

# 基于空分复用的可重构光分插复用器

杨康<sup>1</sup>, 李国玉<sup>1</sup>, 李燕<sup>1</sup>, 张木<sup>2</sup>, 贾素梅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>邯郸学院信息技术研究所, 河北邯郸 056005;

<sup>2</sup>中国联通邯郸市分公司, 河北邯郸 056000

**摘要** 为了满足全光网络中大容量数据上传、下载的需求, 提出了一种结合波分复用(WDM)、偏振复用(PDM)以及空分复用(SDM)的可重构光分插复用器(ROADM), ROADM使光分插复用器(OADM)上传、下载的能力提升了12倍。对基于WDM和PDM的OADM进行实验搭建和性能分析, 结果表明, 基于WDM和PDM的OADM不仅能够实现密集WDM, 还能稳定地实现PDM, 主要输出端口的偏振态稳定度达到0.01, 偏振分束器输出端的快、慢轴分光比接近1:1, 插入损耗小于9 dB。对基于光子灯笼(PL)和SDM的OADM进行模型搭建, 分别实现了6种模式和3种模式的复用, 结果表明, 基于PL和SDM的OADM不同模式间的有效折射率差大于 $6 \times 10^{-4}$ , 模间串扰小、隔离度高。

**关键词** 光通信; 可重构光分插复用器; 偏振复用; 光子灯笼

**中图分类号** TN915.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.100601

## Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer Based on Space Division Multiplexing

Yang Kang<sup>1</sup>, Li Guoyu<sup>1</sup>, Li Yan<sup>1</sup>, Zhang Mu<sup>2</sup>, Jia Sumei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Information Technology, Handan University, Handan, Hebei 056005, China;*

<sup>2</sup>*China Unicom Handan Branch, Handan, Hebei 056000, China*

**Abstract** In order to meet the requirements of uploading and downloading large-capacity data in all-optical networks, a reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM) based on wavelength division multiplexing (WDM), polarization division multiplexing (PDM) and space division multiplexing (SDM) is proposed, which can improve the uploading and downloading capacity of optical add-drop multiplexer (OADM) by 12 times. The OADM system based on WDM and PDM is built experimentally and performances are analyzed. Results show that the OADM based on WDM and PDM can achieve dense WDM and realize PDM steadily. The stability of the polarization state at main output port achieves 0.01, the splitting ratio of fast and slow axes at polarization beam splitter output port is close to 1:1, and the insertion loss is lower than 9 dBm. The OADM models based on photonic lantern (PL) and SDM are established, and the multimode multiplexing of six-mode and three-mode are realized respectively. Results show that the effective refractive index difference between different modes of OADM based on PL and SDM is larger than  $6 \times 10^{-4}$ , which indicates low inter mode interference and high isolation degree.

**Key words** optical communications; reconfigurable optical add-drop multiplexer; polarization division multiplexing; photonic lantern

**OCIS codes** 060.2330; 060.2340; 230.1150

**收稿日期:** 2017-03-21; **收到修改稿日期:** 2017-04-26

**基金项目:** 河北省自然科学基金(F2014109015)、邯郸市科学技术研究与发展计划(1523103064-1, 1621203035)、邯郸学院自然科学研究课题(14104)

**作者简介:** 杨康(1984—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: engineeringmaster@126.com

## 1 引言

可重构光分插复用器(ROADM)可以上传、下载一个或多个波长的信号而不会对其他器件造成影响。光分插复用器(OADM)具有多自由度,ROADM能够提供任意波长、模式端口在任意方向上的互连<sup>[1]</sup>,且具有无色、无方向性和无竞争性的特点,是未来智能光网络的发展方向<sup>[2-3]</sup>。

