

# 模分复用系统中少模复用(解复用)技术研究

董秋焕<sup>1</sup> 刘 阳<sup>1</sup> 郑宏军<sup>1</sup> 黎 昕<sup>1</sup> 白成林<sup>1</sup> 胡卫生<sup>2</sup> 陈南光<sup>1</sup>

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院、山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

**摘 要** 近年来,在模分复用(MDM)光通信领域中采用少模光纤(FMFs)来增加传输容量的方法已经得到高度关注和深入研究,该方法可以突破单模光纤(SMFs)非线性香农极限.结合本课题组开展的模分复用方面的部分工作,比较系统、深入地分析讨论了模分复用研究过程中相对突出、经典的部分研究工作和最新进展,涉及少模模分复用器结构设计、特性及应用.分析讨论了一种基于相位板的三模式模分复用器、基于液晶空间光调制器(LCOS-based SLM)的模分复用器、常规标准型光纤光子灯笼、模式选择光纤光子灯笼、模式组选择光纤光子灯笼、模式组选择刻写波导型光子灯笼的结构设计、特性及应用.最后,给出了本课题组近期提出的新颖的定向耦合模分复用器以及模分复用器研究发展趋势,为模分复用光纤前传等系统应用提供有效支持.今后的较长一段时间,模分复用技术研究中的采用特殊材料和传输信道结构设计来实现低衰减、低串扰、高消光比、高模式选择性等指标仍然是通信领域需要继续探索的研究热点.

**关键词** 模分复用;模分复用解复用器;少模光纤;光子灯笼

**中图分类号** TN913.7

**文献标识码** A

## 0 引言

近年来,各种通信业务流量(如大数据、云计算和流媒体等)指数增长,世界各国相继制定了国家宽带战略.单模光纤的通信容限趋近香农极限限制,光纤通信的发展迎来了史无前例的机遇和挑战<sup>[1,2]</sup>.通信业界围绕时分复用、波分(频率)复用、正交幅度调制、偏振复用、空分复用(包括模分复用、芯式复用和轨道角动量复用)开发利用时间、频率、正交、偏振、空间这五个物理维度对通信网络的传输速率、传输容量进行了不同程度的突破.其中,最近提出的模分复用开发利用空间物理维度,是突破通信挑战具有较大潜力的技术<sup>[1-6]</sup>.

模分复用是将每个模式(模式间互为正交性)作为独立的信道,形成多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)信道,提高系统传输容量.其研究主要集中在基于少模光纤(Few Mode Fibers, FMFs)、少模多芯光纤、超模光纤、少模模分复用(解复用)器、少模光放大器等模分复用研究,并且与长距离相干光纤通信相结合,以显著提高通信容量<sup>[1-6]</sup>.目前,模分复用研究由美国、日本和部分欧洲国家主导<sup>[1-6]</sup>.在中国,国内相关高校、科研院所先后在模分复用领域开展了部分研究工作,如清华大学、北京大学、上海交通大学、北京邮电大学、华中科技大学、西南交通大学、北京交通大学、南京邮电大学、烽火通信科技集团有限公司等单位开展了模分复用相应的工作;2014年国家科技部资助了天津大学牵头的“多维复用光纤通信基础研究”973基础研究项目<sup>[2-6]</sup>,这标志着模分复用研究上升到了“国家战略需求”的高度.现在模分复用领域正处于基础研究阶段,是新一代通信系统的研究热点<sup>[1-26]</sup>.本文主要讨论模分复用(解复用)器的经典、突出的

**收稿日期:**2019-09-02

**基金项目:**国家自然科学基金项目(61671227,61431009,61875247);山东省自然科学基金项目(ZR2011FM015);“泰山学者”建设工程专项经费等资助

**通讯作者:**郑宏军,男,汉族,博士,教授,研究方向:光纤通信,E-mail:hjzheng@yahoo.com.

工作及最新研究进展工作,涉及一种基于相位板的三模式模分复用器<sup>[2,11]</sup>、基于液晶空间光调制器(LCOS-based SLM)的模分复用器<sup>[2,11]</sup>、常规标准型光纤光子灯笼<sup>[2,4]</sup>、模式选择光纤光子灯笼<sup>[12]</sup>、模式组选择光纤光子灯笼<sup>[16,20,21]</sup>、模式组选择刻写波导型光子灯笼<sup>[22,23]</sup>的结构设计、特性及应用.最后,给出了本课题组近期提出的新颖定向耦合模分复用器及模分复用解复用研究发展趋势.

少模模分复用器是将多种模式信号复用到同一条少模光纤(FMFs)进行传输的器件,是实现模分复用系统的重要组成部分.根据光路可逆性原理,该种器件也可逆向使用,将 FMFs 光纤中传输后的模式信号解复用到相应的标准单模光纤(SSMFs)中,此时,该器件称少模模分解复用器.也就是说,该种器件根据应用的不同,可称为少模模分复用器,也可称为少模模分解复用器,有时统称为少模模分复用(解复用)器,本文以少模模分复用器为例讨论.

### 1 基于玻璃相位板的模分复用器结构与特性

图 1 所示是一种基于玻璃相位板的三模式模分复用器<sup>[2,11]</sup>.图 1(a)三模式模分复用器结构示意图,图 1(b)理论计算的各模式光强分布模斑,图 1(c)实验测量的各模式光强模斑.由结构示意图可得,该基于玻璃相位板的模分复用器,采用玻璃相位板实现了基模到高阶模式的转换,并将三种模式信号复用到同一个三模式光纤信道.由各模式光强分布模斑图可得,理论计算得到的各模式光强分布模斑与实验测量结果一致.该模分复用器的模式 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>的耦合损耗分别为 8.3 dB、10.6 dB 和 9.0 dB.这种模分复用器要求空间耦合校准具有高的精确度,自由空间耦合的耦合损耗较大,且难于集成,成本较高.

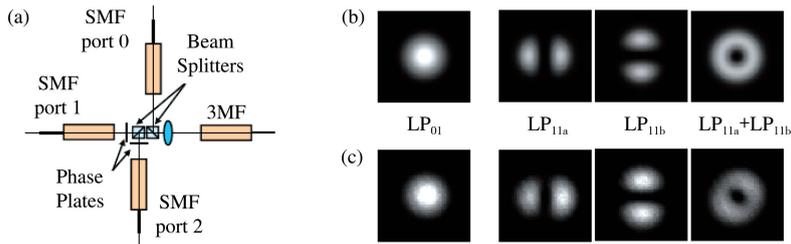


图 1 一种基于玻璃相位板的模分复用器<sup>[2,11]</sup>

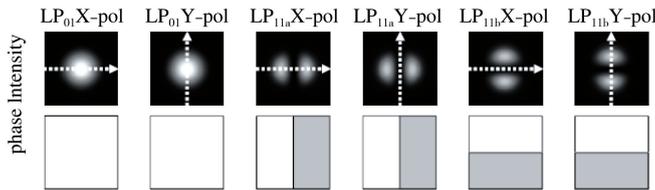


图 2 各个模式的光强分布模斑与相位板的关系图<sup>[2,11]</sup>

图 2 是各个模式的光强分布模斑与相位板的关系图<sup>[2,11]</sup>.由图 2 可得,若同时考虑 XY 偏振复用,三模式模分复用器可以等效地提供六个并行的传输通道.其中基模可以不要相位板,直接入射即可,模式 LP<sub>11</sub>的四个简并模式可以通过相位差为  $\pi$  的不同全息相位板来形成.

### 2 基于液晶空间光调制器的模分复用器结构与特性

图 3 所示是基于液晶空间光调制器(LCOS-based SLM)的模分复用器<sup>[2,11]</sup>.图 3(a)该模分复用器结构示意图,图 3(b)实验测量的模式光强分布模斑,图 3(c)实验测量的模式干涉模斑.图中 LCOS 是指基于硅基的液晶,可以受到精确的电压控制,并能调制光束的波前,从而实现入射光的模式转换和复用,但该器件难于集成到光纤通信系统中.

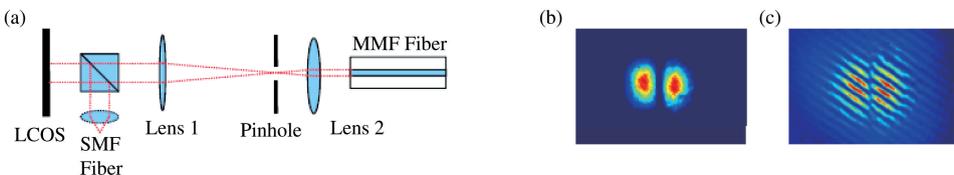
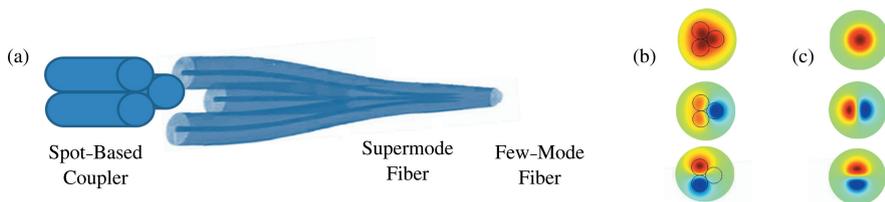


图 3 基于液晶空间光调制器的模分复用器<sup>[2,11]</sup>

### 3 光子灯笼结构与特性

#### 3.1 三模式标准光子灯笼结构与特性

图4所示是常规标准型三输入端的光子灯笼<sup>[2,4]</sup>,图4(a)该光子灯笼结构图,图4(b)光纤拉锥变换区形成的超模模式图,图4(c)光纤拉锥少模区形成的少模模式图.由图4可见,该光子灯笼是一种对称型三输入端的拉锥形状的模分复用器,实现了三路单模信号转换模式并复用到同一个少模信道,该光子灯笼是三条相同的标准单模光纤放到一条低折射率的毛细玻璃管中绝热拉锥形成,拉锥过程中,标准单模光纤的纤芯逐渐消失,其包层逐渐成为多模纤芯,低折射率的毛细玻璃管则演变为多模纤芯的包层.光子灯笼结构复杂程度虽然比基于相位板或液晶空间调制器的模分复用器低,但是其制造工艺精密、复杂,精确地控制光纤熔融时的位置、拉锥体粗细和长度具有很大难度.通过拉锥形成的输出端口与传输通道不完全匹配,会导致较高损耗.



注:(a) 该光子灯笼结构图;(b) 光纤拉锥变换区形成的超模模式图;(c) 光纤拉锥少模区形成的少模模式图.

图4 常规标准型三输入端的标准光子灯笼<sup>[2,4]</sup>

#### 3.2 模式选择光子灯笼结构与特性

图5是光子灯笼空间多路复用器(SMUX)三模光纤系统原理图<sup>[12]</sup>,三模光纤传输系统中使用黑色实心盒封装的是模式组光强分布图.展示了如何通过使用不同的光纤而不是与标准光子灯笼中相同的光纤来制造光子灯笼,从而为光子灯笼增加模式选择性.沿绝热锥度方向,这种光纤的不同可以控制标准单模光纤(SMFs)纤芯之间的耦合,并迫使最初发射到特定SMFs纤芯中的光演化为特定的模式组(如 $LP_{01}$ 、 $LP_{11}$ 等).在光子晶体光纤器件、光纤零锥耦合器和平面波导中也有类似的概念.图中,SMUX A可以用作模式转换复用器,将SMFs中的单模信号转换并复用到FMFs光纤中传输;SMUX B可以用作模式转换解复用器,将FMFs光纤中传输后的少模信号转换解复用到相应的SMFs光纤中.

图6是三模式光子灯笼的输出端面 and 模式折射率的变化曲线<sup>[12]</sup>,图中6(A)是常规标准光子灯笼输出端面,由三条相同的标准单模光纤放到一条低折射率的毛细玻璃管中绝热拉锥形成.常规标准光子灯笼少模纤芯中,右图的模式 $LP_{01}$ 和 $LP_{11}$ 的折射率从相等(简并模式)逐渐分离开来(非简并模式).图中6(B)是模式选择的光子灯笼输出端面,模式选择是指从不同的单模光纤入射光,输出相应的独立模式,需要打破标准光子灯笼的简并模式、确保模式间相互不耦合.由三条不同的单模光纤放到一条低折射率的毛细玻璃管中绝热拉锥可形成模式选择的光子灯笼,其中转换模式 $LP_{11}$ 的两条单模光纤相同.模式选择光子灯笼少模纤芯中,右图的模式 $LP_{01}$ 和 $LP_{11}$ 的折射率自始至终就不相等,保持非简并模式.

