

引用格式: HAN Zijian, YUAN Xiangyan. Technique and Astronomical Applications of Photonic Lanterns (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552204

韩子健,袁祥岩. 光子灯笼技术及在天文中的应用(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552204

光子灯笼技术及在天文中的应用(特邀)

韩子健^{1,2},袁祥岩^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学研究所, 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 南京 210042)

摘要:天文观测仪器的蓬勃发展推动了对小体积、低成本、高效率的新一代仪器的研究工作。近年来,集成光学元件的发展为天文技术与方法带来了新机遇,天文光子学应运而生,为天文观测提供低成本、集成化的新一代高性能天文光学仪器。光子灯笼是一种低插入损耗、高模式选择性的新型全光纤线性光学器件,以综合单模光纤系统与多模光纤系统的优势,并实现模式转换与模式控制,可用于天文红外光谱滤波、光纤扰模、波前传感等方面。本文就光子灯笼器件的概况、工艺制备、天文领域前沿应用、挑战与前景等方面进行介绍。

关键词:天文光学;光纤光学;光子灯笼;光谱测量;波前传感

中图分类号:P111.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235205.0552204

0 引言

从四个世纪前玻璃匠手持两块透镜眺望远方,发现望远镜的功能与作用,到国际上正在运行的 14 架 8~10 米级望远镜,到我国自研的国家重大科学工程大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope, LAMOST)^[1],目前国际上正在推进和研制的三十米口径望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)^[2],大麦哲伦望远镜(Giant Magellan Telescope, GMT),欧洲极大望远镜(Extremely Large Telescope, ELT)等,2021 年底成功发射的口径 6.5 米的空间望远镜 JWST (James Webb Space Telescope)^[3],光学望远镜的制造不断刷新人类对于天文学前沿科学的认知。在新千年,天文学得益于大口径望远镜建设、大视场巡天计划的实施,使天文观测的目标从最初的月球、太阳和太阳系,逐步拓展到银河系结构和理化性质、星系形成与演化、暗物质暗能量、系外行星与系外生命探测等重大科学问题上。此外,电磁波、引力波、中微子等多种信息载体也逐步参与到天文观测领域中。

随着天文观测设备的蓬勃发展,天文望远镜的口径和各类终端仪器的尺寸不断增加。在有限的仪器空间内,如何设计小质量、小体积、高性能、高稳定性的新一代仪器,对地基与空间天文观测意义重大。光子学技术与天文应用的结合逐渐发展成新兴交叉学科:天文光子学(Astrophotonics)^[4]。天文光子学的概念最早由 BLAND-HAWTHORN J 等提出,属于天文学和光子学的交叉学科。随着技术不断发展,天文光子学的概念被逐步细化,并逐渐使用低成本、高效率的光子学器件来实现天文学研究的科学目标。

根据美国 2020 年《天文光子学白皮书》^[5]所述,天文光子学的研究领域细分为光子灯笼、光纤布拉格光栅、瞳面重排仪器、光束合束和光束干涉仪、光子光谱仪、光子光梳等光纤与集成光子技术的研究。部分元器件在实验室和天文实测中取得突破性进展,成为天文观测技术中不可或缺的一部分,近十年来天文光子学的发展态势见图 1。天文光子学逐步成为天文仪器研究的热门领域之一。

由天文光子学概念延伸并发展的仪器中,光子灯笼(Photonic Lantern, PL)是光纤光学在天文观测仪器中的优秀范例。光子灯笼概念最早出现在 2004 年,目的是为了解决羟基发射线对红外波段天文观测带来的影响。光

基金项目:国家重点研发计划(No. 2022YFA1603001)

第一作者(通讯作者):韩子健, zjhan@niaot.ac.cn

收稿日期:2023-03-08;录用日期:2023-05-08

<http://www.photon.ac.cn>

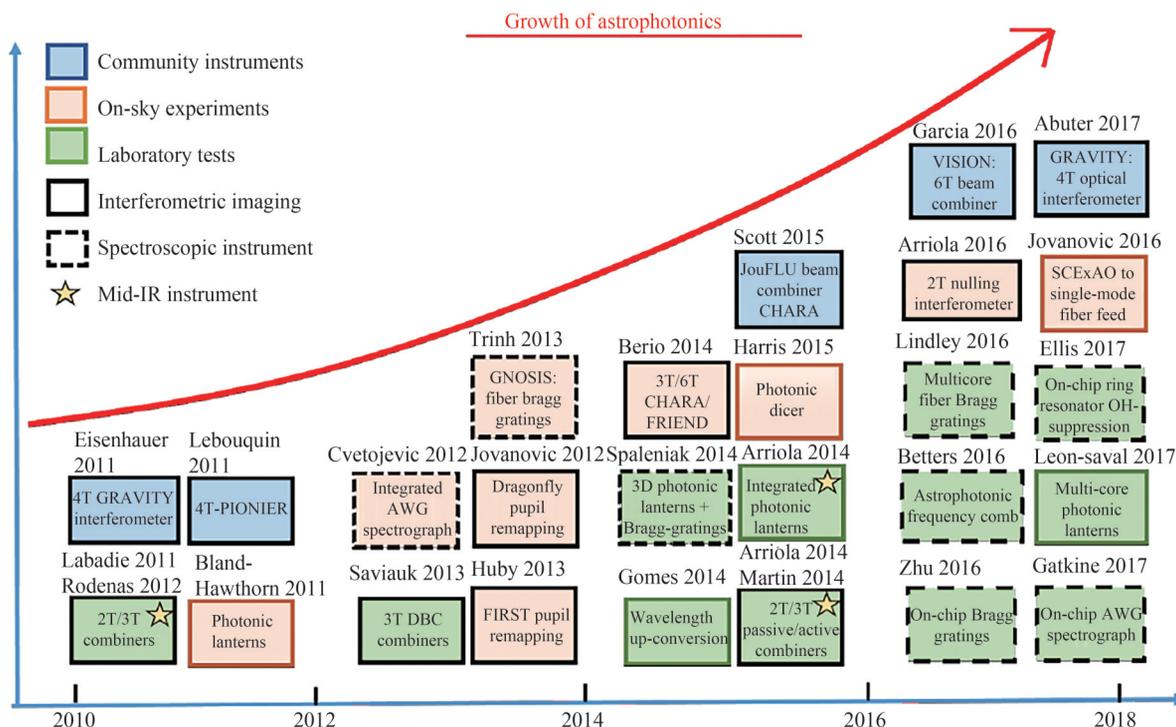


图 1 近十年来天文光子学的发展态势^[5]
Fig. 1 Growth of the astrophotonics in the last decade^[5]

光子灯笼是一种低插入损耗、高模式选择性的新型全光纤线性光学器件,以综合单模光纤系统与多模光纤系统的优势,并实现模式转换与模式控制。光子灯笼器件逐渐在光谱滤波、扰模控制、波前传感等领域发挥重要作用。

本文就光子灯笼器件的概况、制备工艺与分类、天文领域应用场景等三方面对设备进行介绍,并着重介绍光子灯笼在天文仪器技术领域中的研究进展。

1 光子灯笼器件概述

1.1 基本原理

光子灯笼是一种连接单个多模波导,以及多个单模波导或多纤芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)的低损耗光波导器件^[6-9]。光子灯笼器件一端是满足特定条件的多模波导,另一端是若干个单模波导或MCF,中间锥区过渡段通过拉锥过程实现渐变过渡转换。该器件构型与灯笼形状相近,故被称作“光子灯笼”。光子灯笼的任意一端均可作为输入端或输出端使用。光子灯笼的单模波导个数与多模端的模式数之间存在匹配关系,即单模端独立的N个基模能够耦合到多模端相同数量的多个模式。图2展示了一种由单个多模波导输入、多个单模波导输出的光子灯笼器件原理示意图。

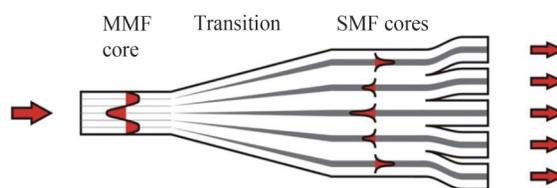


图 2 光子灯笼的结构示意图^[8,9]
Fig. 2 Schematic diagram of a photonic lantern^[8,9]

从模式选择差异性来看,光子灯笼器件可大致分为三类^[10]

- 1) 标准型:波导结构与材料折射率上有一致性,可以实现基模与高阶模之间的转换,但无法满足对选模特性的特殊要求;
- 2) 模式选择型:单模波导的尺寸和折射率都有不同,可以实现高阶模式的激发与复用^[11];
- 3) 混合型:介于标准型和模式选择型之间的光子灯笼器件^[12]。光子灯笼器件中一个单模波导与其他单模波导有差异,可独立地实现特定模式的输出,其他波导共同构成类似标准型的光子灯笼器件。

光子灯笼过渡锥区中模式变换过程可用量子力学中的Kronig-Penney模型进行类比解释^[13-15],如图3所示。光子灯笼过度锥区内的模式变化过程可类比量子阱内电子驻波解的能量变化。电子驻波的离散能量

可以通过独立势阱。在特定几何形状和合适电势下,独立势阱仅可保留一个离散能级,这和光子灯笼波导的基模类似,即每个基模中仅有一个空间模式。当量子阱逐渐变窄时电子开始穿过量子阱;在转换过程接近结束时,原有的量子阱基本消失,所有电子进入一个几何尺寸更宽的量子阱中。类比来看,光子灯笼过渡过程中,锥区尺寸逐渐变窄,空间模式逐渐从单模端向多模端进行过渡,并最终在多模端输出。

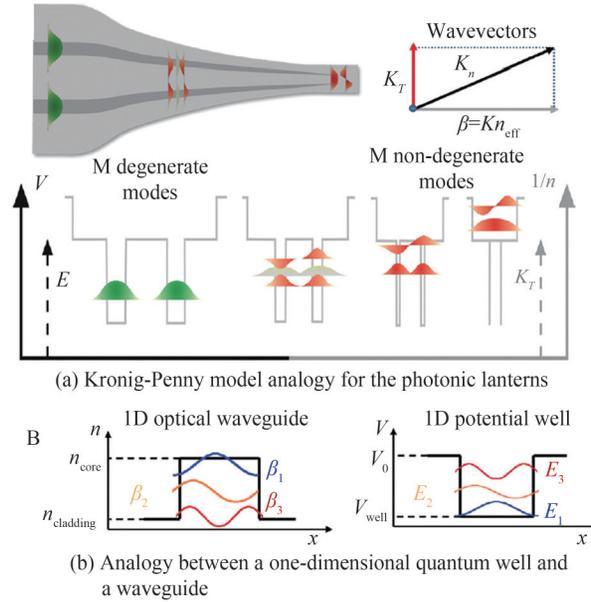


图3 光子灯笼与量子力学中Kronig-Penney模型类比关系示意图^[13]
 Fig. 3 Schematics of the Kronig-Penney model analogy for the photonic lantern^[13]

1.2 模式演变与光波导排布

光子灯笼的合理模式演变和光波导排布优化可减少传输损耗,提升效率。LEON-SAVAL S G等对前期NOORDEGRAAF D等提出的一款 1×7 型光子灯笼进行了理想情况下模式演变过程的定量模拟分析^[14],如图4所示,分析借助了Rsoft和CUDOS MOF Utilities^[16]两款软件,设定工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。该款光子灯笼使用了7根间距 $80 \mu\text{m}$ 、直径 $6.5 \mu\text{m}$ 、折射率为1.453 97的单模波导,外围包层折射率为1.444 0,组