1999年 Liaw 等<sup>[4]</sup>提出了基于光纤布拉格光栅(FBG)和光开关的 ROADM,相较于之前的非重构 OADM,能够对上、下行波长进行灵活的配置,增强网络的抗风险能力,实现了每个通道中的光波以  $25 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$  的速率在单模光纤(SMF)上传输 100 km。但是,考虑到 FBG 的剩余后向反射和环形器的插入损耗,2000年 He 等<sup>[5]</sup>提出了利用相移长周期光栅来实现 OADM 的上传、下载,由于该方案不需要环形器也无后向反射,因此较基于 FBG 和光开关的 OADM 更具优势。为了适应与日俱增的网络速率,2004年 Munoz 等<sup>[6]</sup>提出了基于波导阵列光栅的 OADM,该 OADM 有 40 个传输通道,每个通道的传输带宽为 2.5 GHz。同时,为了解决 FBG 后向反射的问题,2005年 Huang 等<sup>[7]</sup>提出利用马赫-曾德尔干涉仪实现 OADM。文献[7-9]中提出利用微机电系统作为光开关,以解决 OADM 中 FBG 的后向反射问题。2006年 Castro 等<sup>[8]</sup>提出利用反对称 FBG 在双模光纤中实现光分插复用,此种结构不需要外部环形器,有利于提高集成度。为了提高网络容量和复用维度,OADM 由波分复用(WDM)发展到空分复用(SDM)<sup>[10]</sup>。2012年 Chen 等<sup>[9]</sup>提出了适用于少模光纤的 OADM,通过使用两个自由空间的薄膜滤波器实现不同模式的上传、下载。由于网络带宽需求的急速增长,越来越多的研究人员将 SDM 技术运用到 OADM 中,2016年 Kaur 等<sup>[11]</sup>将 OADM 用于 4 个通道上高速多模链路短距离传输中,在 850 nm 和 850.5 nm 波长处均能实现厄米-高斯模(HG<sub>00</sub> 和 HG<sub>01</sub>)的传输。

本文提出将偏振复用(PDM)和模式复用(MDM)应用于 OADM,系统结构简单、扩展性好,可进一步扩展 OADM 携带信息的容量。对基于 WDM 和 PDM 的 OADM 进行系统模型的建立,并进行了实验搭建和性能分析,结果表明基于 WDM 和 PDM 的 OADM 不仅能够实现密集 WDM,还能稳定地实现 PDM,主要输出端口的偏振态稳定度高,插入损耗小。对基于光子灯笼(PL)和 SDM 的 OADM 进行模型搭建,实现了模式复用,分析表明不同模式间串扰小、隔离度高。

## 2 基于 WDM 和 PDM 的 OADM 系统模型的建立及实验分析

基于 WDM 和 PDM 的 OADM 系统模型如图 1 所示,实验部分的光路也根据此结构进行搭建。将宽带光源连接梳状滤波器以模拟光网络中同时传输的多波长光信号,波长间隔为 0.8 nm。光波依次通过环形器 1、2 端口,利用可调谐 FBG 选择某一波长的光并将其送往 3 端口下载,光波经过起偏器后由非偏振光变为偏振光(一般为椭圆偏振),再由偏振分束器(PBS)将偏振光分成两束相互正交的椭圆偏振光(快轴和慢轴,两者相位相差  $90^\circ$ ),分别加载信号后由外围总线计算机(PBC)将两束相互正交的偏振光合为一束,通过耦合器上传并输出信号。图 1 中的 OADM 波长是连续调谐的,因此适用于密集 WDM 系统。

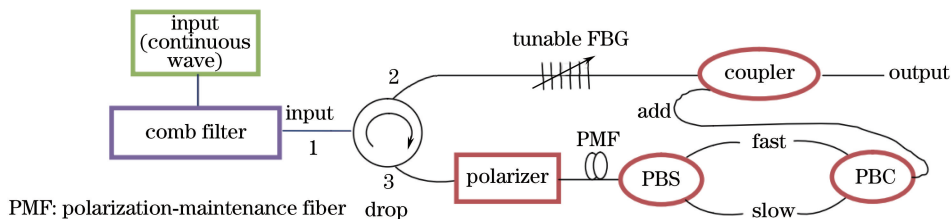


图 1 基于 WDM 和 PDM 的 OADM 系统示意图

Fig. 1 Schematic of OADM system based on WDM and PDM

理想情况下,PBS 输出的两个偏振态相互正交,互不干扰,SMF 中两个相互正交的偏振态电场分布如图 2 所示,由此看出该结构能够将 OADM 的上传、下载能力都提高 2 倍。实际上,光纤本身制造工艺及外部环境的影响会使两个偏振模式的传播常数不相等,从而产生双折射现象,造成光在光纤中传输时偏振态不稳定,因此对基于 SDM 的 OADM 偏振稳定性进行分析尤为重要。

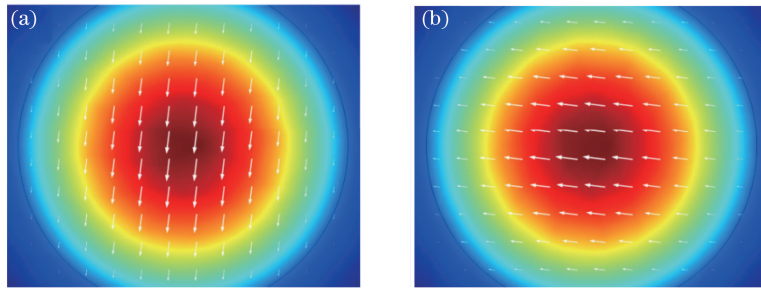


图 2 SMF 中两个相互正交的偏振态的电场分布。(a)偏振态为 HE11a;(b)偏振态为 HE11b

Fig. 2 Electric-field distributions of two orthogonal polarization states in SMF.