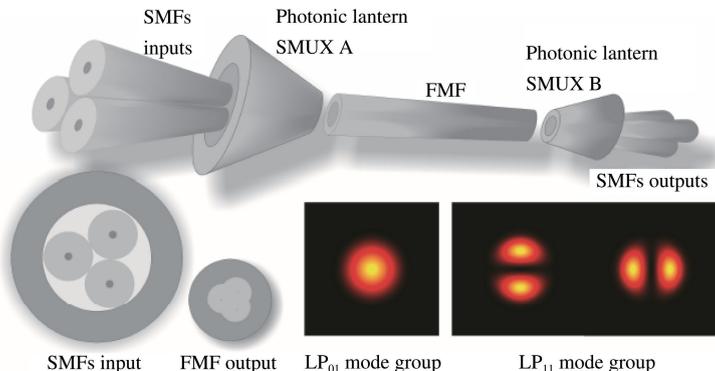


图5 光子灯笼空间多路复用器(SMUX)三模光纤系统原理图,三模光纤传输系统中使用的黑色实心盒封装的是模式组光强分布图<sup>[12]</sup>

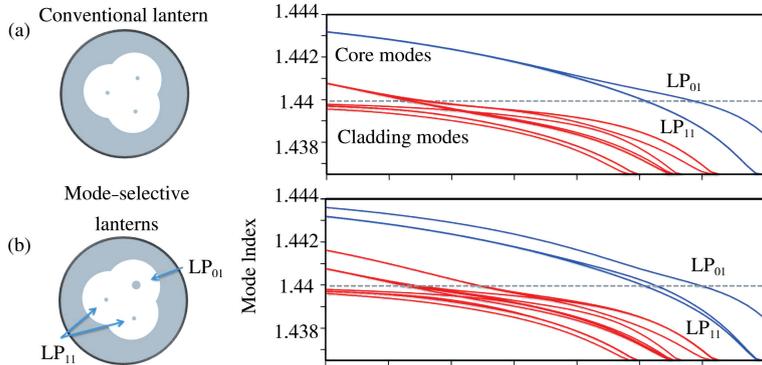
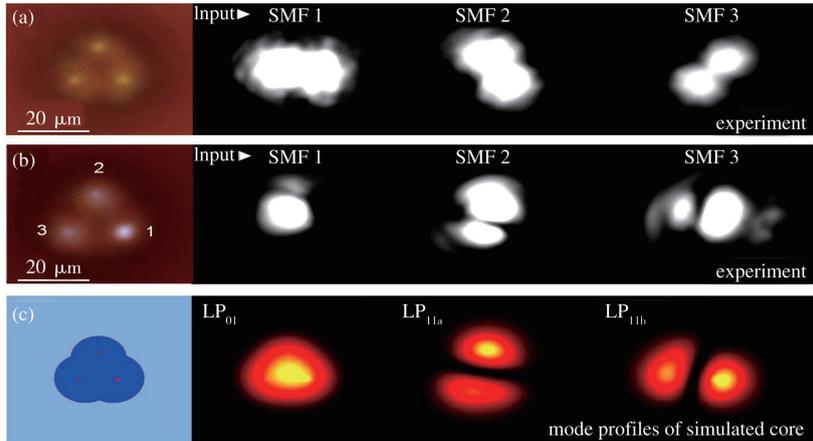


图 6 三模式光子灯笼的输出端面和模式折射率的变化曲线<sup>[12]</sup>



注:(a) 左侧是常规标准光子灯笼背光可见光时显微镜图像,右侧是分别从三条单模光纤输入光信号测量得到的标准光子灯笼输出模式;  
 (b) 左侧是模式选择光子灯笼背光可见光时显微镜图像,右侧是分别从三条单模光纤输入光信号测量得到的模式选择光子灯笼输出模式;  
 (c) 左侧是模式选择光子灯笼仿真图像,右侧是分别从三条单模光纤输入光信号仿真得到的模式选择光子灯笼输出模式。

图 7 三模式光子灯笼输出少模模式<sup>[12]</sup>

图 7 是三模式光子灯笼输出少模模式光强分布图<sup>[12]</sup>, (a) 左侧是常规标准光子灯笼背光可见光时显微镜图像,右侧是分别从三条单模光纤输入光信号测量得到的标准光子灯笼输出模式;(b) 左侧是模式选择光子灯笼背光可见光时显微镜图像,右侧是分别从三条单模光纤输入光信号测量得到的模式选择光子灯笼输出模式;(c) 左侧是模式选择光子灯笼仿真图像,右侧是分别从三条单模光纤输入光信号仿真得到的模式选择光子灯笼输出模式. 常规标准光子灯笼的结构是旋转对称的,导致其输出模式是旋转对称. 模式选择光子灯笼的输出模式是非旋转对称的. 模式选择光子灯笼的几何和模式的不对称性表明光子灯笼不能纯正激发少模模式的程度,但其输出模式依然与少模光纤的模式非常相似.

$\lambda=1550\text{ nm}$  时的光依次耦合到光子灯笼 SMUX 的各个 SMFs 中,用红外摄像机记录了光子灯笼 SMUX 的 FMFs 输出的近场图像. 比较了两种三模光子灯笼 SMUX:一种是相同 SMFs 的常规的标准光子灯笼,另一种是采用不同光纤(1 x Nufern 1550B-HP 和 2 x ThorLab SM980-5, 8-125)制作的模式选择光子灯笼,它们都是用相同的低折射率毛细管和相同的芯尺寸制作的,在光子灯笼的 FMFs 末端给出数值孔径 NA 为 0.06. 在图 7(a 和 b,左侧图)的显微镜图像中,人们可以观察到常规光子灯笼和模式选择光子灯笼之间的核心尺寸差异. 在这些图像中,还可以观察到光子灯笼核心限制较低的可见波长效应,虽然该波长远离工作波长 1550 nm. 图 7(a)显示了传统灯笼的输出,由于设备是旋转对称的,输出的场图像也可旋转 120 度. 在核心对称三角形几何结构中,在改变输入耦合核芯的同时,如果保持相同的耦合条件,则应该预期到三个核芯的光转换效果. 这一对称输出的结果也表明,拉锥转换的质量是很好的,假设由于制造缺陷而产生的任何局部扰动(这并不会平等地影响三个核芯)将导致非旋转对称的输出. 图 7(b)显示了模式选择光子灯笼的输出,这些输出模式不再是旋转对称的,而是类似于 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模式. LP<sub>11</sub> 模式图波瓣间的非零强度、模式图不等波瓣强度和模式图不同几何形状可以表明该模式在多大程度上不是光子灯笼纯粹的激发模式. 但是,输出模式看起来仍然类似于 FMFs 模式,LP<sub>11</sub> 模式的谷深至少要 5.5 dB 的模式选择性. 光子灯笼本身的

FMFs 输出核芯几何形状可以进一步解释模式图不同几何形状和不等波瓣强度, 当将三根光纤融合在一起时, 最终的纤芯很有可能保持一定的三角对称性, 如图 7 所示的 FMFs 输出图像中可以明显看出这一点. 图 7(c) 显示了三角形核芯支撑模式的模拟, 类似于在光子灯笼制造过程中获得的模式. 用有限元方法进行了数值模拟, 结果表明, 模式图形的不等长形状可能是核芯三角形几何形状的简单结果.

图 8 三模式光子灯笼连接 30 m 渐变折射率分布少模光纤输出的少模模式强度分布图和光子灯笼传递矩阵<sup>[12]</sup>. 图(a)是三模式光子灯笼连接 30 m 渐变折射率分布少模光纤输出的少模模式, 图(b)是三模式光子灯笼传递矩阵. 其中有灰色背景的插图是串扰矩阵, 没有灰色背景的插图是传递矩阵,  $LP_{01}$  到  $LP_{01}$  传递矩阵在左上角;  $LP_{11}$  到  $LP_{11}$  传递矩阵在右下角的四个插图. 在  $LP_{01}$  到  $LP_{01}$  插图,  $LP_{01}$  的峰值最大; 当入射  $LP_{01}$  时,  $LP_{01}$  的模式选择性超过  $LP_{11}$  模式 3 dB. 在  $LP_{11}$  到  $LP_{11}$  插图, 当入射  $LP_{11}$  时,  $LP_{11}$  的模式选择性超过  $LP_{01}$  模式 6.5 dB; 模式相关损耗 MDL 测量得到小于 0.5 dB.

### 3.3 模式组选择光子灯笼结构与特性

光子灯笼研制成功以来, 应用对称型标准光子灯笼完成了 WDM 传输 900km 的实验<sup>[13]</sup>. 采用模式选择光子灯笼和少模光纤, 首次实现了低模式串扰时分复用无源光网络的实验演示<sup>[14]</sup>. 基于低模式串扰少模光纤的长距离传输可以采用模式选择光子灯笼补偿差分模式群时延(DMGD)<sup>[15]</sup>. 考虑到少模光纤中的简并模式有着较强的相互模式耦合, 就没有必要从同一个模式组中的简并模式选择区分开来; 把不同的模式组选择区分开来可以完成补偿差分模式群时延(DMGD)的应用. 文献[16]报道了一种制备模式组选择光子灯笼(MGS-PL)的新方法, 采用渐变折射率多模光纤(GI-MMF)进行锥化, 有效提高了模式组的选择性和降低了拉锥绝热需求; 下面讨论模式组选择的光子灯笼.

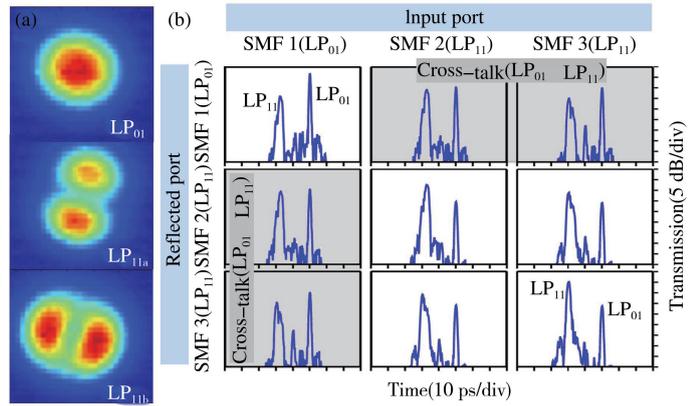
图 9 模式组选择的光子灯笼结构示意图<sup>[16]</sup>. 其中 6 条不同的渐变折射率分布少模光纤 GI-MMF 放到一条低折射率的毛细玻璃管中绝热拉锥可形成模式组选择的光子灯笼, 其中纤芯直径  $22 \mu\text{m}$  的 1 条 GI-MMF 能够激发  $LP_{01}$  模式(第 1 模式组), 纤芯直径  $20 \mu\text{m}$  的 2 条 GI-MMF 能够激发  $LP_{11}$  模式组(第 2 模式组), 纤芯直径  $15 \mu\text{m}$  的 3 条 GI-MMF 能够激发  $LP_{21} + LP_{02}$  模式组(第 3 模式组), 包层直径  $125 \mu\text{m}$ .

模式组选择的光子灯笼需要满足锥形过渡时的绝热标准<sup>[16,17]</sup>

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

$\Psi_1$  和  $\Psi_2$  是可能相互耦合的局域模式的归一化电场分布,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  是它们各自的传播常数,  $\rho$  是局域纤芯半径,  $z$  是沿着光子灯笼 PL 的纵向距离,  $A$  是光子灯笼 PL 的横截面积, 方程(1)第一项表明拉锥比  $d\rho/dz$  与两模式的传播常数差成反比(传播常数标准); 方程(1)第二项表明光纤拉锥时两模式电场分布的缓慢变化会导致较低串扰(模式电场分布标准); 任何一个标准要求的拉锥长度与光子灯笼输入光纤的数目  $N$  呈线性增加关系, 两个标准要求拉锥长度与  $N^2$  近似线性增长.

文献[16]提出采用渐变多模光纤 GI-MMFs 拉锥以满足传播常数和模式电场分布两个拉锥绝热标准,



注:(a)是三模式光子灯笼连接 30 m 渐变折射率分布少模光纤输出的少模模式强度分布图, (b)是三模式光子灯笼传递矩阵.

