

# 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化

杨 芳<sup>1,2</sup> 唐 明<sup>1,2</sup> 李博睿<sup>1,2</sup> 付松年<sup>1,2</sup> 刘 爽<sup>1</sup> 韦会峰<sup>3</sup> 成 煜<sup>3</sup> 童维军<sup>3</sup> 刘德明<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074  
<sup>2</sup> 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074  
<sup>3</sup> 长飞光纤光缆有限公司研发中心, 湖北 武汉 430073

**摘要** 当前光通信网络正朝着大规模、大容量的方向迅速发展, 传输带宽所面临的巨大增长压力对通信光纤提出了更高的要求。在此背景下, 基于空分复用的多芯光纤充分利用了空间维度, 可以有效解决传统单模光纤的理论传输容量极限导致的容量紧缩问题, 而大容量传输系统要求多芯光纤具有低串扰大模场面积的光学特性。通过采用光束传输法和有限元法模拟仿真了多芯光纤中各结构参量对芯间串扰和有效模场面积的影响, 并利用两种不同参数的多芯光纤进行了实验验证, 对芯间距、纤芯/沟道的尺寸和折射率进行了优化, 在理论上完成了串扰小于  $-45$  dB、模场面积大于  $130 \mu\text{m}^2$  多芯光纤的设计。

**关键词** 光纤光学; 多芯光纤; 数值仿真; 低串扰大模场面积

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0106005

## Design and Optimization of Multi-Core Fibers with Low Crosstalk and Large Effective Area

Yang Fang<sup>1,2</sup> Tang Ming<sup>1,2</sup> Li Borui<sup>1,2</sup> Fu Songnian<sup>1,2</sup> Liu Shuang<sup>1</sup> Wei Huifeng<sup>3</sup>  
Cheng Yu<sup>3</sup> Tong Weijun<sup>3</sup> Liu Deming<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>2</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>3</sup> Yangtze Optical Fiber and Cable Company Ltd. R&D Center, Wuhan, Hubei 430073, China

**Abstract** Currently, optical communication network is developing rapidly towards large scale and large capacity. Higher request in optical fiber communication system is put forward to face with the huge pressure of transmission bandwidth. Under this background, multicore fiber (MCF) based on space division multiplexing (SDM), overcomes the congestion problem caused by the theoretical transmission limit of single mode fiber. Multicore fiber cannot be used in the transmission system only if it has the optical properties of low crosstalk and large effective area. Intensive simulation work based on beam propagation method (BPM) and finite element method are performed to find out key parameters which have a great influence on crosstalk and effective area in multicore fibers, which are used in the experiment to prove the correctness of simulated results. The designs of core pitch, the size and the refractive index of core and trench are optimized simultaneously to theoretically achieve optical properties suitable for the future large capacity transmission with low crosstalk less than  $-45$  dB after 100 km and large effective areas larger than  $130 \mu\text{m}^2$ .

**Key words** fiber optics; multicore fiber; numerical simulation; low crosstalk and large effective area

**OCIS codes** 060.2310; 060.2270; 060.2280; 060.2400

收稿日期: 2013-07-12; 收到修改稿日期: 2013-08-23

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328305)、国家自然科学基金(61107087, 61205063, 61331010)、国家 863 计划主题项目(2013AA013402, 2012AA011301)

作者简介: 杨 芳(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事多芯光纤通信方面的研究。E-mail: yangfang.hust@gmail.com

导师简介: 唐 明(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事高速光纤通信系统、光纤光学、非线性光学、光纤激光器和放大器以及太赫兹波科学与技术等方面的研究。E-mail: tangming@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

随着全球化因特网服务的普及与快速增长,人们对大容量光传输网络的需求进一步提高,带宽需求呈指数形式增长。然而即使采用先进的调制格式,单根光纤的容量仍已逼近极限,“容量紧缩”问题日益显现,如果没有一个新的重大突破,光纤传输容量的增长将无法跟上日益繁忙的长距离链路的需求<sup>[1-2]</sup>。在接入网包括数据中心互联应用方面,用户接入数量的提高和对更高带宽的需求,促使接入网需有能够提供大容量通信的能力。如果仍采用现有的技术,将导致分支输入光纤数量的大幅增加,造成输送管道里的拥塞<sup>[3]</sup>。预计在 2015 年,100 Gb/s 的以太网将得到普及,单根光纤将需要传输 10 Tb/s 甚至更高速率的信号<sup>[4]</sup>。为实现如此高的速率,传统的单模光纤的设计有待突破。在此背景下,通信用的多芯光纤成为近几年的研究热点,在时分复用技术(TDM)、波分复用技术(WDM)日益成熟后,空分复用技术(SDM)成为进一步提高带宽的方法。使用多个纤芯同时传输数据的多芯光纤的技术,极有可能成为下一代光网络传输介质。