(a) Polarization state HE11a; (b) polarization state HE11b

对简化后的 OADM 系统(图 1)进行了搭建和性能测试。环形器 3 端口的下载光谱和 PBC 输出的光谱如图 3、4 所示。由图可以看出,OADM 上传、下载光波的波长  $\lambda=1552.4\text{ nm}$ ,上传、下载的波长具有较好的一致性。另外,由光谱图可知,输出光谱功率  $P_{\text{out}}$  比输入光谱功率  $P_{\text{in}}$  降低了 9 dB 左右,这是因为环形器 3 端口输出的光为非偏振光,光信号经过起偏器后变为偏振光,在此过程中光功率有所降低。

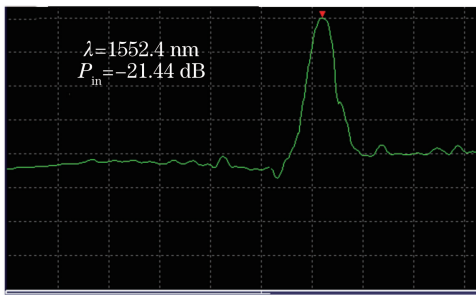


图 3 环形器 3 端口下载光谱

Fig. 3 Download spectrogram from port 3 of circulator

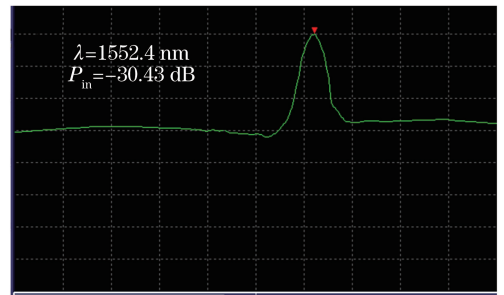


图 4 PBC 输出光谱

Fig. 4 Output spectrogram of PBC

接下来对 OADM 的稳定性进行分析,分别对 PBS 的快轴、慢轴以及 PBC 输出的偏振态进行稳定性测试。通过观察邦加球可得快、慢轴输出功率分别为  $-26.343\text{ dB}$  和  $-25.650\text{ dB}$ ,分光比接近 1:1。快轴的斯托克斯参数为: $S_1=-0.342, S_2=-0.139, S_3=0.928$ ;慢轴的斯托克斯参数为: $S_1=-0.303, S_2=-0.138, S_3=0.937$ 。

图 5~7 分别为 24 h 内监测的 PBS 快轴、慢轴、PBC 输出端斯托克斯参数的稳定度曲线。经过数据处理后,3 个输出端斯托克斯参数的标准差如表 1 所示。3 个端口斯托克斯参数的标准差均在 0.01 以下,由此可得该结构的 OADM 稳定性能比较优良。

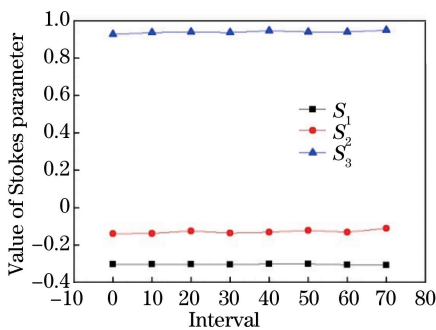


图 5 PBS 快轴斯托克斯参数稳定度曲线

Fig. 5 Stocks parameter stability curve of PBS fast axis

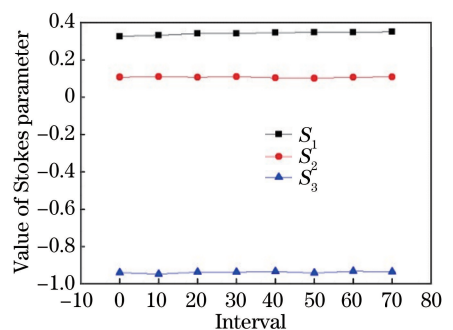


图 6 PBS 慢轴斯托克斯参数稳定度曲线

Fig. 6 Stocks parameter stability curve of PBS slow axis

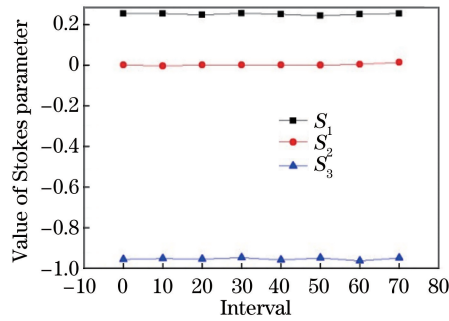


图 7 PBC 输出端斯托克斯参数稳定度曲线

Fig. 7 Stocks parameter stability curve of PBC output port

表 1 PBS 快轴、慢轴以及 PBC 输出端斯托克斯参数的标准差

Table 1 Standard deviation of Stocks parameters of PBS fast axis, PBS slow axis and PBC output port