图 8 三模式光子灯笼连接 30m 渐变折射率分布少模光纤输出的少模模式和光子灯笼传递矩阵<sup>[12]</sup>

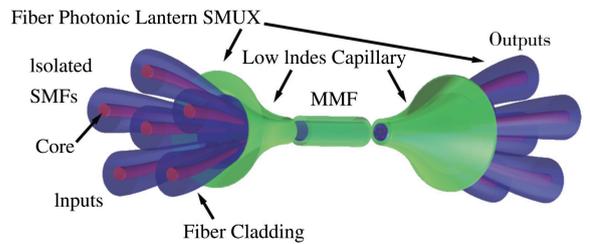
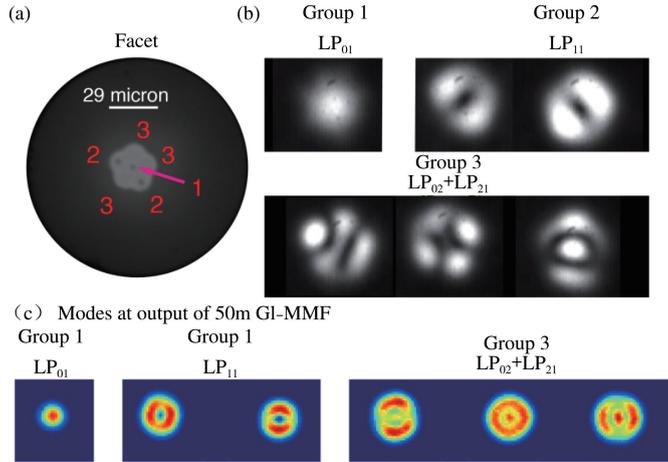


图 9 模式组选择的光子灯笼结构示意图<sup>[16]</sup>

从而形成模式组选择光子灯笼,采用 GI-MMFs 可改善输入标准单模光纤 SMFs 和光子灯笼之间的熔接损耗. 为了提高传播常数准则,  $\beta_1 - \beta_2$  的大差异将有效降低对绝热的要求. 不同的 MMFs 作为输入光纤提供了比不同的 SMFs 允许更大范围的基模之间的传播常数差异;而不同类型的单模光纤之间的传输常数差异受芯径和折射率的限制. 为了改进模式电场分布标准,使用了 GI-MMFs 拉锥,因为 GI-MMFs 模式变化慢于阶跃折射率 MMF,多模光纤用于光子灯笼 PL 的输入/输出光纤的实用性有两个原因. 首先,当 MMF 的长度较短时,可以忽略耦合到 MMF 高阶模的模式耦合;第二,即使不同 GI-MMFs 的直径变化,标准单模光纤 (SSMFs) 能够耦合到具有低熔接损耗的 GI-MMFs 的基模. 当满足绝热标准拉锥导致芯径变化时,GI-MMFs 的有效面积变化较慢.



注:图(a)是模式组选择的光子灯笼输出端面;图(b)是光子灯笼输出三组近场模式图;图(c)是光子灯笼连接 50m GI-MMF 输出的三组模式图.

图 10 模式组选择的光子灯笼输出端面 and 输出模式强度分布图<sup>[16]</sup>

图 10 是模式组选择的光子灯笼输出端面和输出模式强度分布图<sup>[16]</sup>. 图 10(a)是模式组选择的光子灯笼输出端面;图 10(b)是光子灯笼输出三组近场模式图;图 10(c)是光子灯笼连接 50 m GI-MMF 输出的三组模式图. 图 10(b)可见,光子灯笼输出的三组近场模式图与标准少模模式比较吻合. 图 10(c)可见,光子灯笼输出的三组模式经 50 m GI-MMF 传输后,各高阶模式图形有变化. 如 LP<sub>11</sub> 的强度模式图变成了圆环形状,这是由于模式耦合导致的两个简并模式 LP<sub>11a</sub> 和 LP<sub>11b</sub> 线性组合的缘故.

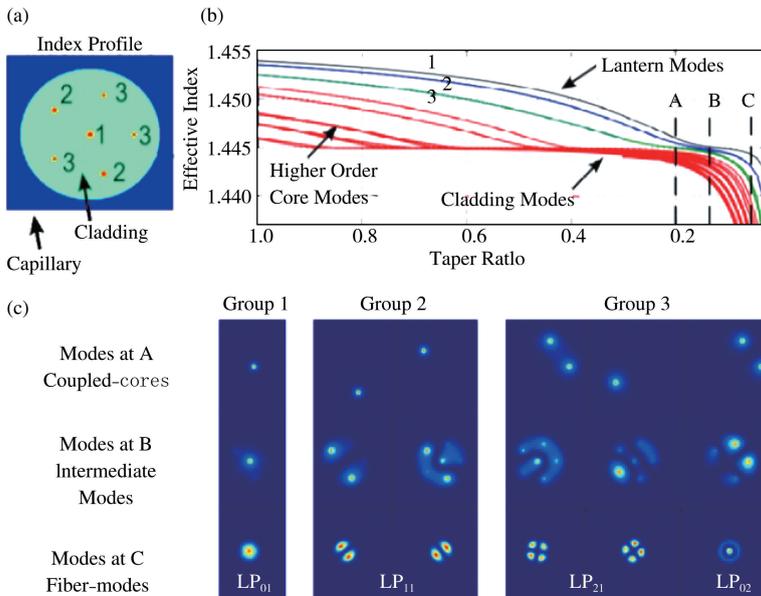


图 11 (a)具有三种不同纤芯(1,2 和 3)的六纤光子灯笼折射率分布;(b)锥化不同阶段时模式的传播常数和(c)模式强度分布<sup>[16]</sup>

图 11 显示了使用满足三模组 MGS-PL 选择规则的输入光纤进行的模拟仿真<sup>[16]</sup>. 图 11(a)显示了光纤

截面. 中心的输入光纤是一个芯直径为  $22\mu\text{m}$  的 GI-MMF, 用于激励  $\text{LP}_{01}$  输出模式(第 1 模式组), 两个芯直径为  $20\mu\text{m}$  的 GI-MMF 用于激发 2 个  $\text{LP}_{11}$  模式(第 2 模式组), 3 个芯直径为  $15\mu\text{m}$  的 GI-MMF 用于激发 3 个近似简并的  $\text{LP}_{21} + \text{LP}_{02}$  模式(第 3 模式组). 仿真中 GI-MMF 的折射率对比度为 1%, 包层直径为  $125\mu\text{m}$ . 在图 11(b)中, 3 个感兴趣的模式组(1-黑色、2-蓝色、3-绿色)和将演化成包层模式的单个光纤高阶模组(红色)的有效折射率被绘制为锥度比的函数. 结果表明, 高阶模的有效折射率比 6 个不同光纤的任何基模的有效折射率都小, 保证了从一条输入光纤的高阶模到另一条光纤的基模之间不会发生共振耦合.

在锥度比为 0.9 左右时, 每条光纤的最高阶模式开始耦合到包层模(由毛细管引导). 在锥度比约为 0.4 的情况下, 所有高阶模都耦合到光子灯笼 PL 的包层模上, 而基模仍由单个纤芯引导. 如果任何一种高阶模式的有效折射率大于其中一个基模的有效折射率, 则这两种模式的有效折射率将在高阶模耦合到包层模式前的锥形区相互交叉. 在交叉点附近, 这两个模式的有效折射率基本相同, 将发生模式耦合. 结果导致基模中的信号将耦合到高阶模式, 并最终消失到包层模式中, 从而导致模式选择光子灯笼模式相关损耗.

图 11(c)描述了在锥形区域的不同点的 PL 模式强度分布, 当锥度比从 1 到 0.2(A 点之前的区域)时, 纤芯之间的距离更近, 但灯笼模式仍然很好地限制在 GI-MMF 纤芯中. 在 B 点(锥度比 = 0.15)时, 纤芯开始强耦合. 当在 C 点(锥度比在 0.11 时)时, 纤芯变得足够小, 使得由熔融包层纤芯和毛细管包层组成的多模光纤中出现了 PL 模式. 在 C 点之后, 纤芯变得很小, 对 PL 模式的影响可以忽略不计, 并且可以将结构锥化到所需的尺寸. A 点和 C 点之间的转换(特别是在 B 点附近)是最敏感的, 因为随着光子灯笼模式从纤芯导模到包层导模的转换, 模式分布发生显著的变化.

图 12 为模式组选择光子灯笼脉冲响应的时域传输矩阵, 为了量化模式选择性, 把模式组 1 的信号功率加到一起. 把模式组 1 的所有串扰功率加到一起, 则模式组 1 的模式选择性定义为模式组 1 的信号功率与所有串扰功率的比值. 经过分析计算, 模式组 1、2、3 的模式选择性分别为 20、10、7 dB. 进一步优化光子灯笼的模式匹配可以得到更好的模式选择性, 光子灯笼的插入损耗小于 0.6 dB.

### 3.4 基于打孔预制件法的 10-模式光子灯笼结构与特性

制备光纤光子灯笼时, 任何一个拉锥绝热标准要求的拉锥长度与光子灯笼输入光纤的数目  $N$  呈线性增加关系, 两个标准要求拉锥长度与  $N^2$  近似线性增长; 若增加输入光纤的数目  $N$ , 会导致光子灯笼有不切实际的长度. 文献[18, 19]采用低折射率打孔预制件法制作了 10-模式光子灯笼, 不仅使可扩展到更多模式, 也减轻了拉锥绝热要求.

文献[18, 19]以包含 6 模低折射率包层的渐变折射率光纤的简化结构锥化为例, 讨论了拉锥绝热要求及解释了相应解决方案. 图 13(a)具有低折射率标准包层的 6 模渐变折射率光纤的端面; 图 13(b)具有双包层的光纤端面; 图 13(c)两种包层光纤的模场直径随锥度比变化情况. 图 13(a)演示了具有低折射率外包层的 6 模光纤, 当这种光纤被锥化时, 基模的模场直径(MFD)随锥度比(从 1 到 0.03)变化情况, 如图 13(c)所示. 模场直径(MFD)首先下降, 然后急剧增加随后急剧下降. 其原因是在锥度比为 0.3 左右时, 基模开始离开纤芯, 转而受到包层的引导. 如果用双层包层取代标准包层, 如图 13(b)所示, 模式将首先由内部包层引导, 然后逐渐由外部包层支持. 在这种情况下, MFD 的变化可以有效减少, 如图 13(c)中的蓝色曲线所示, 这对应

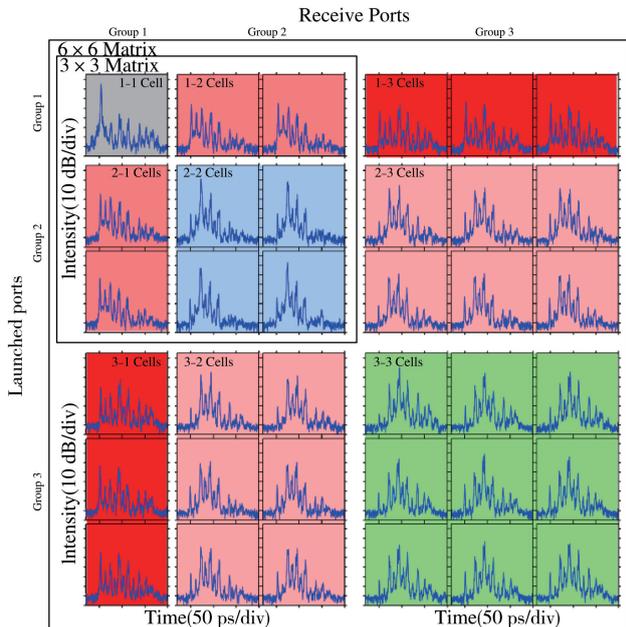


图 12 模式组选择光子灯笼脉冲响应的时域传输矩阵;

三个模式组包括六个空间模式,  $6 \times 6$  矩阵, 36 个单元.

位于在矩阵对角的  $1 \times 1$  (灰色)子矩阵,  $2 \times 2$  (蓝色)子矩阵、

$3 \times 3$  (绿色)子矩阵分别是模式组 1、2、3 的信号单元;

其他矩阵元素表示串扰单元(红色)<sup>[16]</sup>

于模式场  $\partial E/\partial z$  较小的变化率,从而减轻了绝热要求.