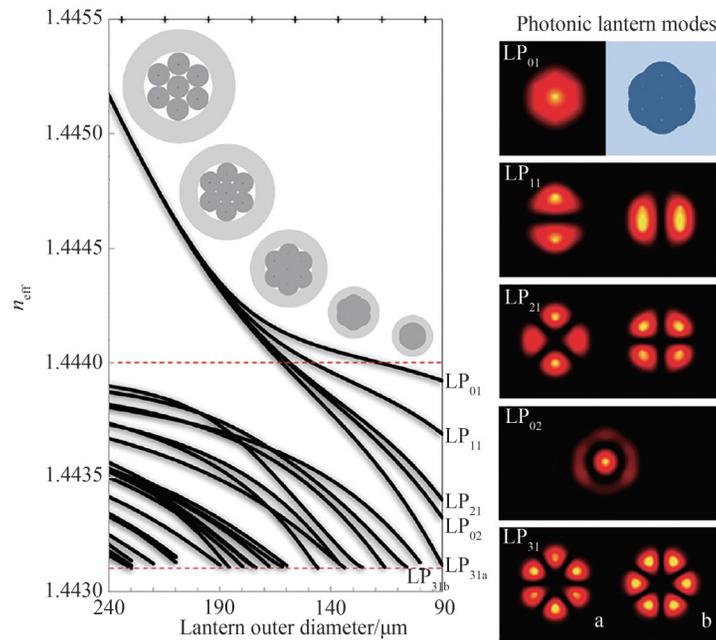


图4 一种 1×7 型光子灯笼的模式演变过程分析^[13]
 Fig. 4 The evolution of modes throughout a 1×7 photonic lantern^[13]

合截面直径 $224\ \mu\text{m}$ 。七根单模波导被紧密包裹在折射率为 1.443 1、外径 $437\ \mu\text{m}$ 的二氧化硅套管内。拉锥初始阶段,光波导截面上模式分布仍近似单模端初始基模形态,即模式牢牢束缚在单模波导结构中。随着拉锥比不断减小,原本束缚在单模波导中的模式扩散在包层中,各模式间光场重叠积分变大,相互耦合影响逐渐增加。拉锥过程结束时,单模波导完全消失,单模端包层结构完全演化为多模段纤芯结构,各超模完全演变为多模端的模式组,多模端的模式数量恰好与单模波导数量相匹配。

此外,光子灯笼设计还要考虑充分实现模式演变过程所需的锥区长度和锥角大小。FOUTAINEN K 等^[17]和 BIRKST A 等^[18]利用光束传播法(Beam Propagation Method, BPM)模拟计算了光子灯笼在不同模式的转换长度,即不同锥角下的损耗。锥角大小与单模端纤芯数量、锥区长度等相关,还要考虑绝热拉锥条件^[19, 20],即模式光场能量在拉锥过渡过程中不产生损耗,拉锥过程要足够平缓。在低损耗要求下,不同的单模波导数量所需锥角大小不同。例如,3 芯光子灯笼的锥角要小于 0.69° ^[17]; 85 芯光子灯笼的锥角要小于 0.21° ^[18]。锥角越小,模式转换的过程越为平缓,光子灯笼的传输损耗越小。

低损耗光子灯笼中,单模波导的数量要与多模端模式数量相匹配,几何排布要同所耦合波导中支持的模式光场分布形态近似^[21, 22]。单模波导的几何排布形式包括:六边形排布、环形排布、方形排布等。更具体地,假定光子灯笼的多模波导支持 LP_{lm} 空间模式,角度方向极点数为 l ,径向极点数为 m 。单模波导空间排布由 m 个同心圆组成,每个同心圆上排布奇数个光波导,以区分角度方向不同的两个空间模式。每个同心圆上的波导数量为 $2p + 1$ 个,其中 p 为多模波导中径向模式数量 m 所对应的最大值 l 。

为优化光子灯笼性能参数,减小对称性损耗,FOUTAINEN K 等将光子灯笼作为空分多路复用系统的转换器件,利用模态分析、光束传播法、传输矩阵法等分析了 1×15 型光子灯笼的模式损耗^[17],如图 5 所示。分析表明,通过增加单模波导数量,或优化单模波导排布,可减少光子灯笼的传输损耗。

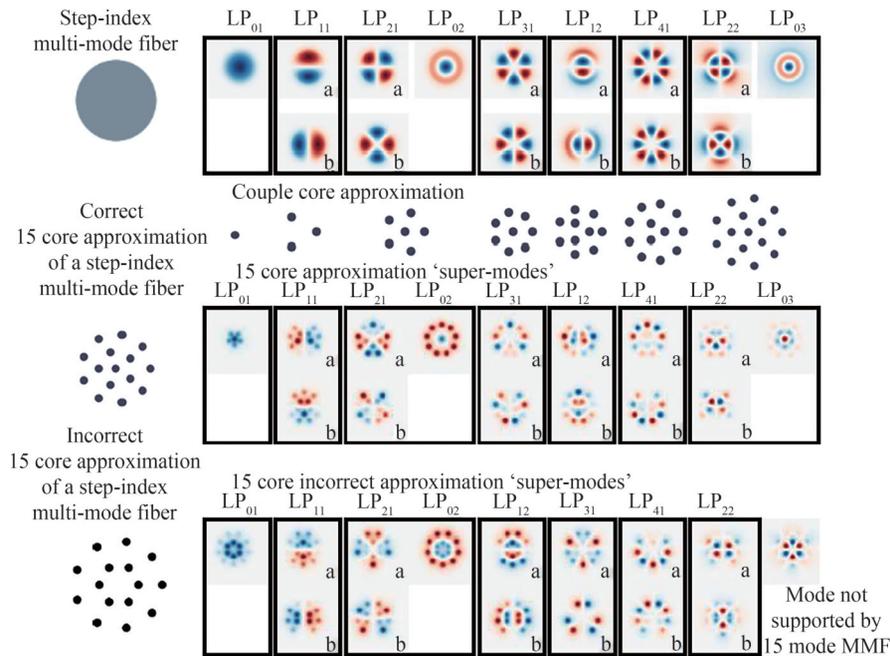


图 5 多模波导及其 15 芯单模波导阵列近似的空间模式分布^[13, 17]
Fig. 5 Spatial mode distribution of a multi-mode fiber and its 15-core approximation^[13, 17]

2 光子灯笼的制备工艺与分类

光子灯笼的实质是对光波导的模式进行物理转换,单模波导或是截止,或是在通过强耦合过程下形成多模波导。如图 6 所示,制备工艺主要分为三大类:前两类工艺是基于传统光纤实现的^[18, 23],第三类是采用超快激光直写技术(Ultrafast Laser Inscription, ULI)实现的^[24, 25]。

第一个光子灯笼采用光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)作为 19 根单模波导的包层结构,利用

光纤拉锥塔完成套管拉锥制作过程^[26],但该方法易受到包层材料制约。目前更为常用的是全固态光纤拉锥工艺^[23]:将一束单模波导放入低折射率的细玻璃套管中,熔融拉锥形成多模波导^[18],还可参考全固态带隙光纤的加工方式,基于一根带有上百个纤芯的MCF制成光子灯笼器件^[27]。该方法在保护纤芯的同时减少了加工过程引起的额外损耗,但无法满足对特定空间模式的选择需求,先后制成了用于天文观测的7芯、19芯、61芯光子灯笼^[26, 28, 29]。

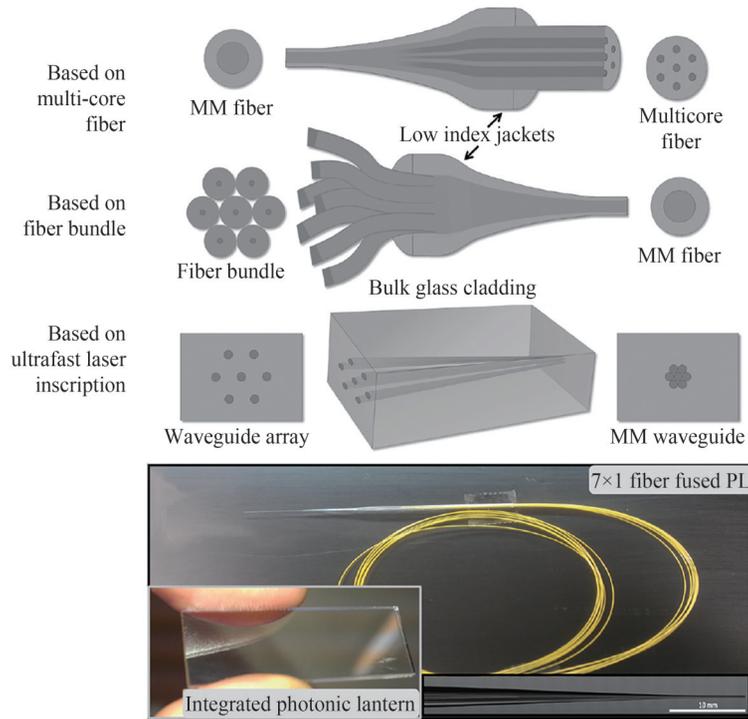


图6 三类不同制备工艺下的光子灯笼结构示意图^[24]

Fig. 6 Schematics of the three different photonic lantern fabrication approaches^[24]

另一种制作工艺是通过超快激光直写技术实现的^[24, 30, 31],可实现光波导的高精度定位,具有紧凑性和多功能性。激光在玻璃基底的特定位置上进行直写,使该位置上的折射率增加,形成相互独立的单模波导。随着模式转换过程的进行,单模波导逐步耦合形成多模波导^[24, 25, 32]。但设计与加工过程需要额外考虑接口设计与传输损耗问题。

2.1 多孔包层内嵌套多根单模光纤

光子灯笼概念的提出要追溯到2005年前后^[9, 33]。在2004年,BLAND-HAWTHORN J提出拟采用若干组非周期性单模光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)实现天文观测中的羟基抑制^[34]。在天文观测中,多模光纤可实现对望远镜所成星象的低损耗传输。但考虑到多模光纤中存在传播常数不同的多个模式,多模FBG空间模式间相互耦合会形成多个反射峰^[35]。若在多模光纤中实现单模光纤的功能,即可满足FBG器件的观测需求。BIRKS T A提出了光子灯笼的构想,让多模光纤与若干组已对接了FBG的单模光纤进行耦合。考虑到技术历史积累和原材料限制,LEON-SAVAL S G在PCF中嵌套了若干根单模光纤,利用套管拉锥方式制作了第一个光子灯笼器件^[36],如图7所示。PCF又称作微结构光纤,其波导特性是通过贯穿整个包层的致密空气孔来实现的^[37]。第一个光子灯笼是基于带有19孔的PCF制作的,截面直径约3 mm,每个空气孔内放置1根剥离了聚合物包层的单模光纤^[36]。随着拉锥过程的进行,单模光纤逐渐成为光子晶体光纤中的纤芯,保证了锥区的低损耗过渡。

为了验证所制作光子灯笼器件的性能,BLAND-HAWTHORN J用两个光子灯笼器件的单模端拼接了19个FBG器件,形成多模-单模-多模(MM-SM-MM)组合,如图8所示。当所有FBG在常温下工作时,MM-SM-MM的透过率谱线产生了一段约0.1 nm宽的波长差,峰值约~12 dB。将其中9个FBG加热到60℃,测得透过率谱线产生了两个吸收谷,透过率峰值约为~3 dB,证实了组合器件内各部分属性是一致

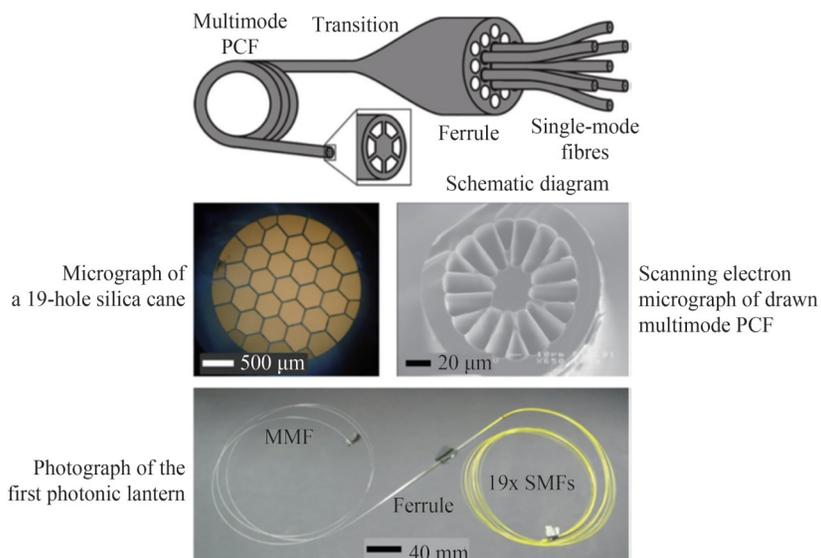


图7 第一个光子灯笼的原理图、显微图与实物图^[9]
 Fig. 7 Schematic diagram, micrograph, and photograph of the first photonic lantern^[9]