Item	Standard deviation		
	$S_1$	$S_2$	$S_3$
PBS fast axis	0.00256	0.00946	0.00630
PBS slow axis	0.00874	0.00285	0.00501
PBC output port	0.00396	0.00523	0.00550

### 3 基于 PL 和 SDM 的 OADM 模型的设计和仿真

图 1 所示结构为基本系统模型,其扩展模型如图 8 所示,图中 LP01、LP02、LP11a 为 3 种线偏振模式。扩展系统能够进一步增加 OADM 所能承载的容量。将环形器 3 端口输出端 SMF 与少模光纤(FMF)相连接,FMF 输出端与拉制好的 PL 熔接,以 6 模式的 PL 为例,PL 的选择需考虑 FMF 能够传输的模式数与 PL 输出端 SMF 数量的一致性,否则在复用过程中会有信号丢失。该结构中用到的 6 模式 PL 设计结构以及模场分布如图 9 所示。

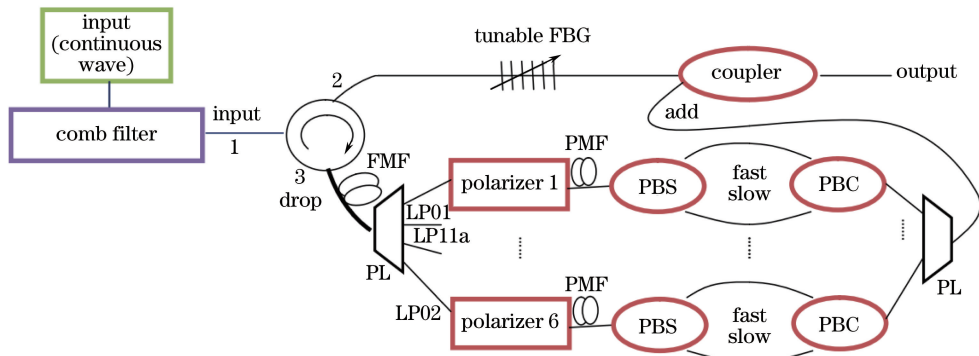


图 8 基于 PL 和 SDM 的 OADM 系统示意图

Fig. 8 Schematic of OADM system based on PL and SDM

由图 9 可以看出,支持 6 个模式的 PL 能够实现不同模式的独立传输,其中 LP01、LP11、LP21、LP02 的有效折射率分别为  $n_{\text{eff}01} = 1.44338$ ,  $n_{\text{eff}11} = 1.44276$ ,  $n_{\text{eff}21} = 1.44209$ ,  $n_{\text{eff}02} = 1.44078$ ,不同模式间的最大有效折射率差大于 0.0006,能够有效避免模式耦合并减小模间串扰。在不同的简并模式下,根据电场的不同又可以通过 PBS 分离出两种不同的偏振态,此种扩展结构的 OADM 上传、下载能力相较于基于 PDM 的 OADM 模型提升了 6 倍,较基于 WDM 的 OADM 提升了 12 倍,传输容量得到了大幅增加。

基于 PL 的 OADM 具有可调谐带宽大、复用模式多等优点,其缺点为 PL 的控制条件较为苛刻,产生不同模式的单根光纤微观结构不同,实验的重复性较差,因此本文还在 Optisystem 中搭建了基于 SDM 的

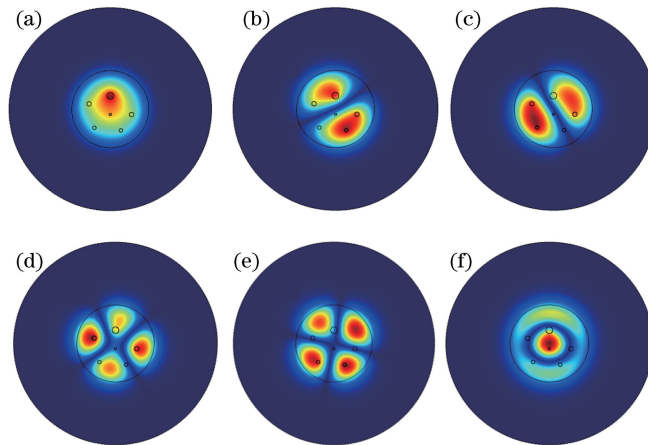


图 9 6 模式 PL 的模场分布图。(a) LP01;(b) LP11a;(c) LP11b;(d) LP21a;(e) LP21b;(f) LP02

Fig. 9 Mode-field distributions of six modes of PL. (a) LP01; (b) LP11a; (c) LP11b; (d) LP21a; (e) LP21b; (f) LP02