多芯光纤在具有独特优势的同时,由于在与单芯光纤同样的结构中引入更多的纤芯,芯与芯之间

不可避免地存在串扰,这是必须面对要解决的问题。同时对于多电平信号来说,非线性效应会引起严重的信号畸变,所以大模场面积也是很必要的。参考文献[5-12]都对低串扰大模场多芯光纤进行了研究。为了更清楚地了解光纤各结构参量对串扰和有效模场面积的影响,分别总结了纤芯距、纤芯和沟道的尺寸以及折射率对串扰和有效模场的影响规律。

## 2 多芯光纤设计与仿真

设计的带沟道的七芯光纤模型及其折射率分布如图 1 所示,除中间纤芯外,其余 6 个纤芯分布在边长为  $\Lambda$ (即芯间距)的正六边形顶点,沟道结构能够更好地将光限制在纤芯内,从而实现低串扰、大模场面积<sup>[11-12]</sup>。图中  $d$  为芯径, $d_1$  为沟道内径, $d_2$  为沟道外径, $\Delta_1$  为纤芯折射率, $\Delta_2$  为沟道折射率。为了得到光纤各个结构参量对串扰、模场的影响关系,采用单因子变量法,即每次只改变一个参量而其他参量不变。为此,需先设置一组基准参量,如表 1 所示,表中  $L$  为光纤长度,没有列出的包层直径取值随芯间距、沟道外径的增大而适当增大,除此之外当其他参量为变量时,取  $125 \mu\text{m}$ 。

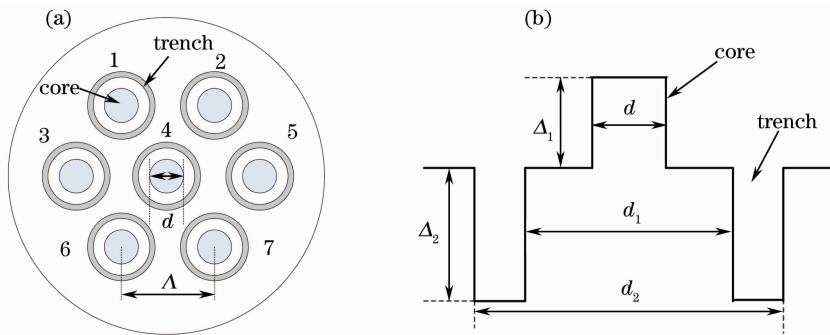


图 1 (a)七芯光纤模型与(b)折射率分布示意图

Fig. 1 (a) Structure and (b) refractive index profile of seven-core fiber

表 1 多芯光纤基准参量表

Table 1 Basic optical parameters of the multicore fiber

Item	$d$	$d_1$	$d_2$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Lambda$	$L$
Data	$9 \mu\text{m}$	$24 \mu\text{m}$	$36 \mu\text{m}$	0.25%	-0.4%	$42 \mu\text{m}$	100 km

模拟多芯光纤的串扰采用基于光束传输法(BPM)的 Rsoft-Beam-PROP 软件,光源从中间芯注入,周围芯输出,传输 100 km 后分别得到中间芯和周围芯的输出功率值  $P_1$ 、 $P_2$ ,其串扰  $c$  为

$$c = 10\lg(P_2/P_1). \quad (1)$$

同时为了验证模拟方法的正确性,利用已有的两种

多芯光纤进行实验测量验证,其中光纤结构参量如表 2 所示。实验测量利用同芯熔接<sup>[13]</sup>和偏芯熔接,分别得到中间芯输出功率值  $P_1$  和周围芯的输出功率  $P_2$ ,同样按(1)式进行计算串扰,实验上串扰的测量采用波长为 1550 nm 的光源,且考虑了熔接损耗、光纤衰耗及其他附加损耗。