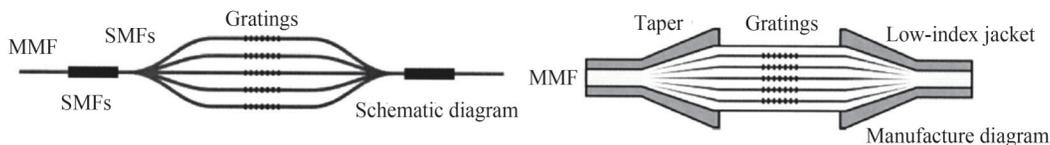


图8 带有光纤布拉格光栅的MM-SM-MM光子灯笼对的原理与加工示意图^[9]
 Fig. 8 Schematic and manufacture diagram of an MM-SM-MM lantern pair^[9]

的。但经过计算,光子灯笼器件的损耗达到了14.7 dB,不适用于天文观测。这套光子灯笼器件的设计和制造工作仅用于进行概念验证,并没有考虑到多模端模式数量与单模纤芯数量间的匹配问题。

2006年,该团队进行了进一步实验^[8],这次实验只用了7根单模光纤,并采用了空气孔结构更小的PCF,以便更好地控制多模端纤芯的结构。该器件成为第一支低损耗光子灯笼,在1550 nm下平均损耗为0.3 dB。实验从侧面证实,使用PCF制作光子灯笼,极易造成光纤模式间不匹配,增加器件损耗。

2.2 固态包层内嵌套多根单模光纤

基于固态包层内嵌套多根单模光纤的方法,是对上文方法的改进。为响应BLAND-HAWTHORN J对大规模制作更稳定更可靠的光子灯笼器件需求,NOORDEGRAAF D等在2009年首次提出了固态包层内嵌套多根单模光纤的制作方法^[23],如图9所示。与之前LEON-SAVAL S G等采用的方法类似,该方法将N

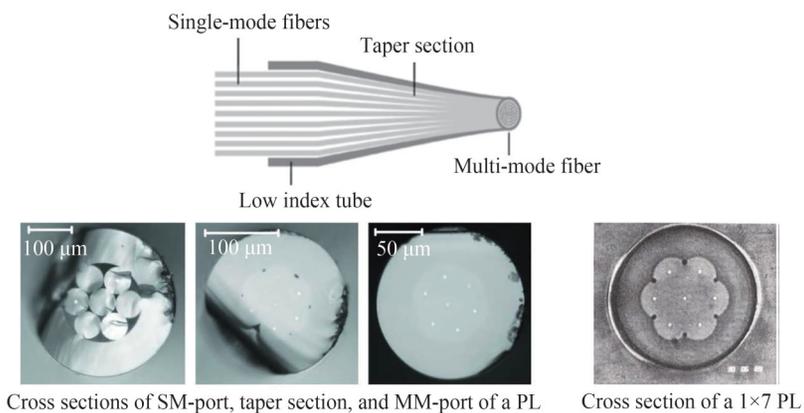


图9 低折射率玻璃套管内嵌套多根单模光纤并拉锥的示意图与截面显微图^[23, 29, 38]

Fig. 9 Schematic and cross section micrographs of a photonic lantern made by tapering a bundle of SMFs inside a low index tube^[23, 29, 38]

个单模光纤嵌入在低折射率的细玻璃管中加热拉锥。单模光纤排列紧密,使器件整体尺寸更小。该方法与制作多模熔融光纤耦合器的方法类似^[39],只是在锥区腰部截止,以产生光子灯笼的多模端端口。此外,单模波导间的空气间隙在拉锥过程中会逐渐消除,无需考虑上文方法中PCF内空气间隙排布和尺寸的影响。

NOORDEGRAAF D等的初步实验在固态细玻璃管内嵌套了7根单模光纤。测试表明,所制作的光子灯笼器件过渡区域的损耗为0.32 dB,从单模端到多模端的平均损耗仅为0.24 dB。后期,NOORDEGRAAF D等开展了对61芯^[29]和19芯^[40]两种光子灯笼的验证工作,在1 200~1 700 nm波长下测得MM-SM-MM透过率在70%至80%之间。此外,实验分析了光子灯笼器件设计所面临的潜在困难:1)多模输入端的空间模式数量不能大于单模波导的数量,需要确保耦合器件的数值孔径足够小;2)单模波导的数量要足够多,以满足光子灯笼器件的整体耦合效率。为了在有限成本下提升光子灯笼器件性能,还可在保证单模波导内芯不变的情况下,减小其外径尺寸以增加单模波导数量。总的来说,基于固态包层内嵌套多根单模波导的方法可重复性高,制作的光子灯笼传输损耗小,为光子灯笼的大规模应用提供可能。

2.3 固态包层内嵌套单根多纤芯光纤

上文提到的两种方法虽然已经有成功先例,但需要在小口径包层材料内嵌套多根单模纤芯并熔融拉锥。受工艺成本限制,包层材料的直径有限,嵌套单模纤芯的难度增加,很难增加单模纤芯的数量^[41]。早在2005年,LEON-SAVALL S G等已经设想在包层内嵌套MCF的解决方案^[9]。MCF需要特殊定制,但一次制作就可以生产几公里长的产品,便于一次加工上千根光子灯笼。该方法在细玻璃管内仅嵌套一根MCF并熔融拉锥,MCF中的毛细管在拉锥过程中不断塌缩,最终形成一个多模端端口。实际应用中,还可利用飞秒激光将所有FBG一次性刻蚀在MCF上^[42],配合该方法可大规模生产基于FBG的天文滤波装置,进一步降低器件研发成本。

在2010年,BIRKS T A等基于全固态光子带隙光纤对该方法中的关键器件进行了概念验证^[43],并提出了一种基于120个纤芯的MCF制成的光子灯笼器件^[18,44],如图10所示。多模纤芯的外径为230 μm,嵌套在一个数值孔径为0.21的掺氟玻璃套管内,多模端直径为50 μm。基于该器件制作的MM-SM-MM的损耗小于0.5 dB。

需要注意的是,利用MCF制作的光子灯笼无法单独分离某个单模波导,也无法将入射光或出射光单独耦合到单模端的某个波导上。但利用3.1节和3.2节所述方法是可以实现的,并且可以在三维空间内实现单模波导的自由定位。例如,单模波导可以沿狭缝方向做空间重排,几何分布与光谱仪的入射端匹配^[45,46]。一般地,利用MCF制作的光子灯笼器件更适用于不需要某特定单模波导的场景使用^[18,47]。但借助超快激光直写技术,也可以实现特定光谱数据的独立输出^[48,49]。

2.4 光子晶体光纤空气孔塌缩法

基于PCF空气孔塌缩的制备方法最早可追溯到2013年。该方法选用带有多个单模波导的PCF为基底材料,采用空气孔塌缩的方法,使部分空气孔外围的包层材料转变为波导,并使波导逐渐增大,直至形成一个多模波导。多模与单模之间的过渡过程可在PCF内部形成^[37],如图11所示。最早用该方法制成的光子灯笼器件采

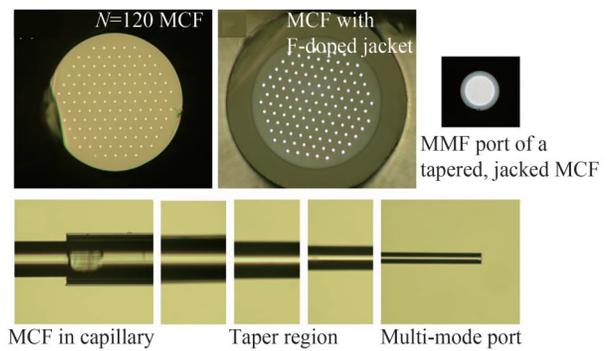


图10 等比例尺寸下的 $N=120$ 光子灯笼截面显微图像^[18]
Fig. 10 Cross-sectional micrographs of an $N=120$ photonic lantern with same scale^[18]

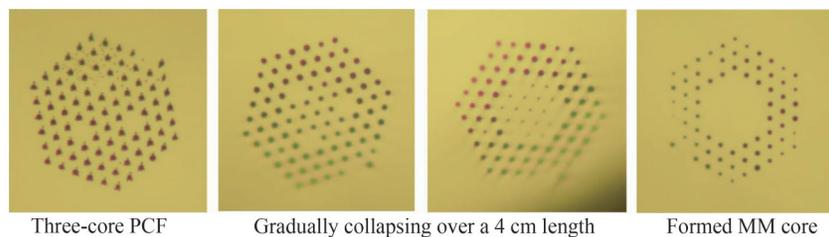


图11 逐渐拉伸的3芯PCF光子灯笼的截面显微图像^[8,37]
Fig. 11 Micrographs of cross sections of a gradually collapsing three-core PCF^[8,37]

用不同的单模波导制作,每个单模波导的光用于激发多模波导中的各个空间模式^[50]。空气孔塌缩方法可在光纤拉锥机的热源上实现^[51],空气孔的表面张力将使空气孔塌缩,因此PCF内部会有两种变形:一是光子晶体光纤的空气孔直径和孔间距同时变小,但两者之比不变;二是PCF的空气孔塌缩变小,截面积基本不变^[52,53]。

2.5 超快激光直写方法制作光子灯笼

利用超快激光直写技术制作光子灯笼^[24]的原理示意图如图12(a)所示。ULI技术主要利用材料对超快激光的非线性吸收,在作用区域引发性能变化,通过控制光束扫描实现三维加工。超快激光刻写过程可改变基底材料的折射率,进而产生光波导结构^[30,54],形成集成光子灯笼器件,如图12(b)所示。

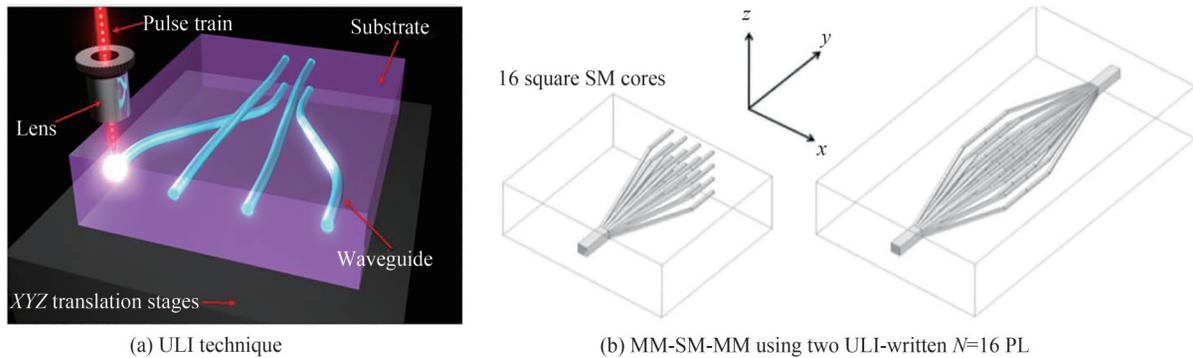


图12 超快激光直写技术制作光子灯笼的原理示意图及其组成的MM-SM-MM光子灯笼器件对示意图^[24]

Fig. 12 Schematic diagrams of the PLs made by ULI technique and MM-SM-MM lantern pair made with ULI^[24]