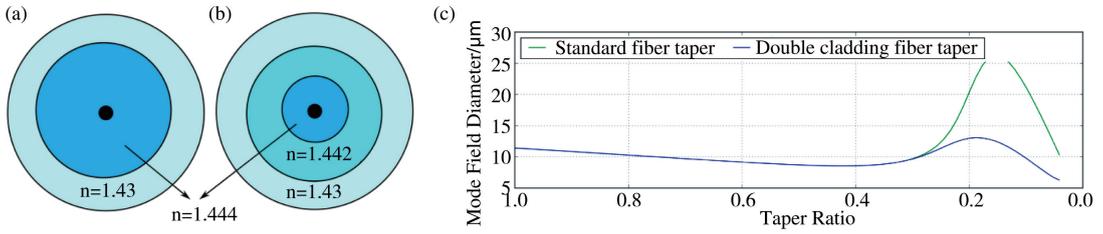


图 13 (a)具有低折射率外包层的 6 模光纤的简化结构;(b)一种改进的折射率分布光纤截面; (c)两种光纤拉锥时模场变化情况<sup>[18,19]</sup>

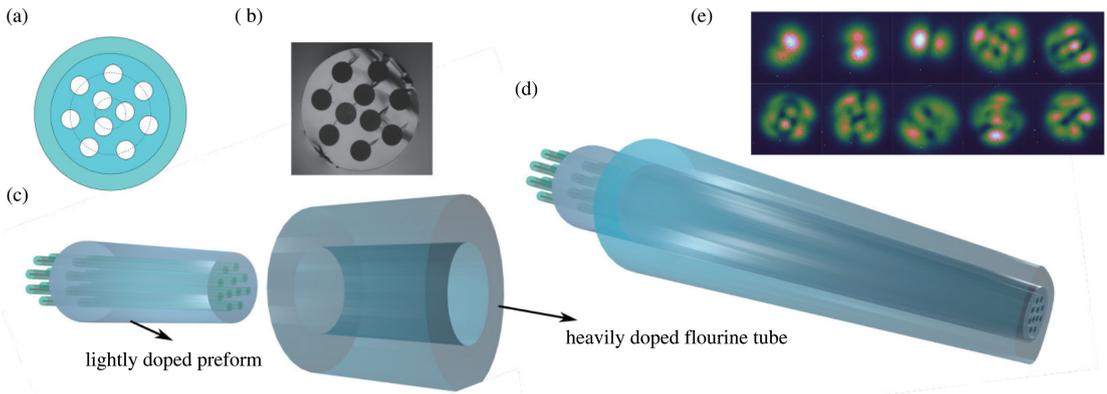


图 14 (a)所提出的两层钻孔预制件横截面,(b)实验中使用的内层钻孔预制件的端面图像(轻掺氟),(c)在第一步拉锥之后添加外层(重掺氟),(d)在第二步被锥化后的最终结构,(e)在熔接到 10 模渐变折射率光纤之前的模式强度分布<sup>[18,19]</sup>

图 14 提出的两层钻孔预制件横截面、锥化情况及输出模式强度分布情况<sup>[18,19]</sup>. 图 14(a)两层钻孔预制件横截面,图 14(b)实验中使用的内层钻孔预制件的端面图像(轻掺氟),图 14(c)在第一步拉锥之后添加外层(重掺氟),图 14(d)在第二步被锥化后的最终结构,图 14(e)在熔接到 10 模渐变折射率光纤之前的模式强度分布. 如图 14 (a)所示提出的钻孔预制件,与上述例子缓解绝热要求方面有一些相似之处. 打孔可以保证 10 条光纤的精确空间排列,与单孔管相比,降低了制造的复杂性. 内部结构为轻度掺氟,导致折射率比光纤包层略低. 所述的外部结构是重掺氟的,具有比所述内部结构低的折射率. 在锥化过程中,光纤模式依次被纤芯、光纤包层、最后是轻掺氟层所引导.

上述光子灯笼制作需要两步操作,首先,如图 14(b)所示,将 10 条相同的 6 模渐变折射率光纤插入微结构钻孔预制件中,然后以 1/2.4 的比率绝热锥化. 钻孔预制件轻掺氟,折射率为 1.442,低于约 1.444 的光纤包层折射率. 预制件的直径为  $780 \mu\text{m}$ ,经过第一步锥化后缩小为  $325 \mu\text{m}$ . 预制件的 10 个孔排列在内外两个圆环中,每孔直径为  $130 \mu\text{m}$ . 内环直径为  $203 \mu\text{m}$ ,包含 3 个孔洞,外环直径为  $528 \mu\text{m}$ ,包含 7 个孔洞. 经过第一步锥化后,所有的纤芯仍然可以引导基本模式. 在第二步锥化中,将预制体插入到折射率为 1.43 的重掺杂氟管中,如图 14(c)所示,重掺氟管的内径约为  $350 \mu\text{m}$ ,厚度约为  $280 \mu\text{m}$ ,然后整个结构按 1/16 的比例变细,见图 14(d),此时,轻掺杂内层预制件的直径锥化为  $20.2 \mu\text{m}$ ,它成为新的纤芯.

图 15 是 10 模式光子灯笼特性测量图<sup>[18,19]</sup>. (a)连接到短的 10 模渐变折射率光纤后的光子灯笼的模式强度分布,(b)用于测量 MDL 的实验装置,(c)覆盖 C 和 L 波段的一对 10 模光子灯笼的 MDL,两个光子灯笼是按照上述工艺制作的. 在光子灯笼熔接到短的 10 模渐变折射率光纤[图 14(e)]之前和[图 15(a)]之后的模式强度分布. 位于内环的光纤激发模是  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  (两个图中的前三个强度分布图)的混合体. 在锥化过程中,来自内环的模式与其它模式相比,在较高的折射率范围内传播,从而使其演化为低阶模式,来自外环的模式主要是高阶模式( $LP_{21}$   $LP_{02}$   $LP_{31}$  和  $LP_{12}$ )的叠加.

接下来,对光子灯笼的插入损耗 IL 和模式相关损耗 MDL 进行了表征. 一个灯笼的 IL 在 0.6-2 dB 范围内,第二个灯笼的 IL 在 1.2-4 dB 的范围内. 第二个灯笼 IL 较高的主要原因是在二次锥化开始时出现了一个小扭结,采用更稳定的锥化平台可以避免这一现象的发生. 为了测量 MDL,通过一根短的 10 模光纤将两

个光子灯笼连接在一起,使用波长扫描干涉仪测量整个 C 和 L 波段的传输矩阵. 实验装置如图 15(b)所示,从扫描激光光源发出的光被分成两个分支,信号光和参考光. 在信号支路中,多路偏振复用器(POL. Mux)确保以相同的功率发射两个正交极化信号. 为了在时域内区分输入输出响应,在一对光子灯笼的输入和输出处增加了光纤延迟. 对完整的  $20 \times 20$  (20 个矢量模式)幅度和相位矩阵的测量使得使用奇异值分解方法(SVD)进行 MDL 计算成为可能. 在图 15(c)给出了 C 波段和 L 波段范围 10 模光子灯笼链路的 MDL 值为 6-7 dB. 考虑到这两个光子灯笼的插入损耗 IL,估算出较好的光子灯笼的 MDL 约为 2 dB.

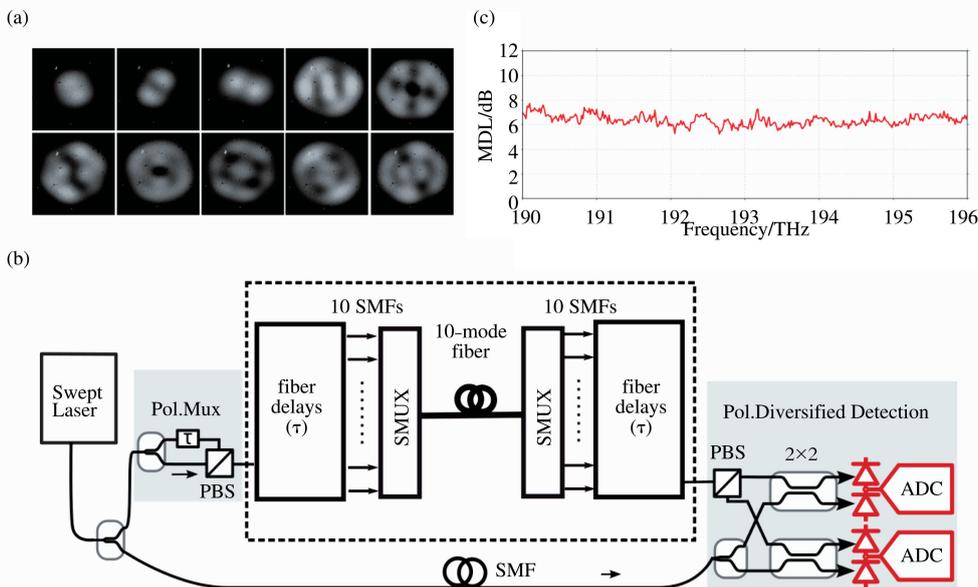


图 15 (a)连接到短的 10 模渐变折射率光纤后的光子灯笼的模式强度分布;(b)用于测量 MDL 的实验装置;  
(c)覆盖 C 和 L 波段的一对 10 模光子灯笼的 MDL<sup>[18,19]</sup>

### 3.5 基于堆叠拉锥法的可扩展 15 光纤-模式(组)选择光子灯笼结构与特性

文献[20,21]采用堆叠拉锥法制作了 15-模式光子灯笼,可扩展到更多模式选择 PL. 图 16 描绘了一个全光纤 PL 和 9 个 LP 模式(考虑简并模式,共 15 个 LP 模式),图 16(a)用 15 条光纤制作的光子灯笼的图例,图 16(b)用该光子灯笼 PL 所能达到的理论 PL 光纤模式,这些模式可以使用 15 条具有合适尺寸和毛细管内正确位置的光纤来生成<sup>[20,21]</sup>.

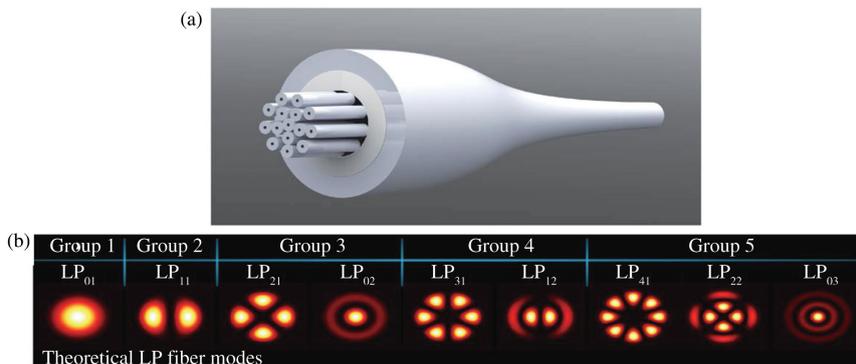


图 16 全光纤光子灯笼 (a)用 15 条光纤制作的光子灯笼的图例;(b)用该光子灯笼 PL 所能达到的理论 PL 光纤模式<sup>[20,21]</sup>

3.5.1 制造光子灯笼 PL 的微结构预制件. 图 17 是阶全光纤光子灯笼的单模光纤分布<sup>[20,21]</sup>. 图 17(a)10 条光纤和 15 条光纤的光子灯笼 PL 结构所需的光纤点阵配置,图 17(b)是用于制造 PL 的微结构预制件,图 17(c)是 PL 制造组装的微结构预制件端面的显微镜图像.

制造 PL 的微结构预制件可扩展支持更高阶模式 PL 将涉及到更多的单模光纤,可以通过耦合矩阵计算来估计激发给定 FMFs 所支持模式所需的独立光斑的精确空间分布. 考虑到在 FMFs 中所需要激发的  $LP_{lm}$  光纤模式,就必须为 PL 安排必要的光纤纤芯分布. 例如,图 17(a)描述了具有 10 和 15 条单模光纤的 PL 所需的光斑点分布. 如图所示,对于径向因子  $m$  的每个值,纤芯阵列中都需要一个纤芯环. 每个环由  $2L_{Max,m} + 1$

1 给出光纤数目,其中  $L_{Max,m}$  是方位角因子(L)的最大值,因此对于每个  $m$  的值,光纤的位置包括每个非简并模式的一个点和每个简并模式的两个点.虽然可以很容易地确定光纤的分布,但通过传统的光纤堆积不能得到特定的光纤排列.因此,用于支持高阶模式的 PL 的光纤定位成为一项特别具有挑战性的任务.

