	dB	<3.0
偏振相关损耗	dB	<0.5

## 长飞光纤光缆股份有限公司

Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company

地址：武汉市光谷大道9号（430073）  
ADD: No.9 Optics Valley Avenue, Wuhan, Hubei, China(P.C.: 430073)  
电话(Tel): +86 400-991-6698  
邮箱(Email): marketing@yofc.com  
www.yofc.com