2009年, THOMSON R R等提出可以将ULI技术用于三维集成光子灯笼器件的制造过程中^[55],并可与FBG结合起来制作光学滤波观测器件。2011年, THOMSON R R等制作了首个基于ULI技术的光子灯笼器件^[24,56]。每个光子灯笼器件都包括一个由单模纤芯组成的二维阵列,纤芯沿着光传播方向相互接近,最终融合形成一个多模纤芯。制作过程选用了数值孔径为0.5的透镜,导致会聚激光的刻写量不够均匀。制作过程可选用多次扫描直写方法修正刻写量不均匀带来的影响^[57,58]。超快激光在基底材料上扫描直写20次,来制作一个单模纤芯。每次扫描过程的横向位移量都很小,保证两次激光直写的轨迹是相邻的。多次扫描直写可制作近似渐变折射率分布的光波导器件^[24],用于形成光子灯笼的过渡区域。图12(b)所示光子灯笼的单模端选用了 4×4 阵列分布的单模波导,经过30 mm长的过渡锥区,融合形成近似阶跃折射率分布的多模波导。在1550 nm波长下,70 mm长MM-SM-MM的损耗为5.7 dB。但相同长度的多模波导仅有5.0 dB的损耗,损耗差异是模式不匹配造成的,而非光子灯笼自身的器件损耗。预计在1550 nm波长下,超快激光直写器件的损耗可控制在0.1 dB/cm以内^[58]。

除了上文所提到的方法外, JOVANOVIĆ N、SPALENIAK I、GROSS S等所在的团队展开了另一种ULI方法的应用研究^[25,32,59,60]。该方法使用约5 MHz的高频脉冲,在焦点处积累大量热量。该方法制成光波导的折射率分布更为复杂,带有较大的折射率变化,但光波导之间的排布不够均匀且不够规整。在1550 nm下,一组MM-SM-MM光子灯笼对的损耗约为2.1 dB,部分损耗来自0.3 dB/cm的基底吸收。

使用ULI方法制作的光子灯笼器件有诸多优点。优点之一是器件出色的普适性。光波导能以传统光纤难以实现的方式,由超快激光直写在基底材料内的任何位置上,例如若干个单模波导重排类似狭缝的波导组合^[61,62]。此外,用ULI制作的光子灯笼本质上是稳定可靠的,这意味着MM-SM-MM可作为多径干涉仪使用,较高的长波透过率也可使其拓展到中红外波段开展相关应用^[63]。但使用ULI制作的光子灯笼器件损耗较高。光波导的损耗通常是由散射、辐射和吸收引起的,ULI需要使用低吸收率的基底材料,在低散射、低辐射损耗下实现波导折射率的充分变化^[64,65]。

3 光子灯笼的天文应用

光子灯笼可将一束从多模端入射的、受大气扰动严重影响的入射光,经传输后从单模端输出满足衍射限成像条件的出射光。光子灯笼器件的这一优势可极大减小仪器体积,降低成本,避免机械干扰,有助于推

动天文仪器的革新与发展^[66, 67]。此外,光子灯笼器件还可以与其他仪器共同使用,达到衍射限成像效果。

3.1 光谱滤波技术

近红外波段是地基与空间天文观测的重要组成部分。地基天文观测容易受到高度在~90 km 大气层的影响,特别是氢和臭氧结合激发形成的羟基发射线,对近红外光谱观测造成了极大干扰。羟基发射线在 0.9~1.8 μm 波段内覆盖了上百条线宽仅有 pm 量级的谱线,亮度远大于遥远星系的微弱谱线信号,给近红外光谱观测带来困难。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)可对特定波长的光进行反向滤除来实现窄线宽滤波,适合在不能达到衍射限成像,或自适应光学系统(Adaptive Optics, AO)表现不佳的望远镜上工作。

光子灯笼与光纤布拉格光栅的组合设想可追溯到2004年^[34]。组合仪器后来在GNOSIS仪器上成功开展验证和应用。GNOSIS是3.9 m口径英澳望远镜(Anglo-Australian Telescope, AAT)上实现羟基发射线抑制功能的仪器^[68]。GNOSIS是IRIS2光谱仪的上游仪器,在棱镜产生色散之前,使用多个非周期性光子灯笼与FBG的组合器件来抑制1.47~1.70 μm 波段内亮度最高的103条羟基双重线。GNOSIS器件原理图如图13所示,共使用了7套器件组合,每套器件组合两端是1 \times 19型光子灯笼,光子灯笼的单模端对接了2个FBG光栅器件。实测过程中,7套器件组的平均透光效率约为~55%。GNOSIS对羟基发射线的抑制效果如图13所示,观测目标为月落后月距大于60°的天区,21次曝光总时长达到8.75 h。红色和黑色谱线分别代表了GNOSIS抑制前后的测量谱线,可明显看到GNOSIS对羟基发射线的有效抑制。

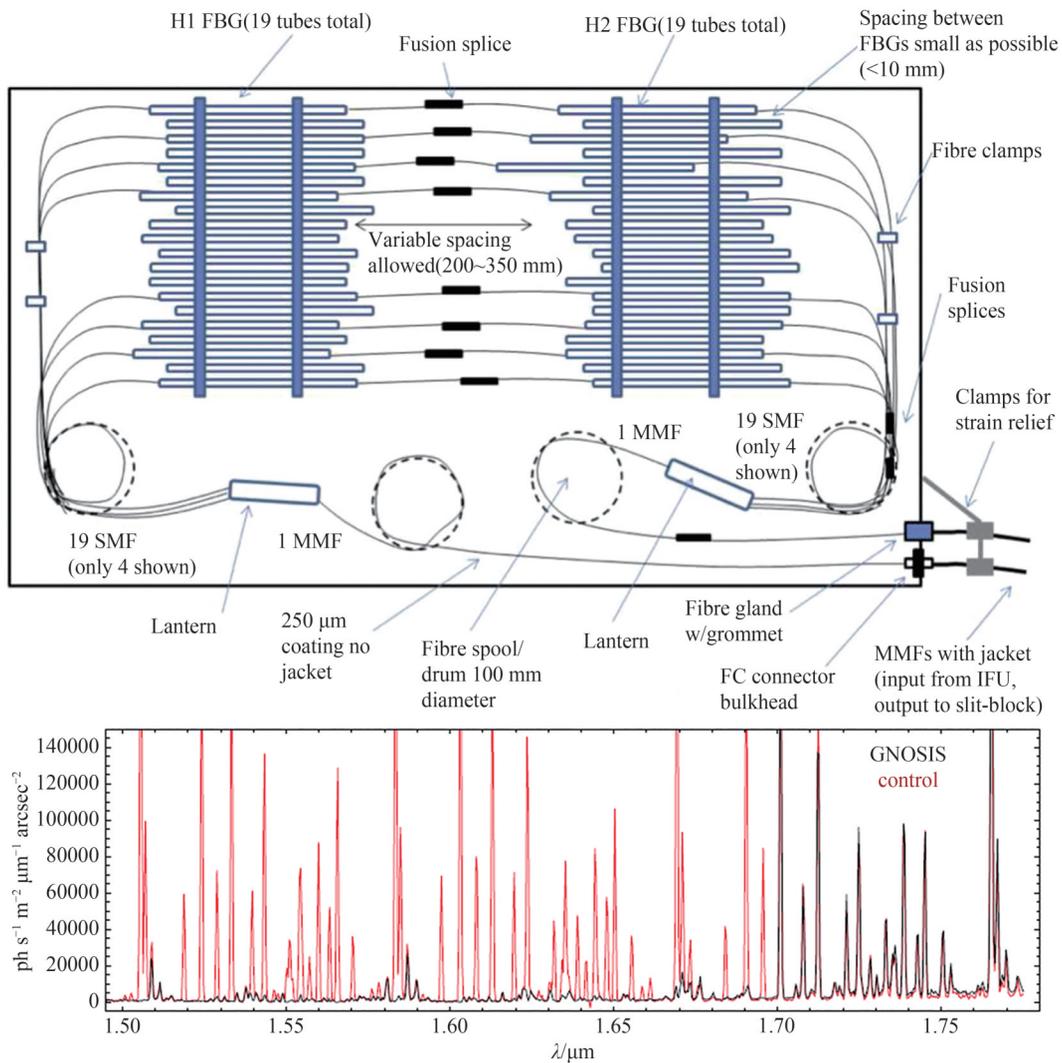


图13 GNOSIS仪器中一组羟基抑制光纤器件组的结构示意图及其对夜空观测得到的测量谱线^[68]
Fig. 13 Schematic diagram of one of the OH suppression fibers of the GNOSIS and the observed spectrum of the night sky^[68]

从光子灯笼角度考虑,GNOSIS需要使用2组共14个 1×19 型光子灯笼,单模端需要匹配 $7\times 2\times 19$ 共266个FBG光栅。任意一处耦合偏差都会对仪器整体的滤波性能产生影响,对器件制造工艺提出了极为严苛的要求。此外,在器件耦合过程中,MCF的包层可能引起激光刻写的不均匀性^[19],引发不均匀性的因素还包括MCF预制件或光纤拉伸过程中的工艺缺陷^[69,70],使每个FBG光栅的属性存在差异。LINDLEY E等提出将MCF放在填有折射率匹配凝胶的套管中,减少刻写不均匀性的影响^[71],该方法也可拓展到带有127纤芯的MCF上^[72]。

从器件组合角度来看,GNOSIS仪器验证了其能够抑制羟基散射的能力,但并未能成功提升光谱观测灵敏度,原因在于未对IRIS2光谱仪进行优化设计。为解决这一问题,团队开展了对第二代集成仪器PRAXIS的设计与研发工作^[73]。2020年,PRAXIS仪器实现了高分辨滤波验证工作,波长精度控制在 0.18 nm ^[74,75]。利用PRAXIS对赛弗特星系(Seyferts galaxy) NGC 7674的观测谱线如图14所示。图中,紫色曲线是未扣除天光背景、未做羟基滤波的谱线;蓝色曲线是未扣除天光背景、已做羟基滤波的曲线;红色曲线是既扣除了天光背景、又做了羟基滤波的曲线。如图14右上角所示,在扣除天光背景,并进行羟基滤波后, $1.644\text{ }\mu\text{m}$ 处的[FeII]发射线、附近的CO(6,3)、CO(7,3)等吸收谱线已经清晰可见。

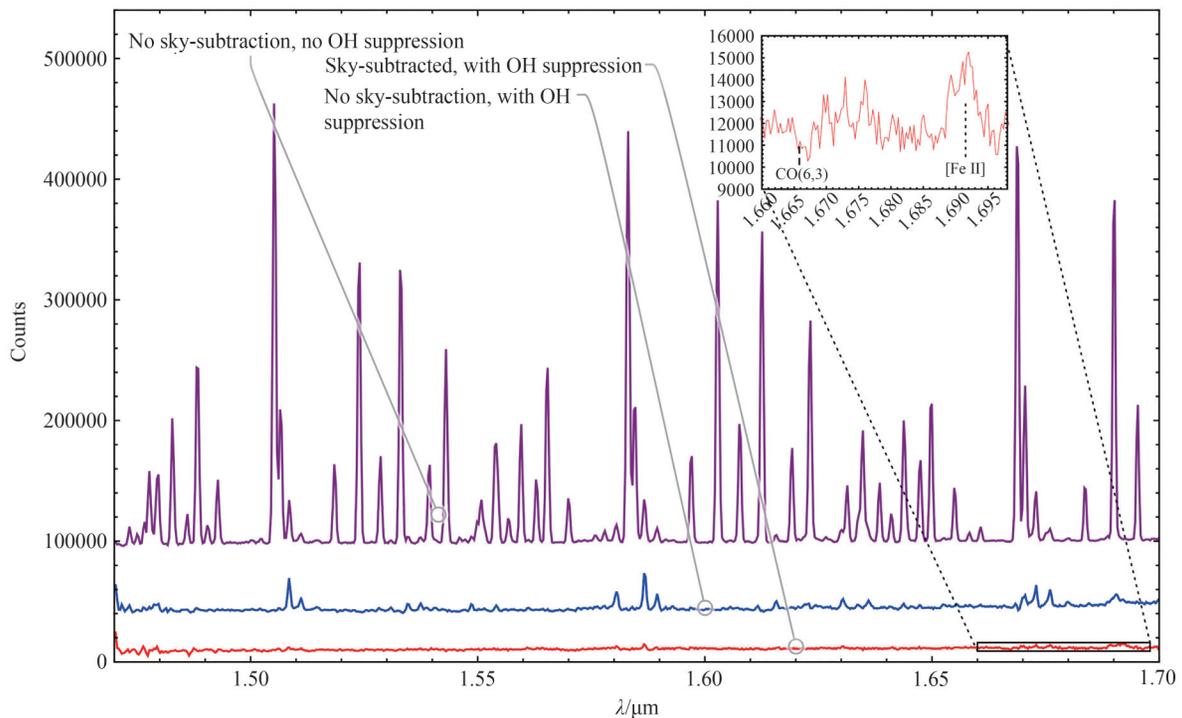


图14 PRAXIS对NGC 7674的观测谱线^[75]