表 2 多芯光纤参量表

Table 2 Optical parameters of the multicore fibers

	$d$	$d_1$	$d_2$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Lambda$
Fiber 1	8.96 $\mu\text{m}$	20.5 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	0.25 %	-0.4 %	35 $\mu\text{m}$
Fiber 2	8.98 $\mu\text{m}$	21.8 $\mu\text{m}$	32 $\mu\text{m}$	0.26 %	-0.33 %	42 $\mu\text{m}$

### 2.1 芯间距

当芯间距  $\Lambda$  在 30~70  $\mu\text{m}$  变化时, 分别得到 1550 nm 与 1625 nm 波长下芯间距与串扰的关系曲线, 如图 2 所示, 测试值与模拟值有相同的趋势和近似的数值, 证明了模拟仿真的正确性, 随着芯间距的增大, 串扰基本呈线性下降趋势。但即使如此, 在拉制光纤时需考虑拉制工艺及成本, 并非芯间距越大越好, 因为过大芯间距的多芯光纤将无异于多根单模光纤。对于模场面积针对的是单个纤芯, 与芯间距没有直接关系。

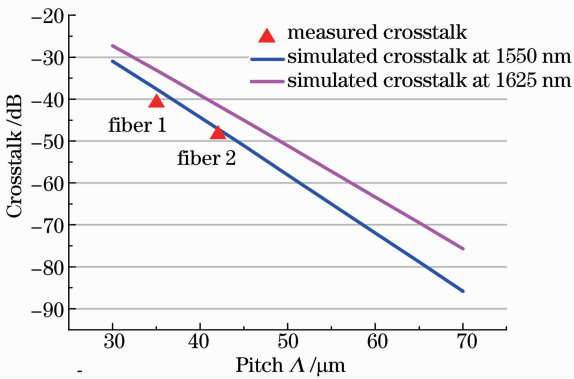


图 2 测试与模拟串扰值与芯间距关系曲线

Fig. 2 Measured and simulated crosstalks as functions of core pitch

### 2.2 纤芯尺寸及其折射率

取纤芯直径  $d$  从 6~13  $\mu\text{m}$  逐一进行仿真, 得到两个波长下纤芯直径与串扰关系曲线如图 3 所示, 可以看出改变纤芯直径对串扰有较大影响, 随着芯径的不断增大, 串扰也不断降低, 但降低的趋势逐