OADM 系统图。所设计的基于 SDM 的 OADM 能够实现对 LP01、LP11a 以及 LP11b 的复用、传输和解复用。当输入功率为 1 mW 时,复用端 LP01 模式的功率为 11 dBm,LP11a 和 LP11b 模式的功率为 7 dBm,更高阶模式的功率小于 0 dBm。在解复用端,LP01 模式的功率为 12 dBm,LP11a 和 LP11b 模式的功率为 8.6 dBm,更高阶模式的功率小于 0 dBm。基于 SDM 的 OADM 具有模式隔离度高、模间串扰小、结构简单、重复性好等优点,但该结构将空间光耦合进光纤的过程中存在较大的插入损耗。

## 4 结 论

在基于 PDM 的 OADM 的基础上,提出了将 WDM 与 SDM 相结合,这使 OADM 上传、下载的能力提升了 12 倍。对基于 WDM 和 PDM 的 OADM 系统模型进行实验搭建和性能分析,结果表明,基于 SDM 的 OADM 的主要输出端口的偏振态稳定度达到 0.01 以上,不仅能够实现波长复用,还能稳定地实现 PDM。PBS 输出端快、慢轴的分光比接近 1:1,但 PBC 的输出功率比 PBS 输入功率降低约 9 dB,这是因为环形器 3 端口输出的光经过起偏器时,会产生光波损耗,今后需对该 OADM 结构进行进一步的优化。利用 COMSOL 对基于 PL 的 OADM 模型进行分析和仿真,对支持 6 种模式的 PL 进行仿真设计,并在 Optisystem 中建立基于 SDM 的 OADM 模型,分析表明,基于 SDM 的 OADM 具有模间串扰小、隔离度高的优点。

## 参 考 文 献

- [1] Rontaine N K, Ryf R, Liu C, *et al.* Few-mode fiber wavelength selective switch with spatial-diversity and reduced-steering angle[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2014: Th4A.7.
- [2] Yang Kang, Li Guoyu, Li Yan, *et al.* Tunable bi-directional optical add-drop multiplexer based on fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 120604.  
杨康, 李国玉, 李燕, 等. 光纤布拉格光栅可调谐双向光分插复用器关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 120604.
- [3] Liu Mingsheng, Zheng Wenhua, Yang Kang, *et al.* Novel optical add-drop multiplexer based on Mach-Zehnder interferometer and fiber grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110603.  
刘明生, 郑文华, 杨康, 等. 基于 Mach-Zehnder 干涉仪和光纤光栅型光分插复用器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110603.
- [4] Liaw S K, Ho K P, Chen Y K, *et al.* Reconfigurable WDM add/drop multiplexer based on optical switches and fiber Bragg gratings[J]. Optical and Quantum Electronics, 1999, 31(1): 77-83.
- [5] He J L, Sun X H, Zhang M D. A novel add/drop multiplexer architecture for DWDM network[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2000, 21(1): 57-62.
- [6] Munoz P. Penalty evaluation due to the cascade and frequency misalignment of AWG-based optical add-drop

- multiplexers in 10 Gb/s metro core ring networks[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2004, 23(2/3): 59-65.
- [7] Huang Y L, Dong X F, Li J, *et al.* Analysis and testing of a novel OADM based on FBG and Mach-Zehnder interferometer[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 45(2): 156-158.
- [8] Castro J M, Geraghty D F, Honkanen S, *et al.* Optical add-drop multiplexers based on the antisymmetric waveguide Bragg grating[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(6): 1236-1243.
- [9] Chen X, Li A, Ye J, *et al.* Reception of mode-division multiplexed superchannel via few-mode compatible optical add/drop multiplexer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14302-14307.
- [10] Li Fangzhan, Wang Di, Wang Cui, *et al.* Method of large-size holographic reconstruction based on spatial multiplexing[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0409001.  
李芳转, 王迪, 王翠, 等. 基于空分复用的大尺寸全息再现方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0409001.
- [11] Kaur D, Chaudhary S.  $4 \times 10$  Gbps cost effective hybrid OADM-MDM short haul interconnects[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(7): 1613-1617.