Fig. 14 Observed spectra of NGC 7674 with PRAXIS^[75]

3.2 光纤扰模技术

视向速度法是系外行星探测的常用方法之一。行星的存在会引起主星光谱谱线的变化。低质量行星所引起的谱线偏移量极小($\sim 3\text{ m/s}$),需要使用高精度高稳定度的光谱仪对其进行精确测量。望远镜探测到的星光可通过多模光纤入射到光谱仪上。但观测过程中,多模光纤会受到不完全扰模和模态噪声影响,掩盖了恒星谱线的微小位移。为解决不完全扰模带来的影响,通常会使用非圆截面多模光纤^[73,74]实现光纤扰模,或利用球形透镜实现双扰模^[76]。

除此以外,光纤自身的制造缺陷会使不同模态之间存在耦合关系,产生新的模态,出现随波长和时间变化的不稳定输出,也就是模态噪声。为解决模态噪声,一般会通过轻微挤压的方式使光纤产生宏弯,也就是增加光纤扰模^[77]。但在红外波段,光纤自身制造缺陷带来的影响会增加,模态噪声带来的影响也随之增加^[78]。

MCF与光子灯笼器件的组合,可以有效解决不完全扰模和模态噪声的影响,MM-SM-MM器件对可为

系统增加扰模属性^[18]。MCF在径向上几乎没有变化,基本不产生扰模效应。为了在光子灯笼器件正常工作的情况下增加扰模效应,需要将MCF的各纤芯的差异最大化。MCF的纤芯直径产生变化,以保证高阶模能够在近似单模纤芯的环境下传播。基于该方法制作的73芯光子灯笼截面显微图像如图15所示^[79]。不同空间模式具有不同的传播常数,每个纤芯内传播的光都带有不同的相位变化量。另外,纤芯的扰动和制造缺陷使光在输入端和输出端的振幅不同。当光经过MCF传播,并在光子灯笼内重新组合输出时,振幅和相位都带有扰模效应^[47, 79, 80]。

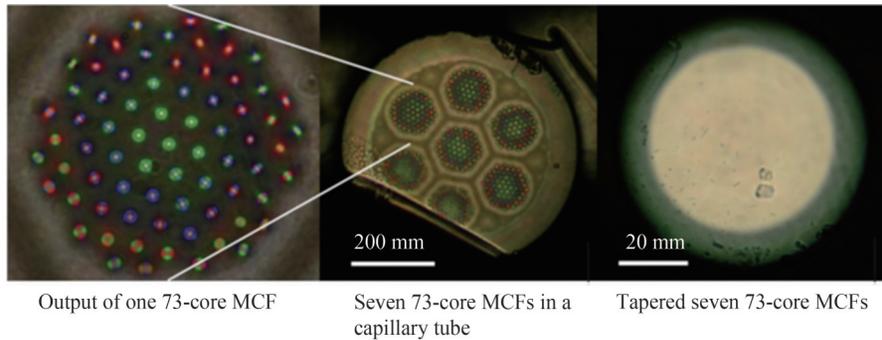


图15 纤芯直径变化后的73芯MCF及其制作的光子灯笼器件输出端照片^[79]

Fig. 15 Image of the output of a 73-core MCF with modified core diameters and PL made by 73-core MCF^[79]

3.3 波前传感技术

提升地基大口径望远镜的成像质量是天文工作者不断追求的目标之一,主动光学和自适应光学是应运而生的两项光学前沿分支技术。两项技术都需要波前传感技术实现波前畸变的实时监测,从而利用校正机构对波前畸变进行补偿。波前畸变测量精度会直接影响校正质量,从而影响光学系统的成像质量。利用波前斜率的采样测量,可重构波前来完成测量,常用的几类波前传感器如Shack-Hartmann波前传感器(Shack-Hartmann Wavefront Sensor, SH-WFS)^[81]、四棱锥波前传感器(Pyramid Wavefront Sensor)^[82]、曲率波前传感器(Curvature Wavefront Sensor)^[83]等。在实际使用中,这几类波前传感器可能遇到的问题有:望远镜结构振动对波前测量精度的影响^[84];大口径地基光学望远镜上,支撑副镜的四梁翼结构温度变化引起周围气流扰动,在低风速条件下给瞳面波前带来明显影响,且难以有效测量的低风速效应(Low-Wind Effect, LWE)^[85, 86];分光路测量带来的波前测量光路与科学成像光路间的非共光路像差(Non-Common-Path Aberrations, NCPA)等问题^[87]。

将光子灯笼器件应用于波前传感的最初尝试来自于对光子灯笼器件传输过程的分析。光子灯笼器件可将多模端入射光的相位信息转换为——对应的强度信号,并在单模端输出。这一特性使光子灯笼具备了在焦面进行波前传感的潜力。但目前光子灯笼的单模端输出数量仍然有限,现阶段仅能测量低阶波前信息,却可针对低风速效应带来的波前扰动等进行测量。从应用层面上看,光子灯笼波前传感器(Photonic Lantern Wavefront Sensor, PL-WFS)可与SH-WFS、四棱锥波前传感器等配合使用,对待测波前信息进行进一步精确测量。

2016年,CORRIGAN M等在光子灯笼波前传感方面开展模拟研究,初步验证了光子灯笼器件用于波前倾斜误差(Tip-Tilt)的可行性^[88]。2018年,CORRIGAN M等设计了1×5型光子灯笼器件并开展实验测试^[89],如图16所示。光子灯笼器件可提供两种工作模式:1)使用外围4根单模波导用于测量波前倾斜误差,中间1根单模波导为后端仪器提供输入;2)5根单模波导均用于光谱测量,在某个特定波长下分析相对强度波动,来测量波前倾斜误差。在±55 mas (milli-arcseconds,毫角秒)范围内,光子灯笼器件可实现对波前倾斜误差的有效线性测量。

在2020年,NORRIS B等提出一种结合了深度学习技术的光子灯笼波前传感器^[90],器件实现波前传感的过程如图17所示。PL-WFS多模端置于望远镜焦面处,通过标定不同已知像差的输入光强以及光子灯笼单模端的输出光强,结合深度学习实现单模端光强分布和PL-WFS输出的关联,从而实现未知波前的测量。基于深度学习原理的PL-WFS可反演得到非离散采样的连续波前。实验测试利用空间光调制器产生了前10项Zernike系数构造的、范围在±0.12π内的波前误差,所设计的PL-WFS器件可以实现均方根 $5.1 \times 10^{-3} \pi$ 的波前重构精度。

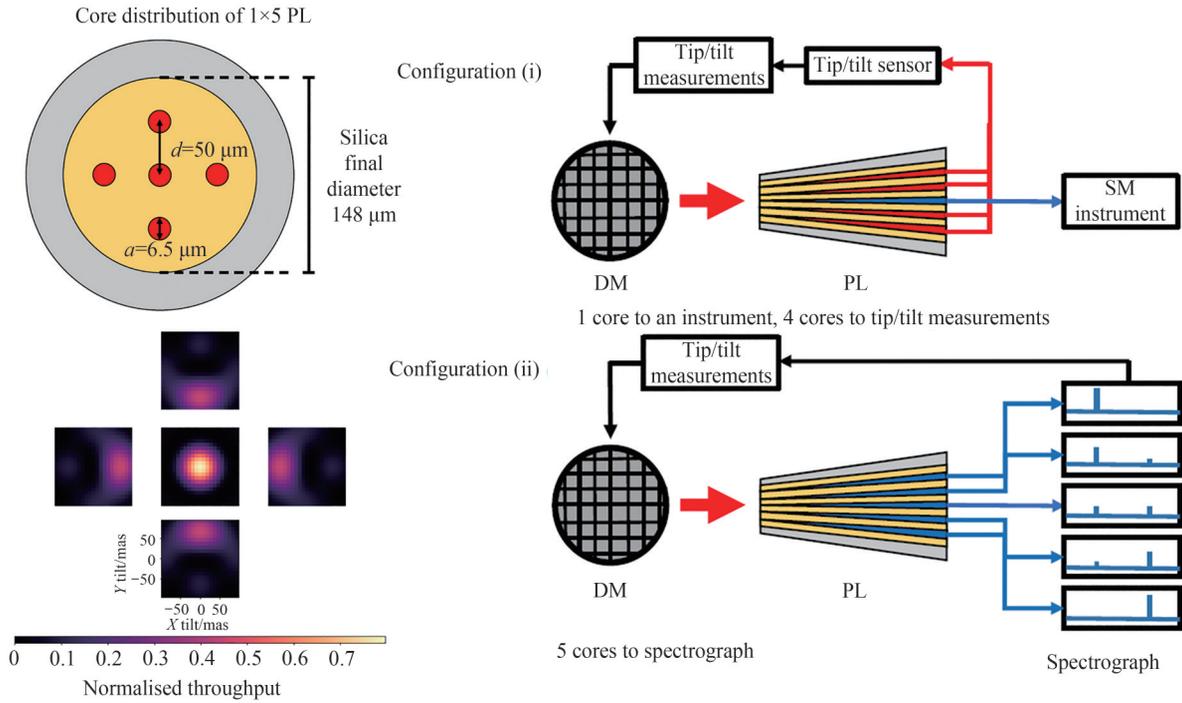


图 16 1×5型光子灯笼单模端布局与输出强度信号及两种不同工作模式^[88, 89]

Fig. 16 SM port geometry, output signal, and two working configurations of the designed 1×5 photonic lantern^[88, 89]

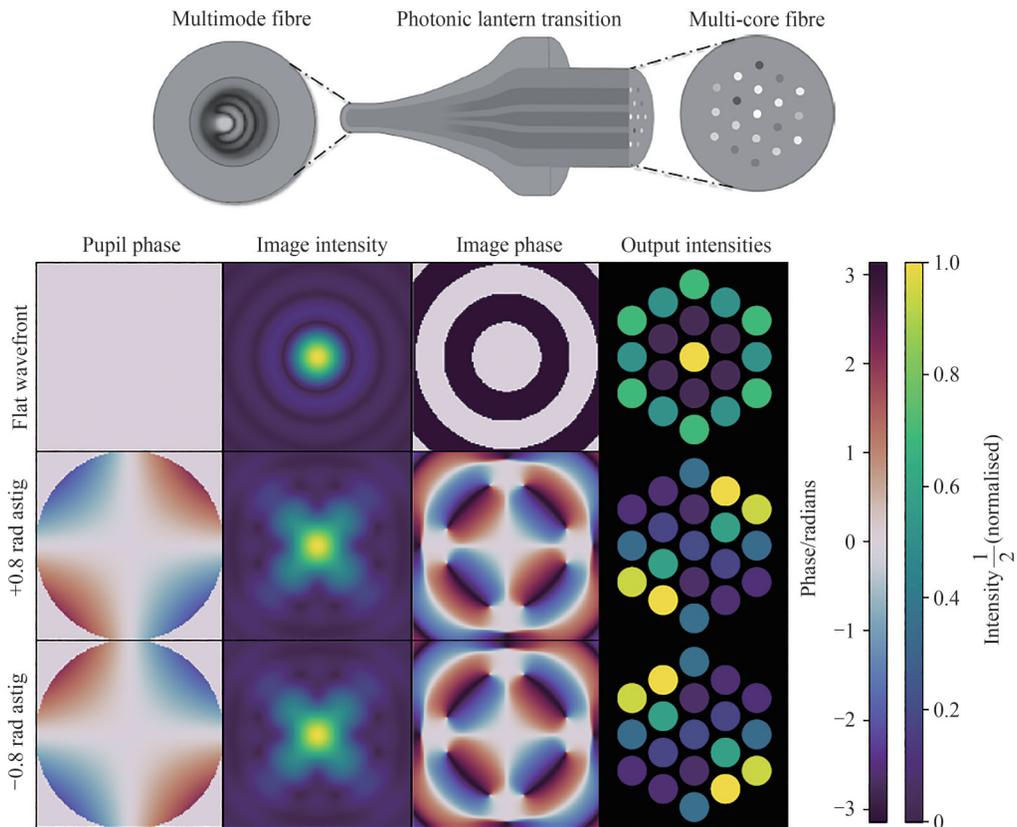


图 17 1×19型光子灯笼实现波前传感的过程^[90]