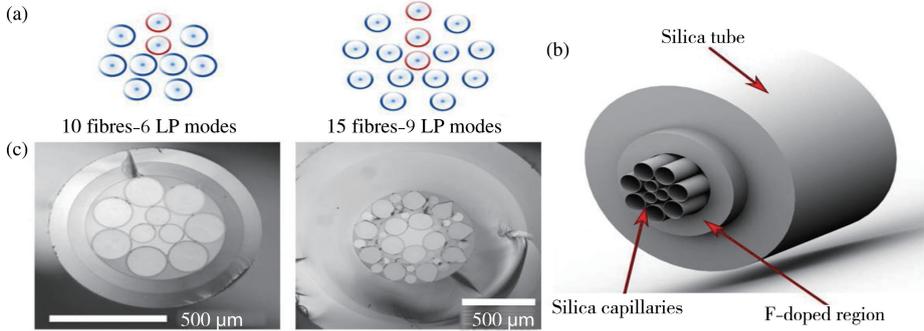


图 17 高阶全光纤光子灯笼的单模光纤分布 (a)10 条光纤和 15 条光纤的光子灯笼 PL 结构所需的光纤堆叠点阵配置;(b)图示用于制造 PL 的微结构预制件;(c)PL 制造组装的微结构预制件的显微镜图像<sup>[20,21]</sup>

为了避免在毛细管内分配光纤的问题,使用了微结构预制件,允许将 10 和 15 条光纤保持在所需的位置.如图 17(b)所示,预制件是在掺氟管内堆叠人工合成的二氧化硅毛细管而制成的.这种结构随后被拉伸以获得所需的大小,以使单模光纤进入每个毛细管.使用薄壁合成的石英玻璃毛细管(内外径比  $ID/OD > 0.95$ ),以尽量减少在光纤周围添加额外二氧化硅层的影响,这有助于保持相邻 SMF 核心之间的距离.

10 条光纤预制体结构包括一个由三条毛细管( $ID = 110 \mu m$ )组成的中心阵列,呈三角形排列,周围有一个由七条毛细管组成的环( $ID = 170 \mu m$ ),该结构包含在  $\Delta n \approx -15 \times 10^{-3}$  的低折射率掺氟毛细管(指的是包围 10 个毛细管的掺氟管)中.15 条光纤预制体的结构是由 9 条和 5 条毛细管( $ID = 145 \mu m$ )组成的两个同心圆阵列,位于低折射率掺氟毛细管内, $\Delta n \approx -3 \times 10^{-3}$ .额外的二氧化硅棒被包括在这个预制件中,以填补额外的空气间隙,中央区域保持不受阻碍,以便容纳第 15 条单模光纤,得到的 10 和 15 条光纤预制件外径分别约为  $900 \mu m$  和  $2 \text{ mm}$ .掺氟毛细管的折射率差导致 10 条光纤预制件的数值孔径 NA 为 0.207,15 条光纤预制件的 NA 为 0.093.以这种方式制造的微结构预制件的光学显微镜照片如图 17(c)所示,一旦这些预制件被拉伸到所需的尺寸,所需的光纤就可以被插入每个毛细管.

3.5.2 光子灯笼 PL 的结构.通过选择合适的 SMF 芯径、光纤在毛细管中的位置以及合适的锥形参数,可以成功地用 10 和 15 条光纤制备模式选择的 MSPL,模式选择性限制了对每个支持的 LP 模式使用不同的纤芯直径.由于 LP 模的简并性(LP<sub>0m</sub> 除外),MSPL 的结构需要两个相同的光纤来激发相应的两个简并模式.这些具有相同芯径的光纤被放置在预制件垂直对称轴两边的对称位置,而具有不同直径(旨在激发 LP<sub>0m</sub> 模式)的光纤沿着预制件的垂直对称轴放置(图 2(a)中的红色轮廓).为了最大限度地减少模式混合,预制件中使用的纤芯直径被选择为不同 LP 模式的芯径至少相差  $2 \mu m$ .另外,使用渐变折射率光纤(GIF,  $\Delta n = 16 \times 10^{-3}$ ),因为这些光纤在短传播距离内表现出基模到高阶模的低耦合.此外,GIF 的使用为锥形结构提供了更短的拉锥过渡段,从而产生了短小和低损耗的器件,用于这些器件的所有光纤都是在自己制造的.

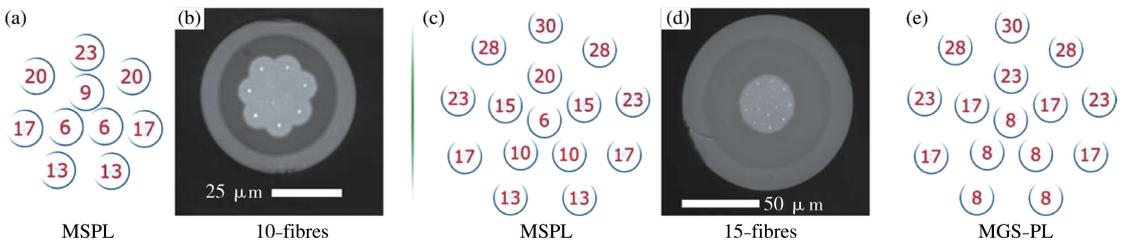


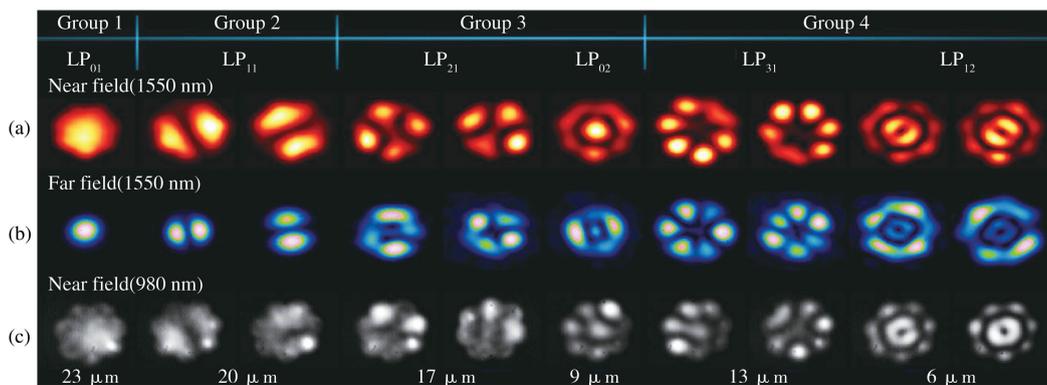
图 18 用于构建 PL 的光纤芯径和位置,模式选择 PL 由(a)10 和(c)15 条光纤组成;模式组选择 MGS-PL (e)由 15 条光纤组成;切割后的 MSPL 端面的显微镜图像:(b)10-和(d)15-光纤<sup>[20,21]</sup>

图 18 是用于构建 PL 的光纤芯径和位置<sup>[20,21]</sup>.模式选择 PL 由图 18(a)10 和图 18(c)15 条光纤组成,模式组选择 MGS-PL(e)由 15 条光纤组成,切割后的 MSPL 端面的显微镜图像:图 18(b)10-和图 18(d)15-光

纤. 采用图 18(a) 芯径和位置用十条光纤制成的 10-光纤 MSPL 器件能够产生  $LP_{01}$ 、 $LP_{11}$ 、 $LP_{21}$ 、 $LP_{02}$ 、 $LP_{31}$  和  $LP_{12}$  模式. 为了产生这些模式并获得模式选择性, 设备中使用的光纤芯直径分别为 23、20、17、9、13 和  $6 \mu\text{m}$  (对应前面列出的每种 LP 模式). 获得 10 光纤 PL 的工艺参数为: 锥化变细比为 16, 过渡区为 5.75 cm. 在锥形过程中, 得到了一个支持 6 种 LP 模式的器件, 它的芯核尺寸为  $27 \mu\text{m}$ , 外径为  $50 \mu\text{m}$ . 同样, 采用图 c 芯径和位置用 15 条光纤可构成 15 光纤-模式选择 PL, 以 20 倍的锥度和 6 cm 的过渡长度进行 PL 加工, 得到的结构具有  $35 \mu\text{m}$  的芯径和  $105 \mu\text{m}$  的外径. 得到的 15-光纤 MSPL 允许产生  $LP_{01}$ 、 $LP_{11}$ 、 $LP_{21}$ 、 $LP_{02}$ 、 $LP_{31}$ 、 $LP_{12}$ 、 $LP_{41}$ 、 $LP_{22}$  和  $LP_{03}$ , 分别用 30、28、23、20、17、15、13、10 和  $6 \mu\text{m}$  芯径的光纤激发. 对所产生的多模结构的端面的访问是通过在锥形器件的腰部部分进行劈断来实现的, 被劈断的端面的显微镜图像在图 18(b) 和 (d) 中.

模式组选择性光子灯笼(MGS-PL)也是使用堆叠法微结构预制件方法制造的, 这些器件也用作空分复用(SDM)应用的模式多路复用器. 在这些 PL 中, LP 模式被分成组并与其他传播模式保持隔离, 尽管可以在同一组内的模式之间发生混合. 使用设计用于容纳 15 条光纤的预制件, 可以获得模式组选择性支持 LP 模式的光子灯笼, 该结构的处理是在保留用于 15 条光纤 MSPL 的锥度参数的情况下完成的. MGS-PL 使用五种不同的芯直径的光纤构建, 每个模组一个芯径: 30、28、23、17 和  $8 \mu\text{m}$ , 对应于模组 1、2、3、4 和 5, 这类器件的光纤芯分布及芯径如图 18(e) 所示.

3.5.3 PL 表征和光谱响应. 图 19 和图 20 分别显示了来自 10 光纤和 15 光纤 MSPL 的输出模式强度分布图, 输入  $\lambda=1550 \text{ nm}$  的光波 (a) 近场和 (b) 远场模式强度分布图; (c) 输入  $\lambda=980 \text{ nm}$  激光时的近场模式强度分布图; 图 21 所示是 MGS-PL 输入  $\lambda=1550 \text{ nm}$  观察到近场模式强度分布图<sup>[20,21]</sup>. 通过观察近场和远场模式强度分布, 可分析制作器件输出处的模式强度分布图. 来自以  $1550 \text{ nm}$  波长为中心的超发光二极管的宽带光源 ( $50 \text{ nm}$  光谱宽度) 耦合到每个输入光纤中, 使用  $50\times$  显微镜物镜和红外相机对近场强度模式图进行观察. 为了进行彻底的表征, 在移除显微镜物镜时观察到了两个 MSPL 的远场模式强度分布, 还从  $980 \text{ nm}$  激光二极管发射光通过 MSPL 的输入光纤来评估波长依赖性.



注: (a) 近场和 (b) 远场在  $\lambda=1550 \text{ nm}$  处的模式强度分布图; 注意, 简并模式 ( $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{31}$ ,  $LP_{12}$ ) 可以通过在相应的输入光纤中入射光独立地激发; (c) 使用  $\lambda=980 \text{ nm}$  的激光二极管获得的相同器件的近场模式强度分布.

图 19 用 10 光纤模式选择光子灯笼获得的模式强度图案<sup>[20,21]</sup>

一般而言, 由于在锥化过程后产生的 PL 芯的几何形状, PL 的模式图显示出圆形形状特征. 当毛细管塌陷填充光纤之间的气隙时会出现这种情况, 并且在制造具有较少数量的光纤的 PL 过程中也观察到了这一点. 关于远场模式强度分布, 这些演变成为在 PL 中激发的相应模式的预期光图案, 这对于两个 MSPL 的低阶模式来说更加明显, 正如将  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模式与图 16 中所示的模式进行比较时所看到的那样.

如图 20 所示, 当将光入射到相应的输入光纤中时, 可获得每个 MSPL 的所有估计的 LP 光纤模式, 对应于相同的 LP 模式的两个简并模式的激发也使用具有相同芯径的光纤成功地实现, 但是位于预制件内的对称位置. 这仅对于使用 10 光纤器件获得的场强模式剖面显示 (见图 19), 而对于 15-光纤 PL 器件, 演示了所有不同 9 个 LP 模式的产生. 在这种情况下, 两种模式强度图具有完全相同的强度分布, 但显示出旋转, 因此在强度图案中的最小值和最大值的空间位置之间切换.

10-光纤 MSPL 需要强调的一点是, 与用于  $LP_{31}$  的芯径相比, 用于激励  $LP_{02}$  的芯径需要更大的芯径. 通

常,与用于激励LP<sub>02</sub>模式的相比,LP<sub>31</sub>模式的激励将需要更小的芯径,并且固有的传播常数更低.然而,10-光纤 MSPL 器件这两模式对应芯径的情况是相反的,LP<sub>02</sub>模式需要具有较小纤芯的光纤,这是因为微结构预制件包含中心光纤的不同光纤包层.这导致了光纤芯之间的不同距离进而影响光耦合条件,从而影响 MSPL 传播模式的演化.