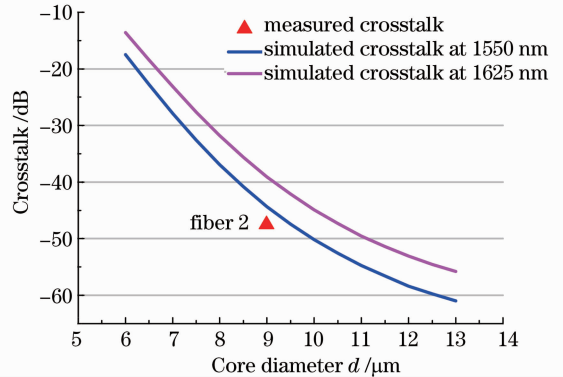


图 3 测试与模拟串扰值与芯径关系曲线

Fig. 3 Measured and simulated crosstalks as functions of core diameter

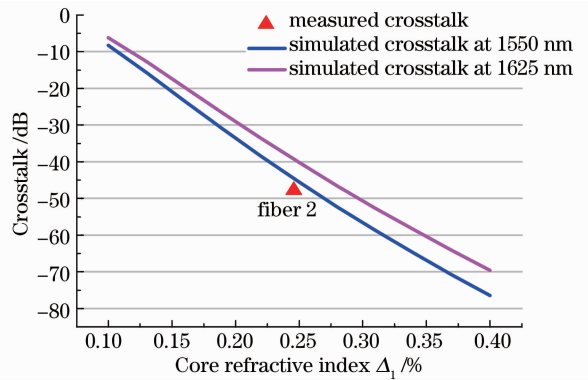


图 4 测试与模拟串扰值与纤芯折射率关系曲线

Fig. 4 Measured and simulated crosstalks as functions of core refractive index

渐变缓, 曲线趋于抛物线型。取纤芯相对折射率从 0.1 % 变化到 0.4 % 进行模拟仿真, 得到与串扰关系

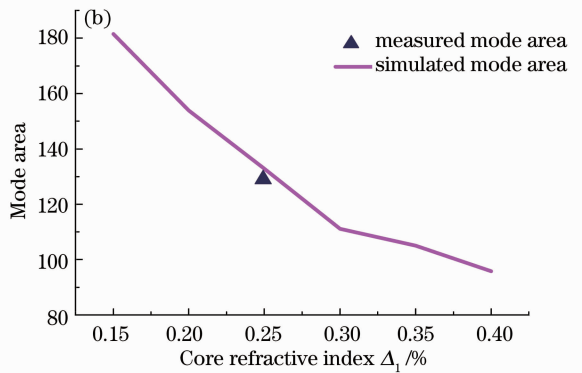
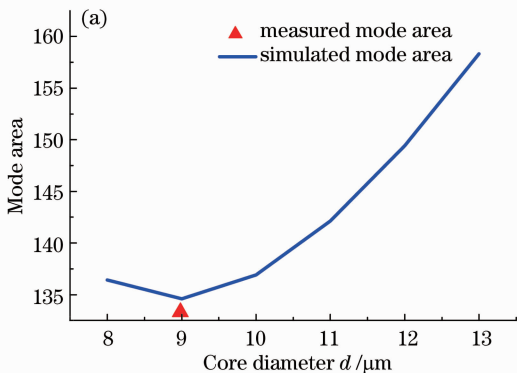


图 5 (a) 纤芯直径和(b)纤芯折射率与模场面积关系曲线

Fig. 5 Relationship between core diameter/relative refractive index and mode area. (a) Mode area versus core diameter; (b) mode area versus core refractive index

曲线如图 4 所示,即纤芯折射率对串扰也有非常大的影响,折射率增大时,串扰以近似线性趋势降低。且实验数据与模拟结果吻合较好。

为了确定芯径和芯包折射率差对模场面积的影响关系,利用基于有限元算法的 Comsol 软件,对不同芯径以及芯包折射率差条件下的模场面积进行了模拟,并与实验测量值进行比较,结果如图 5 所示,由图 5 可以看出增大芯径、降低纤芯折射率可以增大模场面积。

### 2.3 沟道尺寸及其折射率

取沟道内径  $d_1$  为  $9\sim 33\ \mu\text{m}$ ,外径  $d_2$  为  $26\sim$

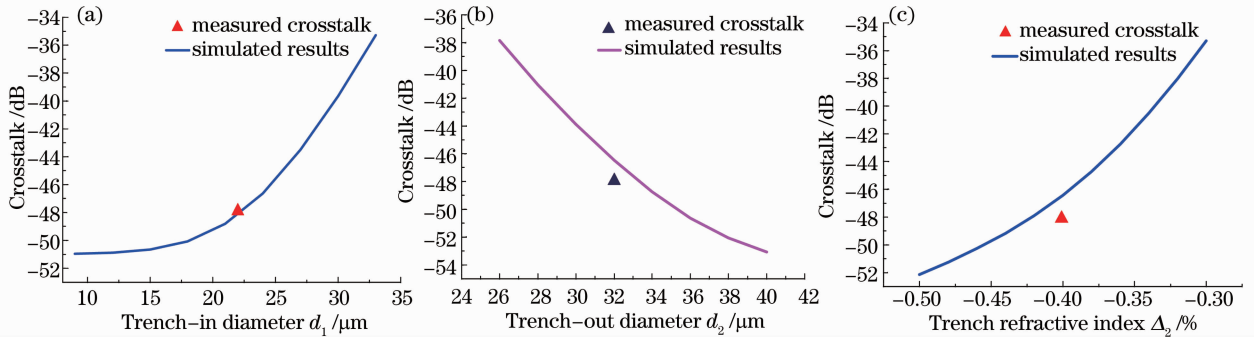


图 6 (a)沟道内径、(b)沟道外径和(c)相对折射率差与串扰的关系曲线

Fig. 6 Relationship between trench diameter/relative refractive index and crosstalk. (a) Crosstalk versus trench-in diameter; (b) crosstalk versus trench-out diameter; (c) crosstalk versus trench refractive index