Fig. 17 Schematic diagram of a 1×19 photonic lantern realizing wavefront sensing^[90]

近两年,部分未使用深度学习技术的PL-WFS研制工作逐渐显现。2021年,CRUZ-DELGADO D等使用了复杂的转移矩阵对出射光进行表征,对用于波前倾斜误差的PL-WFS进行研究^[91],在1 064 nm下探测

张角范围约 $\sim 0.4^\circ$ 。同年,LIN J等就衍射限下光谱测光所使用的光子灯笼器件进行了概念性设计^[92];并在次年对基于 1×6 型光子灯笼器件开展了第一阶段的详尽的理论基础研究^[10],验证了PL-WFS器件对不含平移误差的前五项Zernike系数的模拟解算。此外,LIN J等针对PL-WFS器件的优化设计工作仍在进行中^[93]。2022年,WRIGHT T A等就 1×3 型PL-WFS开展波前倾斜误差测量的应用研究工作^[94],分析了波前倾斜误差与光强质心位置之间的关系,并就集成于天文望远镜系统开展了优化设计。针对PL-WFS工作原理的数值分析工作已逐步开展。本文作者已就PL-WFS在大型拼接镜面望远镜的共焦、共相方面应用开展了相关研究。

3.4 其他应用成果

光子灯笼单模端波导数量增加时,器件损耗问题更为显著,严重影响应用效果。2012年,BIRKS T A等利用固态细玻璃管内嵌MCF后熔融拉锥,测得MM-SM-MM的整体损耗小于10%。这种制作工艺降低了光子灯笼的制造风险,提升了器件的整体性能,具备了应用潜力。例如在2017年,在WHT(William Herschel Telescope)望远镜的自适应光学后端,使用了一个该方法制作的光子灯笼器件,与另一套的光束重排器组合使用^[95],二者的整体耦合效率可以达到50%以上。

2017年,LEON-SAVAL S G等基于该制作工艺,提出了一种提高光子灯笼内空间模式数量的新思路。将7个37芯的光子灯笼器件堆叠,嵌套在低折射率玻璃套管中进行熔融拉锥,最终形成了一个带有259个空间模式的合成光子灯笼器件^[96],如图18所示。器件工作效率在90%以上,可满足超大口径光学望远镜在波前传感、天文滤波、为光谱仪等后端仪器提供上游输入等应用场景。

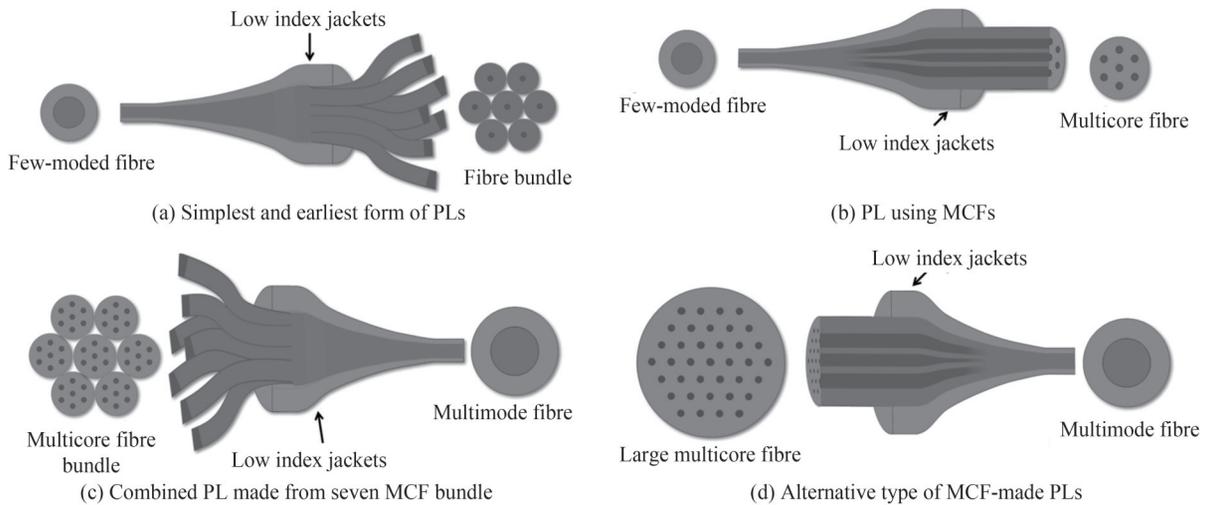


图18 四种光子灯笼的不同形式^[96]

Fig. 18 Four different varieties of photonic lanterns^[96]

光子灯笼的小型化、高效率特性使其逐步成为传统光纤光学器件的优秀替补。2019年,EIKENBERRY S等提出,使用光纤器件连接多个小型商用望远镜模块,等效大口径地基天文望远镜,从而实现低成本的天文光谱测量,即PolyOculus计划^[97],如图19所示。PolyOculus初期计划使用可切换多光纤耦合单元(Switchable Multi-Fiber Coupler, SMFC)联结七台小口径望远镜,对同一目标观测,等效实现大口径地基望远镜的成像效果。在2021年,MORAITIS C D等提出使用 7×1 型光子灯笼替代SMFC单元^[98],七个小望远镜采集的光信号由单模端输入,并统一在多模端输出。相比SMFC,光子灯笼器件所需要的仪器空间更小,耦合效率更高。MORAITIS C D等就PolyOculus中所使用的光子灯笼器件开展了实验室验证与测试工作,器件在大带宽的工作效率可达到 $\sim 91\%$ 左右。

此外,与光子灯笼相关的部分计算成像研究也在逐渐开展。2020年,CHOUDHURY D等基于MCF制成的光子灯笼器件开展了计算成像方面的研究工作,并利用SARA-COIL计算成像算法进行了图像重构的验证^[99]。2021年,SWEENEY D等利用神经网络方法,就 1×19 型光子灯笼器件和大气扰动后测得波前开展了相关研究^[100]。光子灯笼的输出可在一定波长范围内可看作是视宁度的函数,可用于视宁度预测等方面。

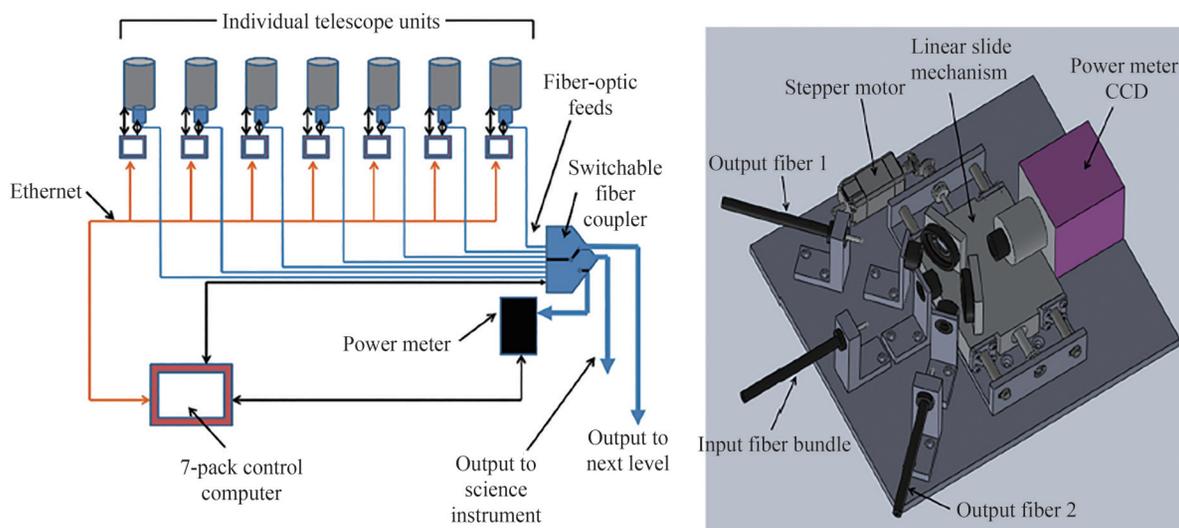


图 19 PolyOculus 的概念设计与早期设计方案中拟采用的 SMFC 概念图^[97]

Fig. 19 Conceptual layout of the basic PolyOculus and SMFC concept in the PolyOculus initial design^[97]

4 光子灯笼技术的挑战与展望

光子灯笼器件具有集成度高、体积小、传输损耗低、便于耦合等特性,可以突破传统仪器的部分限制,满足未来天文学对仪器高效能、小型化的需求。特别是 ULI 技术制作的光子灯笼器件,为天文观测仪器的设计与研制工作发掘并拓展了新的可能。不可否认的是,应用于天文领域的光子灯笼还面临着一些挑战,但同时具有丰富的应用前景。

4.1 光子灯笼的主要挑战

天文观测对仪器设计的极端需求,特别是对光子效率的特殊要求,给光子灯笼器件的设计和研制带来了挑战。对光子灯笼输出信息的处理方法,亦成为能否突破器件自身属性限制的关键因素之一。

1) 光子灯笼器件需要良好的设计优异的加工精度。器件自身缺陷和粗糙表面散射引入的杂散光影响巨大,也会进一步降低器件工作效率。如前文所述,光子灯笼的制备工艺由最简单的嵌套方式,演变到固态包层内嵌套单模或多纤芯光纤,再到基于 PCF 的空气孔塌缩方法,再到新一代利用 ULI 技术直写的集成光子器件。制备工艺上的每次革新与突破,都减少了器件自身特性带来的无谓损耗。

2) 模式匹配问题也是光子灯笼的主要挑战之一。模式数量的增加可拓展光子灯笼的应用范围,但随之而来的是模式匹配与串扰问题。常用的模式分析方法包括光束传播法、传输矩阵法等,两种方法的配合使用能有效提升器件设计参数,并提升光子灯笼的传输效率,并减小耦合、传输串扰等损耗带来的影响。

3) 如何拓展光子灯笼的工作波段。考虑到光纤器件的光谱响应能力,现有光子灯笼器件的工作波段相对较窄($\sim 200\sim 300$ nm 左右),无法满足部分宽光谱测量的天文需求。如何设计并加工制造宽光谱光子灯笼器件,也是器件发展需要突破的方向之一。

4) 如何实现对光子灯笼输出数据的解算,是光子灯笼在波前传感领域的突破点之一。光子灯笼在测量低阶像差,特别是 Tip-Tilt、Piston 上展现了较好的线性度^[88, 89]。但待测相位和光子灯笼输出光强之间并非完全的一一对应关系。目前基于机器学习手段已可以对波前相位进行解算,但深层次的理论基础研究仍具有必要性。

4.2 光子灯笼的天文应用展望

光子灯笼的起源始于对天文观测的红外滤波需求。随着对器件工作原理的认知逐渐深入,光子灯笼的应用领域不再局限于天文观测,并在光通信、新一代光纤传感器等方面有了广泛应用。在天文观测需求、器件原理与工艺的双重驱动下,光子灯笼在天文领域将拥有更广泛的应用前景,包括且不限于以下四个方面。