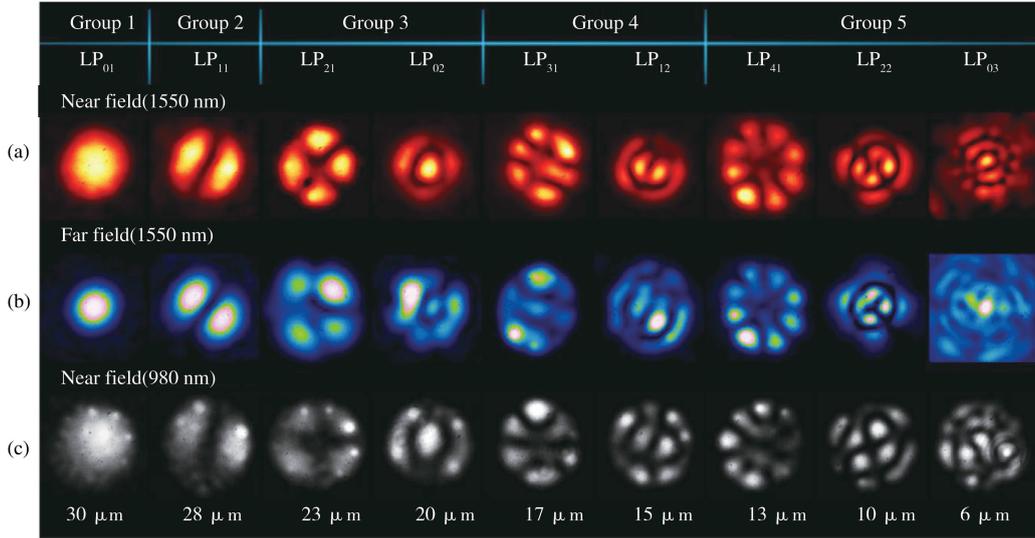


图 20 用 15 光纤模式选择光子灯笼获得的强度分布图案在  $\lambda=1550\text{ nm}$  处的(a)近场和(b)远场模式强度分布图; (c)使用  $\lambda=980\text{ nm}$  的激光二极管获得的相同器件的近场模式强度分布图<sup>[20,21]</sup>

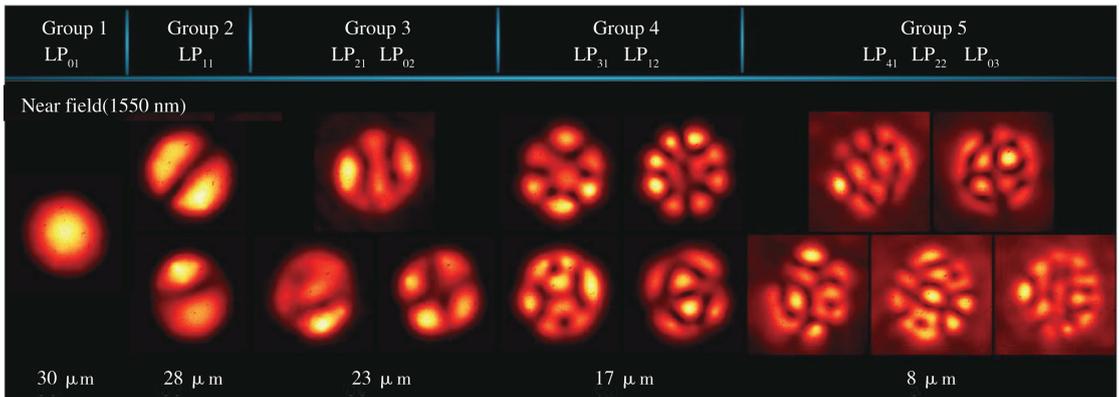


图 21 使用 15 条光纤制造的模式组选择性光子灯笼在  $\lambda=1550\text{ nm}$  时的近场模式强度分布<sup>[20,21]</sup>

MGS-PL 产生的模式强度分布图表现出模组内 LP 光纤模式及其简并模的叠加引起的明显模式混合.这种效果在模式组 2、3 获得的光图案中可以容易地观察到,并且在模式组 4 和组 5 中更明显(见图 21).尽管存在这种模式混合,但这些 PL 可能适用于模式混合在某种程度可接受的应用,并且进一步减少制造所需光纤的多样性.

将 980 nm 光源发射到 MSPL 中时,输出强度分布与在  $\lambda=1550\text{ nm}$  的获得的模式强度分布相似(见图 19c 和 20c).然而,对于高阶模式,所需的模式强度分布图已被很好地定义,而低阶模式显示出存在于弱耦合光纤芯中的典型特征,其中包含由纤芯内残余光产生的独立光点,这种强度模式分布图类似于激发所需 LP 模式所需的超模.这表明这些器件将表现出波长依赖性,特别是针对较长波长进行了优化的锥度比.注意,当产生高阶模时,这种效应会减小,因为在 MSPL 中激发这些 LP 模所需的纤芯直径较小.一旦锥形加工完成,较小的纤维芯直径就不能再引导光波.因此,必须合适地选择器件的几何结构,以便在所需波长下正常工作,尽管如此,这些结果证明了 MSPL 的宽带操作,这对于 MSPL 的几个应用来说是一个理想的特征.

制造的器件内的光纤分布成功地产生了所需的 LP 模式,然而,一个有趣的特征在于探索制造过程中的不同配置和变化.由于分配光纤分布的大量可能性和芯径的变化(与不同的传播常数相关联),这可能导致大量可能的响应.然而,它们中的大多数将产生由纯 LP 模式的混合组成的输出强度分布图案,为了举例说明

这种现象,制造了一对 10-光纤 MSPL,但在用于上述设备的光纤配置上略有变化。

### 3.5.4 MSPL 的模式强度分布剖面与模式选择性.

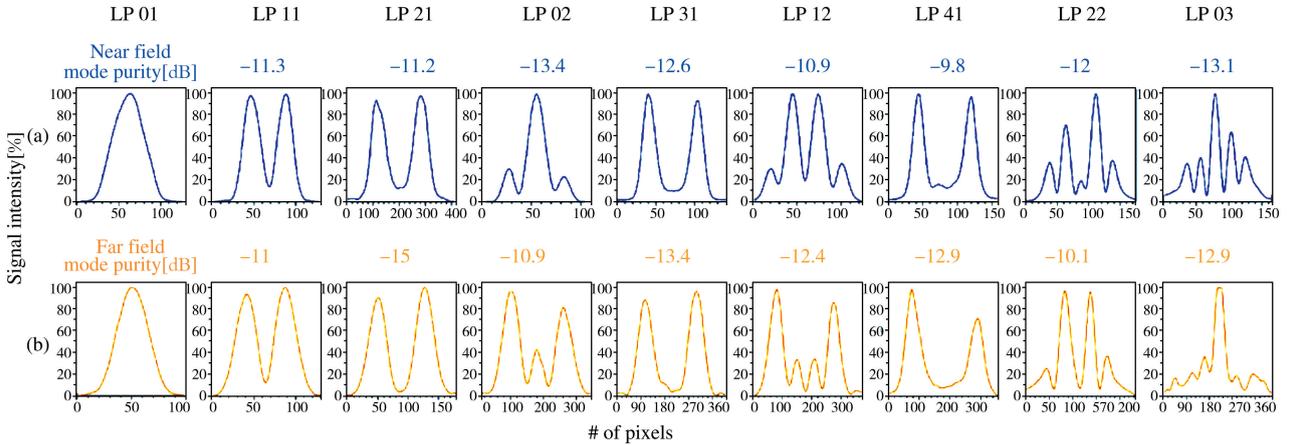
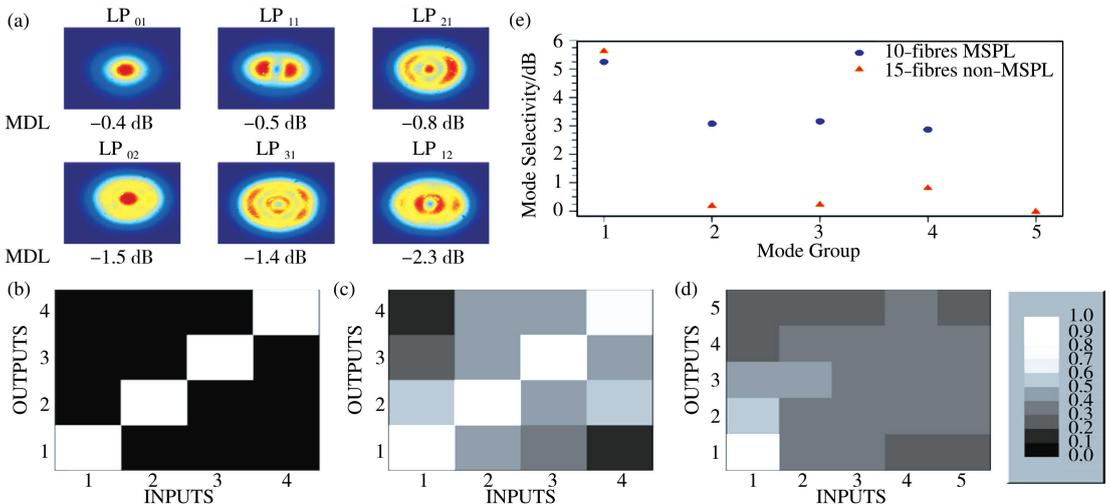


图 22 模式强度分布剖面图 (a)用于 MSPL 的模式强度分布图的近场和(b)远场及其各自的模式纯度<sup>[20,21]</sup>

通过测量 MSPL 的近场和远场模式分布剖面图空间分布上的最小强度与最大强度之间的比值来获得模式纯度,图 22 显示了从近场和远场图案获得的典型强度分布及其相应的模式纯度<sup>[20,21]</sup>,模式强度分布剖面图紧密地跟随每个激发模式所期望的空间强度分布.此外,在传播过程中,场的演化保持了空间强度分布,尽管 LP<sub>02</sub> 和 LP<sub>12</sub> 模式的强度峰值有明显变化,这仍表明模式保持效应。

与其他技术相比,全光纤光子灯笼的一个显著特点是损耗最小,若锥形过程是完全绝热的,那么这些 PL 装置是无损耗的,10-光纤 MSPL 的插入损耗测量值在 0.1-0.25 dB 范围.同样,对于 15-光纤 PL,测量了前四个模式组的损耗约 0.5 dB,而对于最后一个模式组,损耗记录在 1-2 dB 范围内.在这种情况下,第五模式组记录的更高损耗主要是由于波导结构的数值孔径降低,导致光限制性差,在微结构预制件上使用足够低折射率毛细管可以改善这一点.值得一提的是,随着模数的增加,PL 的制造复杂度也随之增加,此外,高阶模式更容易受到微扰影响,因此在制造过程中的微小缺陷可能导致扰动。

所有光子灯笼的一个主要特点是易于集成到光纤系统中进行光或信号传输,特别是,对于 SDM 应用,目标是将所需的 LP 模式入射到 FMF 中.PL 的纤芯与传输光纤之间的充分配对是成功对准的关键因素,并最终激励 FMF 支持的所有模式.将光子灯笼耦合和熔接到传输光纤上是评估 PL 的集成能力以及它们在光纤系统中性能的一个典型的测试,在 PL 熔接到传输 FMF 上时,可评估传输光纤每个支持模式的激励和传输能力。



注:(a) 6-LP 模式 FMF 熔接到 10-光纤 MSPL 的近场模式强度分布图,以及典型的 MDL 结果;(b) 理想的 10-光纤 MSPL;(c) 实验的 10-光纤 MSPL;(d) 无模式选择性的 15-光纤 PL 的模式组中的归一化光强;(e) 具有模式选择性(10-光纤 MSPL)和没有模式选择性(15-光纤非 MSPL)的光子灯笼之间的模式选择性比较。

图 23 PL 的光纤熔接响应和模式选择性分析<sup>[20,21]</sup>

图 23 是 PL 的光纤熔接响应和模式选择性分析<sup>[20,21]</sup>,将 10-光纤 MSPL 熔接到 2 m 长、低 DGD 的 6-LP FMF 上,FMF 外径为 125  $\mu\text{m}$ ,芯径为 28  $\mu\text{m}$ .图 23a 显示了 FMF 输出处记录的近场模式强度分布图,每个模式的典型耦合损耗(MDL)也包括在内.一般而言,低阶模式在通过 FMF 熔接和传播后表现出对模式强度分布图的良好保持,相反,对于高阶模式,观察到一些模式混合.还请注意,随着模式组的增加,损耗也会增加,在这种情况下,PL 和 FMF 之间的折射率分布和 NA 的不匹配产生模式重叠的差异,从而导致模式耦合.这增加了除了光纤的固有 MDL 之外的高阶模式的 MDL,使用具有适当的纤芯几何形状和渐变折射率截面的 PL 将改善 MDL.