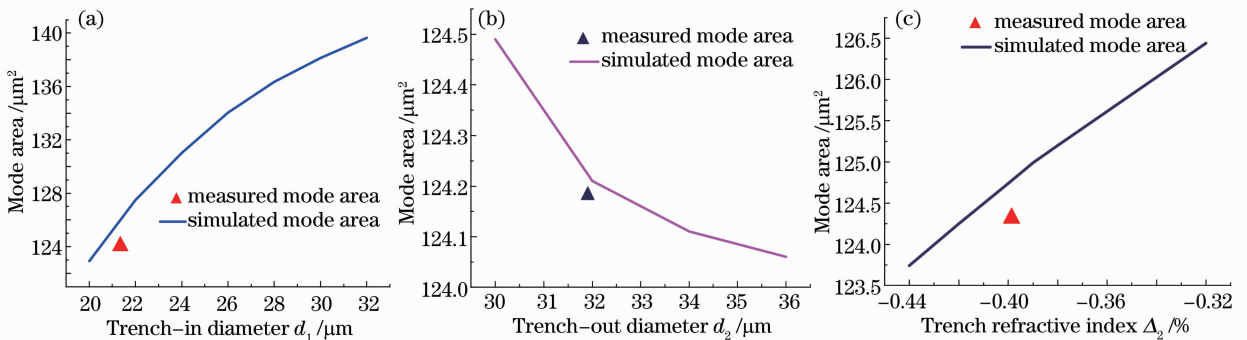


图 7 (a)沟道内径、(b)沟道外径和(c)相对折射率差与模场面积的关系曲线

Fig. 7 Relationship between trench diameter/relative refractive index and mode area. (a) Mode area versus trench-in diameter; (b) mode area versus trench-out diameter; (c) mode area versus trench refractive index

## 3 设计优化

以上分别讨论了多芯光纤中各个光纤结构参量包括纤芯间距、纤芯和沟道的尺寸以及折射率对芯间串扰、有效模场面积的单独影响关系,在光纤设计中则需要综合考虑。除此之外,保证在通信波段  $1550\ \text{nm}$  波长处是单模传输也是必须要满足的条件,多芯光纤中的截止波长并不完全与普通阶跃光纤相同,这是由于增加了沟道结构的限光作用(对于中间纤芯尤为明显)以及多个纤芯之间的相互影响,

$40\ \mu\text{m}$ ,沟道折射率  $\Delta_2$  为  $-0.3\%\sim -0.5\%$  逐一进行仿真,得到波长  $1550\ \text{nm}$  处与串扰关系曲线如图 6 所示,可以看出串扰随沟道内径减小、外径增大、折射率差增大而降低,即沟道越深越宽串扰越小。

为了分析沟道尺寸和折射率对模场面积的影响关系,同样利用 Comsol 软件对不同沟道尺寸以及折射率条件下的模场面积进行了模拟,结果如图 7 所示,可见增大沟道内径、减小外径、减小沟道与包层的折射率差可以增大模场面积,即沟道越窄越浅模场面积越大。

所以多芯光纤的截止波长相对于普通单模光纤会向长波长偏移<sup>[14-15]</sup>;而由于中间纤芯周围都有沟道结构,周围纤芯则只有中间纤芯一个方向限制作用较强,因此中间纤芯相对于周围纤芯截止波长也会向长波长偏移<sup>[12,16]</sup>,在设计时应保证各个纤芯的截止波长都低于通信波长  $1550\ \text{nm}$ 。

通信用多芯光纤需要达到的性能指标低串扰、大模场、较小的截止波长三者之间是相互矛盾、相互制约的关系,不可能同时做到最好,只能通过平衡各

个参量实现各性能指标之间的均衡。通过大量的模拟仿真,找到如表3所示3组最佳平衡参量,在保证1550 nm波长处单模的前提下能实现芯间串扰低于-45 dB,模场面积大于130  $\mu\text{m}^2$ ,最大可达到150  $\mu\text{m}^2$ ,可根据实际应用的不同需求进行选取。

表3 设计多芯光纤参量及光学性能表( $L=100$  km,  
 $\Delta=41$   $\mu\text{m}$ ,  $\lambda=1550$  nm)

Table 3 Optical parameters and properties of designed multicore fiber ( $L=100$  km,  $\Delta=41$   $\mu\text{m}$ ,  $\lambda=1550$  nm)