1) 光子灯笼可用于天文光谱成像领域,特别是在近红外波段的天文观测。温度低于 4 000 K 的天体辐射主要在红外波段,但地基红外天文观测受到地球大气的严重限制。地球大气对天体的红外辐射有一定的

吸收作用,且大气自身辐射(约300 K)也会造成极强的背景噪声。正如前文所述,光子灯笼器件结合了单模与多模光纤的特性,易与如FBG一类具有单模特性的器件组合,有效滤除近红外波段的羟基发射线,有效提升观测水平,进而在获取丰富的谱线特征,探索系外行星、特别是冷行星的物理特征,揭示并追溯宇宙生命起源等科学问题上提供更多解决可能。

2)光子灯笼可用于低成本的天文高分辨率成像。现代天文学利用大口径天文望远镜及后端仪器开展对天体的形态、结构、运动特性、物理状态、演化阶段、化学成分等方面的研究。高分辨率成像依赖于先进后端仪器的研制,更依赖于望远镜口径的增加,但随之而来的是复杂的结构、高昂的造价、漫长的工期。前文所述的PolyOculus使用 7×1 型光子灯笼器件,联结七台小口径光学望远镜采集的星光后统一输出,等效大口径地基天文望远镜的成像效果。在突破光子灯笼传输效率与匹配工装的设计瓶颈后,采用多台套小口径望远镜实现天文高分辨率成像成为可能。

3)光子灯笼器件可用于波前传感领域。部分波前传感方法,如夏克-哈特曼波前传感法、色散条纹法、相位差法、衍射图像传感法等,或需要考虑到非共光路误差,或受限于器件原理限制,需要较高的装调精度、较大的数据计算量。光子灯笼对低阶像差的测量更为敏感,如Tip-Tilt、Piston等,输出光强与低阶像差呈良好的线性关系,并能实现波前的连续输出。考虑到器件体积、装调难度、可靠性高、可直接在焦面测量等特点,作者正在开展用于大型拼接镜面望远镜共焦、共相的光子灯笼波前传感关键技术研究。

4)光子灯笼器件可用于天文光干涉测量等领域。Keck望远镜和LBTI(Large Binocular Telescope Interferometer)望远镜均已借助传统光学手段实现了光干涉成像。结合ULI技术,光子灯笼器件可以与集成光子合束器配合工作,通过更为自由的光学耦合方式,实现天文光干涉,并进一步应用于系外行星探测、恒星角直径测量等领域。

上述展望是光子灯笼在天文领域应用前景的冰山一角。作为天文光子学的主要器件之一,光子灯笼的发展需要在多功能集成、三维集成、光机电集成三个方面持续深入探索^[4],即:在紧凑性、稳定性的基础上,提升器件三维结构设计水平,综合形成光机电一体化集成设计,满足器件在极端恶劣环境下的稳定运行,最终成为下一代天文观测技术与仪器的发展基石。

5 结论

光子灯笼是一个多功能和强大的天文光子学仪器,允许多模光波导系统中存在单模系统的特性,在天文实测中日渐发挥重要作用。本文从光子灯笼的概况入手,就光子灯笼器件的制备工艺与分类,以及在天文领域的不同应用场景和最新进展进行了介绍。随着制备工艺的不断成熟,以及对光子灯笼工作机制的深入研究,光子灯笼器件将在天文光子学领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] CUI X, ZHAO Y, CHU Y, et al. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST)[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(9): 1197-1242.
- [2] SIMARD L. The Thirty-Meter Telescope: science and instrumentation for a next-generation observatory[J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 2013, 34(2): 97-120.
- [3] GARDNER J P, MATHER J C, CLAMPIN M, et al. The james webb space telescope[J]. *Space Science Reviews*, 2006, 123: 485-606.
- [4] TONG Xue, LIN Dong, HE Jinping. Research status and application prospects of astrophotonics[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2022, 63(5): 51.
童雪, 林栋, 何晋平. 天文光子学研究现状及其应用展望[J]. *天文学报*, 2022, 63(5): 51.
- [5] GATKINE P, VEILLEUX S, MATHER J, et al. State of the profession: astrophotonics[J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2019, 51(7): 285.
- [6] SUN W, YAN Q, BI Y, et al. Photonic lantern with cladding-removable fibers[C]. *SPIE*, 2014, 9151: 9151C.
- [7] YU H, YAN Q, HUANG Z, et al. Photonic lantern with multimode fibers embedded[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(8): 1046.
- [8] BIRKS T A, GRIS-SANCHEZ I, YEROLATSITIS S, et al. The photonic lantern[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 107-167.
- [9] LEON-SAVAL S G, BIRKS T, BLAND-HAWTHORN J, et al. Multimode fiber devices with single-mode performance[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2545-2547.

- [10] LIN J, FITZGERALD M P, XIN Y, et al. Focal-plane wavefront sensing with photonic lanterns: theoretical framework [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(10): 2643-2656.
- [11] LEON-SAVAL S G, FONTAINE N K, SALAZAR-GIL J R, et al. Mode-selective photonic lanterns for spacedivision multiplexing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1036-1044.
- [12] VELAZQUEZ-BENITEZ A M, ANTONIO-LOPEZ J E, ALVARADO-ZACARIAS J C, et al. Scaling photonic lanterns for space-division multiplexing[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 8897.
- [13] LEON-SAVAL S G, ARGYROS A, BLAND-HAWTHORN J. Photonic lanterns[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5-6): 429-440.
- [14] 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.
- [15] KITTEL C, MCEUEN P. Introduction to solid state physics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2018.
- [16] KUHLMEY B T, WHITE T P, RENVERSEZ G, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. II . Implementation and results[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(10): 2331-2340.
- [17] 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.
- [18] BIRKS T A, MANGAN B J, DIEZ A, et al. "Photonic lantern" spectral filters in multi-core Fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 13996-14008.
- [19] SNYDER A W, LOVE J D. Optical waveguide theory[M]. London: Chapman and Hall, 1983.
- [20] LOVE J, HENRY W, STEWART W, et al. Tapered single-mode fibres and devices. Part 1: Adiabaticity criteria[J]. *IEE Proceedings J: Optoelectronics*, 1991, 138(5): 343-354.
- [21] RYF R, FONTAINE N K, ESSIAMBRE R J. Spot-based mode couplers for mode-multiplexed transmission in few-mode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1973-1976.
- [22] BULOW H. Optical-mode demultiplexing by optical MIMO filtering of spatial samples[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(12): 1045-1047.
- [23] NOORDEGRAAF D, SKOVGAARD P M W, NIELSEN M D, et al. Efficient multi-mode to single-mode coupling in a photonic lantern[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1988-1994.
- [24] 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.
- [25] SPALENIK I, GROSS S, JOVANOVIĆ N, et al. Multiband processing of multimode light: combining 3D photonic lanterns with waveguide Bragg gratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): L1-L5.
- [26] FONTAINE N K, LEON-SAVAL S G, 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), 2013: 1-3.
- [27] LUAN F, GEORGE A K, HEDLEY T, et al. All-solid photonic bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(20): 2369-2371.
- [28] 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(1): 581.
- [29] 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.
- [30] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [31] SALIMINIA A, NGUYEN N, NADEAU M C, et al. Writing optical waveguides in fused silica using 1 kHz femtosecond infrared pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(7): 3724-3728.
- [32] JOVANOVIĆ N, SPALENIK I, GROSS S, et al. Integrated photonic building blocks for next-generation astronomical instrumentation I: the multimode waveguide[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 17029-17043.
- [33] LEON-SAVAL S, BIRKS T, BLAND-HAWTHORN J, et al. Single-mode performance in multimode fibre devices [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2005: PDP25.
- [34] BLAND-HAWTHORN J, ENGLUND M, EDVELL G. New approach to atmospheric OH suppression using an aperiodic fibre Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2004, 12(24): 5902-5909.
- [35] MIZUNAMI T, DJAMBOVA T V, NIIHO T, et al. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(2): 230-235.
- [36] LEON-SAVAL S G, BIRKS T, JOLY N, et al. Splice-free interfacing of photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1629-1631.
- [37] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [38] MORTIMORE D B, ARKWRIGHT J W. Monolithic wavelength-flattened 1×7 single-mode fused fiber couplers:

- theory, fabrication, and analysis[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(6): 650-659.
- [39] MORTIMORE D, ARKWRIGHT J. Monolithic wavelength-flattened 1×7 single-mode fused coupler[J]. *Electronics Letters*, 1989, 9(25): 606-607.
- [40] 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.
- [41] CONTENT R, BLAND-HAWTHORN J, ELLIS S, et al. PRAXIS: low thermal emission high efficiency OH suppressed fibre spectrograph[C]. *SPIE*, 2014, 9151: 91514W.
- [42] WOLF A, DOSTOVALOV A, BRONNIKOV K, et al. Advances in femtosecond laser direct writing of fiber Bragg gratings in multicore fibers: technology, sensor and laser applications[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(4): 210055.
- [43] BIRKS T A, DIEZ A, CRUZ J L, et al. Fibres are looking up: optical fibre transition structures in astrophotonics[C]. *Frontiers in Optics*, 2010: FTuU1.
- [44] BIRKS T A, MANGAN B J, DIEZ A, et al. Multicore optical fibres for astrophotonics[C]. *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2011: JSIII2_1.
- [45] BLAND-HAWTHORN J, LAWRENCE J, ROBERTSON G, et al. PIMMS: photonic integrated multimode microspectrograph[C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, 2010, 7735: 317-325.
- [46] BLAND-HAWTHORN J, KERN P. Molding the flow of light: photonics in astronomy[J]. *Physics Today*, 2012, 65(5): 31-37.
- [47] HAYNES D M, GRIS-SANCHEZ I, EHRLICH K, et al. New multicore low mode noise scrambling fiber for applications in high-resolution spectroscopy[C]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9151: 915155.
- [48] THOMSON R R, BROWN G, KAR A K, et al. An integrated fan-out device for astrophotonics[C]. *Frontiers in Optics*, 2010: PDPA3.
- [49] THOMSON R R, HARRIS R J, BIRKS T A, et al. Ultrafast laser inscription of a 121-waveguide fan-out for astrophotonics[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2331-2333.
- [50] YEROLATSITIS S, GRIS-SANCHEZ I, BIRKS T. Adiabatically-tapered fiber mode multiplexers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 608-617.
- [51] WITKOWSKA A, LAI K, LEON-SAVAL S, et al. All-fiber anamorphic core-shape transitions[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(18): 2672-2674.
- [52] XI Xiaoming, SUN Guilin, CHEN Zilun, et al. Photonic crystal fibers tapering based on the conventional taper rig[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1481-1484.
奚小明, 张桂林, 陈子伦, 等. 利用普通熔融拉锥机实现光子晶体拉锥[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1481-1484.
- [53] ZHANG Chengdong, ZHOU Xuanfeng, CHEN Zilun, et al. Low loss fusion splicing for seven-core photonic crystal fiber by selected air hole collapse technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 154-158.
张成栋, 周旋风, 陈子伦, 等. 选择性空气孔塌缩技术实现七芯光子晶体光纤低损耗熔接[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 154-158.
- [54] NOLTE S, WILL M, BURGHOFF J, et al. Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics[J]. *Applied Physics A*, 2003, 77: 109-111.
- [55] THOMSON R R, KAR A K, ALLINGTON-SMITH J. Ultrafast laser inscription: an enabling technology for astrophotonics[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1963-1969.
- [56] THOMSON R R, BIRKS T A, LEON-SAVAL S G, et al. Ultrafast laser inscription of an integrated multimode-to-single-modes waveguide transition for astrophotonics[C]. *2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC)*, 2011.
- [57] SAID A A, DUGAN M, BADO P, et al. Manufacturing by laser direct-write of three-dimensional devices containing optical and microfluidic networks[C]. *SPIE*, 2004, 5339: 194-204.
- [58] NASU Y, KOHTOKU M, HIBINO Y. Low-loss waveguides written with a femtosecond laser for flexible interconnection in a planar light-wave circuit[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(7): 723-725.
- [59] SPALENIAC I, JOVANOVIĆ N, GROSS S, et al. Enabling photonic technologies for seeing-limited telescopes: fabrication of integrated photonic lanterns on a chip[C]. *SPIE*, 2012, 8450: 845015.
- [60] SPALENIAC I, JOVANOVIĆ 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.
- [61] HARRIS R J, MACLACHLAN D G, CHOUDHURY D, et al. Photonic spatial reformatting of stellar light for diffraction-limited spectroscopy[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 450(1): 428-434.
- [62] MACLACHLAN D G, HARRIS R, CHOUDHURY D, et al. Development of integrated "photonic-dicers" for reformatting the point-spread-function of a telescope[C]. *SPIE*, 2014, 9151: 91511W.
- [63] ARRIOLA A, CHOUDHURY D, THOMSON R R. New generation of photonic lanterns for mid-IR astronomy[C].