由于 15-光纤 PL 的数值孔径 NA 较低,该 PL 的最终直径仅限于 35  $\mu\text{m}$  的芯尺寸,这样,由于 9-LP FMF(30  $\mu\text{m}$  芯直径)大部分纤芯失配和 NA 差异较大,无法直接熔接 15-光纤 PL 和 9-LP FMF,为了规避这一限制,采用中间标准 MMFs(50  $\mu\text{m}$  芯直径和渐变折射率分布)进行纤芯匹配,为了减小芯径和匹配 9-LP FMF 芯的尺寸,对 MMF 进行了锥形化处理,同时也限制了不必要模式的传播,尽管如此,FMF 输出处的模式强度分布展示模式混合,测量 MDL 值约 5 dB.

在将成对的光子灯笼熔接到 FMFs 的两端后,可将 PL 作为复用解复用 MUX/DEMUX 设备进行表征.将来自具有空间多样性的扫描波长干涉仪(SWI)的光发射到多路复用器 MUX 的每个输入光纤中,测量 DEMUX 每个输出光纤的输出功率.这种安排允许沿着整个 C 波段和 L 波段获得传输矩阵,通常用于光纤通信.传输矩阵绘制了用于 MUX/DEMUX 目的的 PL 输入和输出处的归一化强度,表明从光子灯笼 MUX 发送到每个输入光纤的光是如何传输和耦合到 LP 模式或模式组的其余部分的.这种图形表示的一个重要特征是能够提供空间信道间串扰的信息以及模式混合的信息,这反过来又允许确定系统的模式选择性,定义为某模式组的功率在所有模式组中包含的总功率之间的比率.

理想情况下,具有绝对模式选择性的系统应呈现零模式混合和可忽略的串扰,因此,对于仅显示模式组内模式混合的理想 MSPL 和 FMF,在任何单个光纤上发射的总功率将仅均匀分布在对应的同一模式组光纤之间(见图 23(b)).相反,对于一个完全没有模式选择性的系统,在任何输入光纤上发射的光将均匀地分布在所有输出光纤中.

为了比较不同的场景,研究了两种情况:一种是使用模式选择光子灯笼的系统(10 光纤 MSPL),另一种系统没有任何模式选择性的 PL(15-光纤非 MSPL).按照前面描述的步骤,使用相同的光纤(13  $\mu\text{m}$  芯径)制备了没有模式选择性的 PL.使用相同的光纤制备的 PL,其输出光图案是所有支持的模式的正交组合.两种情况下得到的转移矩阵如图 23(c)和(d)所示.如图所示,对于模式选择情况,光大部分包含在中心对角线中,而没有模式选择性的转移矩阵显示光在所有支持的模式组中传播.在评估所需模式中的测量功率与模式组中所有剩余模式的测量功率之比后,可以估计 MUX/DEMUX-FMF 系统的模式选择性.这两种制造器件的这个参数的比较如图 23(e)所示.对于第一个模式组(LP<sub>01</sub>),两个 PL 在模式隔离方面表现出相似的性能.然而,对于其余的模式组,与非模式选择系统相比,模式选择系统在模式组中保留了两倍的功率.当采用具有与 FMF 更好匹配核心的 PL 时,可以进一步改善该性能.对于高阶模式组,MSPL 系统明显表现出更好的模式选择性性能,因此,对于具有非模式选择性 MUX/DEMUX 的系统,模式串扰将在传输期间发生,特别是对于高阶模式.

### 3.6 基于激光刻写的光子灯笼结构与特性

光子灯笼模式选择性是通过使用不同的单模光纤引入不对称来实现的,这样每个单模输入光纤在多模输出处映射到特定模式.然而,光纤光子灯笼是通过堆叠和拉伸光纤手工制作的,不同芯尺寸和折射率所需的光纤数量与模式数量成比例.相比之下,用超快激光刻写制作的集成光子灯笼可以一步一步地简单制作出来.此外,通过简单地改变激光刻写参数,从而改变单模波导的尺寸和折射率对比度,进而引入不对称性来实现模式选择性,文献[22,23]展示了一个基于刻写激光波导的集成光子灯笼.

文献[23]展示了一个 6 模集成模式组选择光子灯笼,图 24(a)是模式组选择性 6 模光子灯笼示意图,插图显示了端面的显微镜图像;(b)是将 1550 nm 光注入单个单模波导输入而在少模复合波导处输出的近场模式强度分布图.这个 70 毫米长的装置由 6 条波导组成,6 个单模波导以线性阵列的形式排列在输入端,以匹配 127  $\mu\text{m}$  间距的光纤阵列.重新映射到具有中心波导的五边形后,波导在 50 mm 长度上逐渐过渡转变到有一个中心波导的 8  $\mu\text{m}$  半径五边形,形成复合少模波导,如图 24(a)所示.与之前 3 模式光子灯笼的报

告<sup>[24]</sup>不同,对刻写参数和玻璃基板的仔细选择导致在输出端形成均匀的多模波导,没有负折射率对比区域(见图 24 (a)的插图),负折射率会限制输出处单个波导的填充密度.采用狭缝方法(1 kHz 重复频率, 800 nm, 120 fs)将单程波导刻写到 SchottAF-45 玻璃中,脉冲能量分别为 1300 nJ(LP<sub>02</sub>), 1350 nJ(LP<sub>21</sub>), 1400 nJ(LP<sub>11</sub>)和 1450 nJ(LP<sub>01</sub>).图 24 (b)显示了将 1550 nm 光注入单个单模波导而成像的输出近场模式强度分布图,这些器件是未来超高带宽通信网络的有希望解决方案.

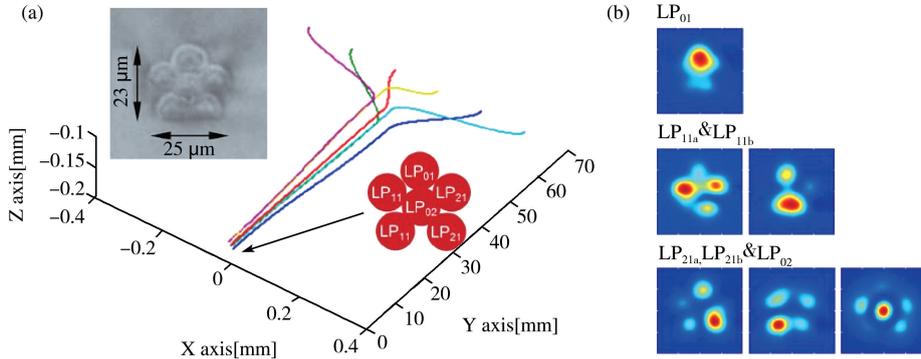


图 24 (a)模式组选择性 6 模光子灯笼示意图,插图显示了端面的显微镜图像;(b)通过将 1550 nm 光注入单个单模波导输入而在少模复合波导处输出的近场模式强度分布图<sup>[23]</sup>

综上所述,光子灯笼能够实现少模信号的复用或解复用,可分为常规标准光子灯笼、模式(组)选择光子灯笼.光子灯笼可采用单模光纤或者多模光纤绝热拉锥形成,也可采用飞秒激光刻写波导形成,可与常规光纤通信系统集成.但是,光子灯笼涉及的模式(组)数目越多,模式(组)选择性越差,模式(组)间的串扰越大,光子灯笼器件的尺寸相对越大.

#### 4 定向耦合的模式复用器结构与特性

文献[25]提出了一种基于定向耦合的模分复用器,其中的模式通道采用同种阶跃折射率纤芯,纤芯-包层折射率差为 0.01.在 C 波段,模式 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub>和 LP<sub>02</sub>的平均耦合效率约 -1.82 dB,各模式的消光比约 20 dB.文献[26]提出了基于全光纤模式复用器的模分复用-波分复用传输实验,其中波分复用采用 32 个波长通道,每个通道间隔 100 GHz,每个通道携带 3 个模式(LP<sub>01</sub>模式和两个兼并 LP<sub>11</sub>模式)的 120 Gb/s 偏振复用正交相移键控(PDM-QPSK)信号,传输距离超过 560 Km 的少模光纤(FMF),在 C 波段范围内全光纤模式复用器的 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub>模式耦合效率为 60%-80%(-2.218-0.969 dB),LP<sub>01</sub>与 LP<sub>11</sub>模式的消光比约 10-17 dB.

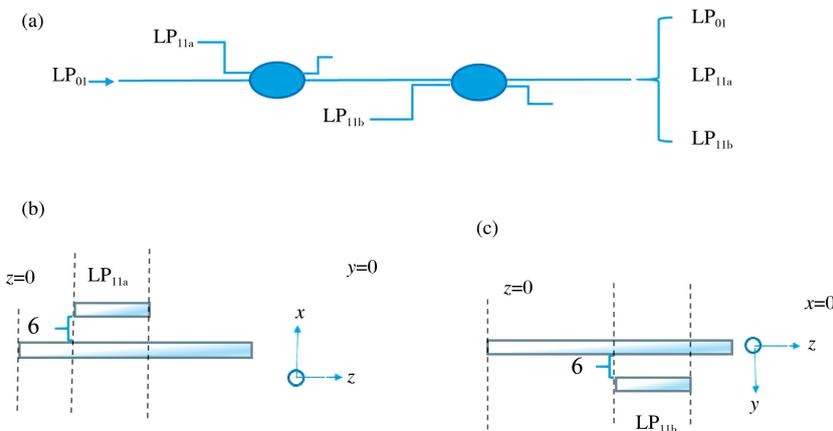


图 25 复用器整体结构图(a),主传输信道横截面  $x$  方向(b)和  $y$  方向(c)结构示意图<sup>[27]</sup>

本课题组提出了一种采用定向耦合结构的模式复用器<sup>[27]</sup>,其模式传输信道均采用相同的渐变折射率纤芯、纤芯中心采用纯二氧化硅材料降低损耗;模式间大有效折射率差(大于  $0.5 \times 10^{-3}$ )有效降低模式串扰,提高模式消光比.在 1400-1700 nm 波段,耦合效率优于 -0.479 dB,消光比高于 31.2 dB,比文献[25]中的模式消光比 20 dB 高出 11.2 dB,且波长范围更广;比文献[26]中 C 波段模分复用器的最大消光比 17 dB 高出 14.2 dB.图 25 所示的是我们提出的复用器整体结构(a)、主传输信道横截面  $x$  方向(b)和  $y$  方向(c)的结构

示意图<sup>[27]</sup>.该复用器包含三个相同的传输信道,其中一个作为主传输信道.综合考虑模式信道耦合长度、信道间距以及耦合效率变化情况,模式 LP<sub>01</sub>直接输入主传输信道,以避免模式 LP<sub>01</sub>信道耦合长度过长导致的耦合损耗大、器件尺寸大的问题.模式 LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>信道分别放置在主传输信道横截面  $x$  和  $y$  方向上,信道长度均为 33 mm,与主信道的间距均 6  $\mu\text{m}$ ,通过以上设置保证复用器的高耦合效率和合理耦合长度.

图 26(a)和(b)分别表示宽带和 C 波段三个独立模式信道的耦合效率随入射波长的变化情况<sup>[27]</sup>,图中带星号、圆圈和正方形的实线分别为 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道耦合效率随入射光波长的变化情况;图 26(a)对应 1400 nm 到 1700 nm 波长范围,图 26(b)对应 C 波段情况.图 26(a)表明:LP<sub>01</sub>模式信道的耦合效率随入射光波长的增加而减小;LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道的耦合效率在 C 波段较高,其耦合效率在 C 波段外随入射光波长的增加或减小而减小;LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道的耦合效率变化几乎一致;LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道的耦合效率在独立信道和复用器中相同,这是因为 LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>的相位正交的简并模式,复用器中 LP<sub>11b</sub>模式信道不会影响模式 LP<sub>11a</sub>的传输;LP<sub>01</sub>模式信道的耦合长度远大于 LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道的耦合长度,直接打入复用器中心信道的 LP<sub>01</sub>模式,在传输过程中会有部分功率耦合到 LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道,导致复用器中 LP<sub>01</sub>模式信道的耦合效率小于其在独立信道中的耦合效率,随波长增加而减小;由图 26(a)可知:在 1400 nm 到 1700 nm 波长范围,复用器 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道耦合效率优于 -0.479 dB;由图 26(b)可知:在 C 波段,复用器所有模式信道耦合效率的最大值和最小值差均不超过 0.056 dB,模式信道耦合效率随波长的变化呈现出平坦特性,复用器所有模式信道平均耦合效率优于 -0.140 dB,比文献<sup>[25]</sup>复用器平均耦合效率 -1.82 dB 好,比文献<sup>[26]</sup>复用器最好耦合效率 -0.969 dB 优.