Parameter	Value		
Core diameter / $\mu\text{m}$	11.0	11.5	12.0
Core index /%	0.192	0.175	0.161
Mode area / $\mu\text{m}^2$	133.42	143.5	153.17
Crosstalk /dB	-50.9529	-48.0787	-45.6625

## 4 结 论

针对可用于大容量长距离传输系统且存在容量紧缩的多芯光纤要求的光学性能——低串扰、大模场面积进行了大量理论计算、模拟仿真和实验测试,详细分析了多芯光纤中各结构参量包括纤芯间距、纤芯和沟道的尺寸以及折射率与芯间串扰、有效模场面积之间的关系,并进行了实验验证,最后通过这些对应关系对多芯光纤结构进行设计优化,提出三种光纤结构,该光纤能够实现芯间串扰低于-45 dB,模场面积大于130  $\mu\text{m}^2$ 。

## 参 考 文 献

- 1 T Morioka. New generation optical infrastructure technologies; "EXAT initiative" towards 2020 and beyond [C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2009. 1-2.
- 2 R J Essiambre, G Kramer, P J Winzer, *et al.*. Capacity limits of optical fiber networks [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(4): 662-701.
- 3 B Zhu, T F Taunay, M F Yan, *et al.*. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network [J]. Opt Express,

- 2010, 18(11): 11117-11122.
- 4 M Jinno, Y Miyamoto, Y Hibino. Optical-transport networks in 2015 [J]. Nature Photon, 2007, 1(3): 157-159.
- 5 M Koshiba, K Saitoh, Y Kokubun. Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle [J]. IEICE Electron Express, 2009, 6(2): 98-103.
- 6 J M Fini, B Zhu, T Taunay, *et al.*. Crosstalk in multi-core optical fibres [C]. European Conference and Exposition on Optical Communications, 2011. M01. LeCervin. 4.
- 7 K Imamura, Y Tsuchida, K Mukasa, *et al.*. Investigation on multi-core fibers with large  $A_{\text{eff}}$  and low micro bending loss [J]. Opt Express, 2011, 19(11): 10595-10603.
- 8 T Hayashi, T Taru, O Shimakawa, *et al.*. Ultra-low-crosstalk multi-core fiber feasible to ultra-long-haul transmission [C]. National Fiber Optic Engineers Conference, 2011. PDPC2.
- 9 Gong Lingxian, Wang Chuncan, Chen Xue, *et al.*. Research of large mode area multi-core fibers with low bending loss [J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, 27(5): 36-39.
- 10 巩玲仙, 王春灿, 陈 雪, 等. 低弯曲损耗大模场面积多芯光纤的研究[J]. 光电技术应用, 2012, 27(5): 36-39.
- 11 K Takenaga, S Matsuo, K Saitoh, *et al.*. Characterisation of MC fibers; new techniques and challenges [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012. OTu1D. 5.
- 12 Zheng Siwen, Ren Guobin, Lin Zhen, *et al.*. Influence of trench parameters on the characteristic of trench-assisted multi-core fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006001.
- 13 郑斯文, 任国斌, 林 楨, 等. 下陷层参数对掺氟下陷层多芯光纤特性的影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1006001.
- 14 K Imamura, H Inaba, K Mukasa, *et al.*. Multi core fiber with large  $A_{\text{eff}}$  of 140  $\mu\text{m}^2$  and low crosstalk [C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2012. Mo. 1. F. 2.
- 15 J Sakaguchi, B J Puttnam, W Klaus, *et al.*. 19-core fiber transmission of 19  $\times$  100  $\times$  172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s [C]. National Fiber Optic Engineers Conference, 2012. PDP5C.1.
- 16 M Bigot-Astruc, F Gooijer, N Montaigne, *et al.*. Trench-assisted profiles for large-effective-area single-mode fibers [C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2008. Mo. 4. B. 1.
- 17 K Takenaga, Y Arakawa, S Tanigawa, *et al.*. Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011. OWJ4.
- 18 Zhang Yu, Liu Zhihai, Yang Jun, *et al.*. An optical power coupling ratio control approach among multi-cores in a multi-core fiber [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1205002.
- 19 张 羽, 刘志海, 杨 军, 等. 多芯光纤注入光功率分布比例控制方法[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1205002.

栏目编辑: 王晓球