- SPIE, 2014, 9151: 402-408.
- [64] ARRIOLA A, GROSS S, JOVANOVIĆ N, et al. Low bend loss waveguides enable compact, efficient 3D photonic chips[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2978-2986.
- [65] MEANY T, GROSS S, JOVANOVIĆ N, et al. Towards low-loss lightwave circuits for non-classical optics at 800 and 1,550 nm[J]. *Applied Physics A*, 2014, 114: 113-118.
- [66] JOVANOVIĆ N, SCHWAB C, CVETOJEVIĆ N, et al. Enhancing stellar spectroscopy with extreme adaptive optics and photonics[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2016, 128(970): 121001.
- [67] JOVANOVIĆ N, BEICHMAN C, BLAKE C, et al. Enabling the next generation of scientific discoveries by embracing photonic technologies[J]. arXiv preprint arXiv:190707742, 2019.
- [68] TRINH C Q, ELLIS S C, BLAND-HAWTHORN J, et al. GNOSIS: the first instrument to use fiber Bragg gratings for OH suppression[J]. *Astronomical Journal*, 2013, 145(2): 51.
- [69] MOSLEY P J, GRIS-SÁNCHEZ I, STONE J M, et al. Characterizing the variation of propagation constants in multicore fiber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25689-25699.
- [70] ELLIS S C, MIN S S, LEON-SAVAL S G, et al. On the origin of core-to-core variations in multi-core fibre Bragg gratings[C]. SPIE, 2018, 10706: 1377-1388.
- [71] LINDLEY E, MIN S S, LEON-SAVAL S, et al. Demonstration of uniform multicore fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31575-31581.
- [72] BLAND-HAWTHORN J, MIN S S, LINDLEY E, et al. Multicore fibre technology: the road to multimode photonics [C]. SPIE, 2016, 9912: 576-589.
- [73] CHAZELAS B, PEPE F, WILDF, et al. New scramblers for precision radial velocity: square and octagonal fibers[C]. SPIE, 2010, 7739: 1458-1466.
- [74] ROY A, HALVERSON S, MAHADEVAN S, et al. Scrambling and modal noise mitigation in the Habitable Zone Planet Finder fiber feed[C]. SPIE, 2014, 9147: 1994-2000.
- [75] ELLIS S C, BLAND-HAWTHORN J, LAWRENCE J S, et al. First demonstration of OH suppression in a high-efficiency near-infrared spectrograph[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 492(2): 2796-2806.
- [76] HUNTER T R, RAMSEY L W. Scrambling properties of optical fibers and the performance of a double scrambler[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1992, 104(682): 1244-1251.
- [77] PLAVCHAN P P, BOTTOM M, GAO P, et al. Precision near-infrared radial velocity instrumentation II : noncircular core fiber scrambler[C]. SPIE, 2013, 8864: 165-182.
- [78] HARRIS R J, LABADIE L, LEMKE U, et al. Performance estimates for spectrographs using photonic reformatters[C]. SPIE, 2016, 9912: 1722-1729.
- [79] GRIS-SANCHEZ 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.
- [80] HAYNES D M, GRIS-SANCHEZ I, BIRKS T A, et al. Optical fiber modal noise suppression in the NIR region using Multicore Fiber and Photonic Lanterns[C]. SPIE, 2018, 10706: 1750-1759.
- [81] PLATT B C, SHACK R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, 17(5): S573-S577.
- [82] RAGAZZONI R. Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(2): 289-293.
- [83] RODDIER F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [84] KULCSAR C, SIVO G, H-FRAYNAUD, et al. Vibrations in AO control: a short analysis of on-sky data around the world[C]. SPIE, 2012, 8447: 529-542.
- [85] SAUVAGE J F, FUSCO T, LAMB M, et al. Tackling down the low wind effect on SPHERE instrument[C]. SPIE, 2016, 9909: 408-416.
- [86] MILLI J, KASPER M, BOURGET P, et al. Low wind effect on VLT/SPHERE: impact, mitigation strategy, and results[C]. SPIE, 2018, 10703: 752-771.
- [87] SAUVAGE J F, FUSCO T, ROUSSET G, et al. Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(8): 2334-2346.
- [88] CORRIGAN M, HARRIS R J, THOMSON R R, et al. Wavefront sensing using a photonic lantern[C]. SPIE, 2016, 9909: 1848-1855.
- [89] CORRIGAN M K, MORRIS T J, HARRIS R J, et al. Demonstration of a photonic lantern low order wavefront sensor using an adaptive optics testbed[C]. SPIE, 2018, 10703: 1313-1320.
- [90] NORRIS B R M, WEI J, BETTERS C H, et al. An all-photonic focal-plane wavefront sensor [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5335.

- [91] CRUZ-DELGADO D, ALVARADO-ZACARIAS J C, COOPER M A, et al. Photonic lantern tip/tilt detector for adaptive optics systems[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3292-3295.
- [92] LIN J, JOVANOVIĆ N, FITZGERALD M P. Design considerations of photonic lanterns for diffraction-limited spectrometry[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2021, 38(7): A51-A63.
- [93] LIN J, XIN Y, NORRIS B, et al. Exoplanet detection with photonic lanterns for focal-plane wavefront sensing and control [C]. *SPIE*, 2022, 12185: 758-777.
- [94] WRIGHT T A, YEROLATSITIS S, HARRINGTON K, et al. All-fibre wavefront sensor[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 514(4): 5422-5428.
- [95] MACLACHLAN D G, HARRIS R J, GRIS-SANCHEZ I, et al. Efficient photonic reformatting of celestial light for diffraction-limited spectroscopy[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 464(4): 4950-4957.
- [96] LEON-SAVAL S G, BETTERS C H, SALAZAR-GIL J R, et al. Divide and conquer: an efficient solution to highly multimoded photonic lanterns from multicore fibres[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17530-17540.
- [97] EIKENBERRY S, BENTZ M, GONZALEZ A, et al. PolyOculus: Low-cost Spectroscopy for the Community [J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2019, 51(7): 124.
- [98] MORAITIS C D, ALVARADO-ZACARIAS J C, AMEZCUA-CORREA R, et al. Demonstration of high-efficiency photonic lantern couplers for PolyOculus[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(19): D93-D99.
- [99] CHOUDHURY D, MCNICHOLL D K, REPETTI A, et al. Computational optical imaging with a photonic lantern[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5217.
- [100] SWEENEY D, NORRIS B R M, TUTHILL P, et al. Learning the lantern: neural network applications to broadband photonic lantern modeling[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2021, 7(2): 028007.

Technique and Astronomical Applications of Photonic Lanterns (Invited)

HAN Zijian^{1,2}, YUAN Xiangyan^{1,2}

(1 *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China*)

(2 *CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China*)

Abstract: Astrophotonics is the application of versatile photonic technologies to channel, manipulate, and disperse guided light from one or more telescopes to achieve scientific objectives in astronomy in an efficient and cost-effective way. The field of astrophotonics spans a wide range of technologies, including collecting astronomical light into guided channels (fibers/waveguides), manipulating the transport and reconfiguration of the light, and filtering/dispersing/combining the guided light. A combination of one or more of these functionalities has led to a wide spectrum of astrophotonic instruments. The developments and demands from the telecommunication industry have driven a major boost in photonic technology and vice-versa in the last decades. The photonic platform of guided light in fibers and waveguides has opened the doors to next-generation instrumentation for both ground- and space-based telescopes in optical and near/mid-IR bands, particularly for the upcoming large-aperture telescopes. The large telescopes are pushing the limits of adaptive optics to reach close to a near-diffraction-limited performance. The photonic devices are ideally suited for capturing this AO-corrected light and enabling new and exciting science such as characterizing exoplanet atmospheres. The ongoing growth of photonics industry and astrophotonics displays a strong parallel with the development of radio communication and radio astronomy, where each positively influenced the other.

The paper introduces the photonic lantern, an astrophotonic device that allow for a low-loss transformation of a multimode waveguide into a discrete number of single-mode waveguides and vice versa, thus enabling the use of single-mode photonic technologies in multimode systems. The paper discusses the theory and function of the photonic lantern, categories and manufacture of the device, and several applications in astronomical observations.

How the uncoupled SM waveguide modes evolve through an adiabatic transition to become the modes of the MM waveguide can be described by analogy with the Kronig-Penney model for the interaction of electrons in a periodic potential well. In order to understand how a set of identical modes evolve into an equal

number of non-degenerate modes, the entire taper transition of the photonic lantern must be modeled. At large lantern diameters the modes of the single-mode cores are strongly confined, and thus do not couple and remain near-degenerate. As the lantern diameter decreases, the modal fields expand, such that interaction between the single-mode cores increases. The resulting coupling leads the formation of non-degenerate supermodes that form from linear superposition of these original modes.

While PLs come in a wide array of port counts and geometries, they can be largely classified into three groups. In what we call the “standard” PL, embedded cores are uniform in structure and refractive index. At the other extreme, “mode-selective” PLs use differing single-mode core radii or index contrasts, so that each fiber mode at the FMF-like lantern entrance routes to a distinct output port. Lastly, we term lanterns that operate between these two extremes “hybrid lanterns.” These lanterns have one core mismatched from the rest, thereby funnelling light from the fundamental fiber mode into a single output port while mixing the remaining light in the rest of the ports.

Here we outline the five types of photonic lanterns that have been reported to date.

1) Compact astronomical spectral filters. FBGs operate at the diffraction-limit which makes them difficult and inefficient to couple light to from either a seeing-limited telescope (a telescope that does not use Adaptive Optics (AO) to correct for the atmospheric turbulence) and/or a telescope which has a low performance AO system. The PLs described in the previous section form the ideal solution to collect light from such telescopes efficiently and exploit FBGs for spectral filtering.

2) Efficient fiber scrambling. Due to imperfections in the fiber, light couples between modes and excites new modes as it propagates along the fiber leading to an unstable output beam that varies with wavelength and time. This effect can also be confused as a barycenter shift in the measured spectral line and is known as modal noise. To combat this, fibers are generally agitated. MCFs in combination with PLs offer a unique solution to these issues. Indeed, it was realized early-on that a back-to-back PL built from a MCF could offer mode scrambling properties.

3) Wavefront sensing. The photonic lantern WFS (PL-WFS) represents a type of WFS, which addresses several of the limitations of current adaptive optics systems. Placing the WFS at the focal plane, rather than at a non-common pupil plane, has been long desired in adaptive optics as it eliminates non-common path error and is sensitive to wavefront errors not visible in the pupil plane (such as island modes).

Photonic lanterns allow for a multimode core to be converted to several single-mode cores. Owing to the multimode input, a PL is ideally suited to efficiently couple a low-quality beam (as a result of the atmospheric turbulence) from the focus of a telescope while delivering a diffraction-limited beam to an instrument.

In conclusion, the photonic lantern is a versatile and powerful concept, allowing the transformation of an optical multimode system into a single-mode one and enabling the use of single-mode-based photonic technologies in multimode systems for the first time. Photonic lanterns increase the functionality and possible applications of few-modal devices and systems. These mode converters offer the possibility of improving the light collecting ability while keeping and opening new photonic functionalities in astrophotonics and astronomical instruments.

Key words: Astronomical optics; Fiber optics; Photonic lantern; Spectral measurements; Wavefront sensing

OCIS Codes: 350.1260; 190.4180; 160.2290; 060.2310