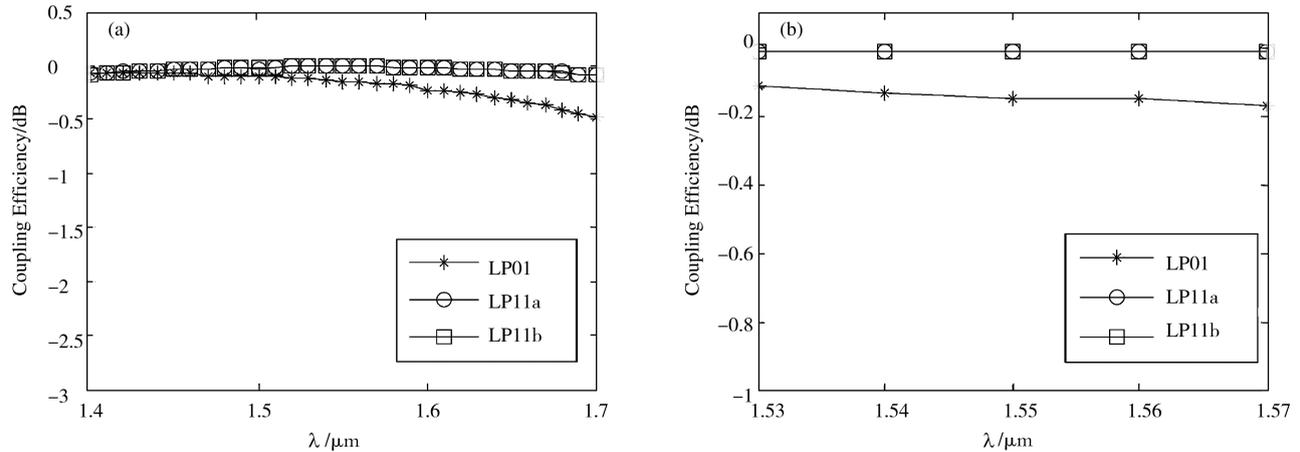


图 26 复用器的耦合效率在较宽波段(a)和 C 波段(b)随入射光波长的变化<sup>[27]</sup>

消光比是除耦合效率外衡量复用器性能的重要因素,消光比定义为模式耦合的功率最大值除以该模式在该点处耦合到其他模式的最大值.图 27 所示为复用器的 3 种模式信道的消光比随入射光波长的变化,其中带圆圈和四方框的实线分别为 LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道的消光比随入射光波长的变化,星号表示 LP<sub>01</sub>模式信道在各个波长点的消光比,实线为 LP<sub>01</sub>模式信道的消光比拟合曲线<sup>[27]</sup>.由图 27 可知,LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式信道的消光比均大致随入射光波长的增加而减小,其中 LP<sub>01</sub>模式信道的功率耦合到 LP<sub>11a</sub>或 LP<sub>11b</sub>模式信道的大小随入射光波长变化是不平缓的,即 LP<sub>01</sub>模式信道对 LP<sub>11a</sub>或 LP<sub>11b</sub>模式信道的较低干扰是不均匀的,导致 LP<sub>01</sub>模式信道的消光比随波长变化有所波动.LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式通道的消光比是一致的,而 LP<sub>01</sub>模式通道的消光比明显高于 LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式通道的消光比.三种模式信道的消光比在 1400-1700 nm 均优于 31.2 dB,比文献<sup>[25]</sup>中的模式消光比 20 dB 高出 11.2 dB,比文献<sup>[26]</sup>中复用器最好消光比 17 dB 好 14.2 dB,这表明了复用器在 1400-1700 nm 范围内的低串扰特性.

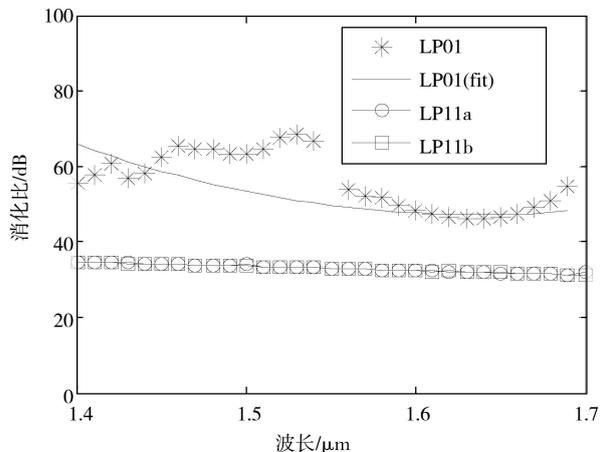


图 27 复用器的消光比<sup>[27]</sup>

## 5 结论

结合本课题组开展的模分复用方面的部分工作,比较系统、深入地分析讨论了模分复用研究过程中相对经典的部分研究工作和最新进展,涉及少模模分复用器结构设计、特性及应用.分析讨论了一种基于相位板的三模式模分复用器、基于液晶空间光调制器(LCOS-based SLM)的模分复用器、常规标准型光纤光子灯笼、模式选择光纤光子灯笼、模式组选择光纤光子灯笼、模式组选择刻写波导型光子灯笼的结构设计、特性及应用.最后,给出了本课题组近期提出的新颖的定向耦合模分复用器.模分复用(解复用)器件逐步从较大尺寸空间分立器件向小型化、集成化光纤型或者波导型器件发展,从较少模式的复用器件向较多模式的复用器件过渡,较多模式复用时从模式选择复用器件向模式组选择复用器件发展.今后的较长一段时间,采用特殊材料和传输信道结构设计来实现具有低衰减、低串扰、高消光比、高模式选择性等指标的模分复用(解复用)器件或者技术仍然是通信领域需要继续探索的研究热点.

## 参 考 文 献

- [1] D J Richardson, J M Fini, L E Nelson. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] 郑宏军, 黎昕, 白成林. 啁啾脉冲在光纤中的传输[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [3] 王潇, 郑宏军, 黎昕, 等. 模分复用系统中的少模光纤研究新进展[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2019, 4, 32(2): 69-79.
- [4] Guifang Li, Neng Bai, Ningbo Zhao, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413-487.
- [5] He Wen, Cen Xia, Amado M, et al. First demonstration of 6-mode PON achieving a record gain of 4 dB in upstream transmission loss budget[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 1990-1996.
- [6] He Wen, Hongjun Zheng, Qi Mo, et al. Few-mode fibre-optic microwave photonic links[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 8, 6, e17021, 1-8.
- [7] Nicolas Riesen, Simon Gross, John D Love, et al. Monolithic mode-selective few-mode multicore fiber multiplexers[J]. *Scientific Reports*, volume 2017, 7: 6971.
- [8] Haozhe Yan, Shangyuan Li, et al. Design of PANDA ring-core fiber with 10 polarization-maintaining modes[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(1): 1-5.
- [9] Yongmin Jung, Qiongyue Kang, et al. Low-loss 25.3 km few-mode ring-core fiber for mode-division multiplexed transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(8): 1363-1368.
- [10] Georg Rademacher, Roland Ryf, Nicolas K, et al. Long-haul transmission over few-mode fibers with space-division multiplexing[J]. *J Lightwave Technol*, 2018, 36: 1382-1388.
- [11] R Ryf, C Bolle, J von Hoyningen-Huene. Optical coupling components for spatial multiplexing in multi-mode fibers[C]. // 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, OSA Technical Digest (CD), Optical Society of America, 2011.
- [12] Sergio G Leon-Saval, Nicolas K Fontaine, Joel R Salazar-Gil, et al. Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing[J]. *Opt. Express*, 2014, 22: 1036-1044.
- [13] R Ryf, N K Fontaine, M Montoliu, et al. Photonic-lantern-based mode multiplexers for few-mode-fiber transmission[C]. // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online), Optical Society of America, 2014.
- [14] Xia C, Velazquez-Benitez A M, Liu X, et al. Demonstration of world's first few-mode GPON[J]. in *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, 2014, 1: 5-9.
- [15] Ryf R, Fontaine N K, Guan B, et al. 305-km combined wavelength and mode-multiplexed transmission over conventional graded-index multimode fibre[J]. in *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, 2014, 3: 5.
- [16] Bin Huang, Nicolas K Fontaine, Roland Ryf, et al. All-fiber mode-group-selective photonic lantern using graded-index multimode fibers[J]. *Opt Express*, 2015, 23: 224-234.
- [17] Yerolatsitis S, Gris-Sánchez I, Birks T A. Adiabatically-tapered fiber mode multiplexers[J]. *Opt Express*, 2014, 22: 608-617.
- [18] Yerolatsitis S, Harrington K, Thomson R R, et al. Mode-selective photonic lanterns from Multicore Fibres[C]. // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online), Optical Society of America, 2017.
- [19] Bin Huang, Juan Carlos Alvarado Zacarias, Huiyuan Liu, et al. Triple-clad photonic lanterns for mode scaling[J]. *Opt Express*, 2018, 26: 13390-13396.
- [20] Velázquez-Benítez A M, Antonio-López J E, Alvarado-Zacarias J C, et al. Scaling the fabrication of higher order photonic lanterns using microstructured preforms[J]. *Ecoc*, 2015, 0728.
- [21] Amado M Velázquez-Benitez, J Enrique Antonio-López, Juan C Alvarado-Zacarias, et al. Scaling photonic lanterns for spacedivision multiplexing[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 8897-8902.

- [22] Douglass G, Dreisow F, Gross S, et al. Femtosecond laser written arrayed waveguide gratings with integrated photonic lanterns[J]. *Opt Express*, 2018, 26: 1497-1505.
- [23] 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 European Conference on Lasers and Electro-Optics and European Quantum Electronics Conference, Optical Society of America, 2017.
- [24] Guan B, Ercan B, Fontaine N K, et al. Mode-group-selective photonic lantern based on integrated 3D devices fabricated by ultrafast laser inscription[C]. // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online), Optical Society of America, 2015.
- [25] Christos P Tsekrekos, Dimitris Syvridis. Symmetric few-mode fiber couplers as the key component for broadband mode multiplexing[J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32: 2461-2467.
- [26] Sun Hyok Chang, Hwan Seok Chung, Roland Ryf, et al. Mode- and wavelength-division multiplexed transmission using all-fiber mode multiplexer based on mode selective couplers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7164-7172.
- [27] Liu Qianqian, Zheng Hongjun, Li Xin, et al. Research on mode division multiplexer with graded-index distribution, low loss and low crosstalk[J]. *Optoelectronics Letters*, 2018, 14(5): 336-341.

# Research on Mode (de)Multiplexing Technology for Mode-Division Multiplexing System

DONG Qiu-huan<sup>1</sup> LIU Yang<sup>1</sup> ZHENG Hong-jun<sup>1</sup> LI Xin<sup>1</sup>  
BAI Cheng-lin<sup>1</sup> HU Wei-sheng<sup>2</sup> CHEN Nan-guang<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** In recent years, mode-division multiplexing (MDM) using few-mode fibers (FMFs) has been intensively investigated as the method to increase transmission capacity. MDM can be beyond the non-linearity Shannon limit of single-mode fibers (SMFs). Mode (de) multiplexers coupling to FMFs have drawn much attention in optical communications. Based on some of the works of our group on MDM, we systematically and thoroughly analyzes some classical research works and the latest progress on MDM, involving the mode (de) multiplexers design, characteristics and their wide applications. We firstly review and discuss some types of mode (de) multiplexers such as three mode mode-multiplexers with glass phase plates, mode-multiplexers with liquid crystal on silicon (LCOS) phase modulator, conventional standard fiber photonic lanterns, mode selective fiber photonic lanterns, mode group selective fiber photonic lanterns and mode group selective photonic lanterns with laser inscription waveguide. Then, we propose a novel mode (de) multiplexers with directional coupling. Finally, the developments trend of mode (de) multiplexers research are presented. It provides effective support for the application of MDM front-haul transmission system. Using special materials and fiber structure design to achieve low attenuation, low crosstalk, high extinction ratio, high mode selectivity in the study of mode (de) multiplexers is still our research focus for a long time.

**Key words** mode-division multiplexing; mode (de) multiplexers; few-mode fibers; photonic lanterns