

## 低串扰高密度复合型多芯光子晶体的光纤理论研究

张函, 汪国瑞, 张继伟, 李曙光, 闫欣, 王方, 张学楠, 程同蕾\*

东北大学信息科学与工程学院流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004

**摘要** 将传统阶跃型光纤与光子晶体光纤结构相结合, 提出并研究了复合型 7 芯光子晶体光纤。该光纤可在有效降低芯间串扰的同时增大光纤的纤芯密度, 为实现大容量、长距离的光纤空分复用技术提供了新思路。通过理论分析了掺锗纤芯以及纤芯周围空气孔的参数, 结果表明, 在 1550 nm 波长处中间纤芯与外围 6 个纤芯间的串扰低于 -60 dB/km, 有效模场面积大于  $90 \mu\text{m}^2$ , 芯间距最小为 31.7  $\mu\text{m}$ 。以 31 芯光纤为例, 其相对纤芯复用因子可达 8.78, 可用于低串扰、大容量、长距离传输的网络系统, 对用于空分复用的多芯光纤设计具有指导意义。

**关键词** 光纤光学; 多芯光纤; 空分复用; 串扰

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0706005

### 1 引言

信号传输系统通信容量的指数增长, 使提高光传输介质容量的需求越来越迫切。近年来, 时间、波长、偏振复用技术使光纤传输能力得到了显著提高<sup>[1-2]</sup>, 但传统单模光纤系统的容量也已经接近极限<sup>[3]</sup>, 因此, 基于多芯光纤 (MCF) 的空分复用 (SDM) 技术成为了新的研究热点, 有望克服光纤物理极限、提高介质传输能力、解决单模光纤传输容量不足等问题<sup>[4]</sup>。MCF 在单根光纤中引入多根纤芯, 不可避免的存在串扰 (XT), 对单模 MCF 而言, 抑制芯间串扰 (ICXT) 是实现大容量长距离传输的关键问题<sup>[5]</sup>。已有研究表明, MCF 中的 ICXT 可被限制在一定范围内。为了抑制 XT, 人们提出了多种解决方案, 如在纤芯周围加空气孔的孔辅助型 MCF、在纤芯周围采用低掺杂材料构成低折射率沟道的沟道辅助型 MCF<sup>[6-10]</sup>。增大纤芯距离是降低 XT 最直接的方法, 但受光纤尺寸限制, 纤芯间距不能过大, 否则会降低光纤的纤芯复用因子 (CMF), 即低 XT 和高纤芯密度呈相互制约关系, 如何在降低 XT 的同时增大纤芯密度, 是将 MCF 应用于 SDM 系统的关键问题。光子晶体光纤 (PCF) 具有传统光纤难以实现

的特性, 自提出以来备受关注<sup>[11]</sup>。相比传统石英光纤, PCF 最大的优势是其结构设计的灵活性<sup>[12]</sup>。如果将阶跃型 MCF 与 PCF 相结合, 同时发挥阶跃型 MCF 对光束的束缚作用和 PCF 结构设计的灵活性, 可进一步降低 XT、减小芯间距。

本文提出了一种低串扰、高纤芯密度的复合型 7 芯 PCF, 其掺锗纤芯的折射率为阶跃型分布, 纤芯周围空气孔的分布与 PCF 类似。该光纤结合了传统阶跃型 MCF 和 PCF 的优点, 将光束更好地束缚在纤芯内, 有效减小了各纤芯间的模场重叠, 在抑制 XT 的同时, 提高了光纤的纤芯密度。基于模式耦合和功率耦合理论, 用有限元法 (FEM) 计算了光纤的 XT<sup>[13-15]</sup>, 分析了复合型多芯 PCF 各结构参数在 1550 nm 波长处对光纤光学性能的影响, 对设计研发用于 SDM 系统的多芯 PCF 具有一定的理论指导意义。

### 2 7 芯光纤串扰理论

XT 可定义为 1 个纤芯内传输信号对相邻纤芯信号的影响, 相邻纤芯间的 XT 可用功率信号比表征。对于同质弱耦合 7 芯光纤, 每个纤芯的模场分布相对独立, 且每个纤芯仅支持基模传输, 光纤单模截止波

收稿日期: 2020-09-23; 修回日期: 2020-10-23; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2204001)、国家自然科学基金 (61775032, 11604042)、教育部基本科研业务费 (N180406002, N180408018, N2004021)、111 引智基地 (B16009)

\*E-mail: chengtonglei@ise.neu.edu.cn

长可由归一化频率决定<sup>[16-17]</sup>。根据 MCF 功率耦合理论<sup>[15]</sup>,假设中间纤芯与外围 6 个纤芯的功率耦合系数相同,均用  $h^{(7)}$  表示,中间纤芯的初始功率为  $P_1(0)$ ,当光信号从中间纤芯激励时,中间纤芯与外围纤芯的归一化功率可表示为<sup>[13]</sup>

$$\frac{P_1(L)}{P_1(0)} = \frac{1 + \exp[-7h^{(7)}L]}{7}, \quad (1)$$

$$\frac{P_k(L)}{P_1(0)} = \frac{1 - \exp[-7h^{(7)}L]}{7}, \quad (2)$$

式中,  $P_k(L)$  为第  $k$  个纤芯的功率,  $L$  为信号的传播距离,  $k=2,3,\dots,7$ ,中间纤芯对外围纤芯激励产生的 XT 可表示为

$$X_p^{(7)}(L) = \frac{1 - \exp[-7h^{(7)}L]}{1 + 6\exp[-7h^{(7)}L]}, \quad (3)$$

功率耦合系数  $h^{(7)}$  可表示为

$$h^{(7)} = \frac{1}{\sqrt{7}} \frac{2C_{12}^2}{\pi \sqrt{\left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{2}\right)^2 + C_{12}^2}}, \quad (4)$$

式中,  $\beta_1, \beta_2$  分别为纤芯 1 和纤芯 2 的基模传播常数,  $C_{12}$  为纤芯 1 和纤芯 2 的互耦合系数,上标表示纤芯 1 和纤芯 2 在纤芯 1 截面上的重叠积分<sup>[14]</sup>,可根据耦合微扰理论得到<sup>[15,18]</sup>。中间纤芯的 XT 最大,原因是外围 6 个纤芯均对其有耦合影响,因此,仅计算中间纤芯与外围 6 个纤芯之间的 XT。若中间纤芯 XT 满足要求,则外围各纤芯间的 XT 也满足要求。

### 3 光纤结构设计及特性分析

设计的复合型多芯 PCF 端面结构和折射率分

表 1 光纤结构参数的初始值

Table 1 Initial values of the fiber structure parameters

Parameter	$a / \mu\text{m}$	$\Delta_1 / \mu\text{m}$	$\Delta_2 / \mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$	$\Delta_1 / \%$	$L / \text{km}$	$\lambda / \text{nm}$
Value	8	11	29.1	8	0.37	1	1550

#### 3.1 纤芯参数分析

设计纤芯时需考虑其直径  $a$  及纤芯包层相对折射率差  $\Delta_1$  对光纤  $A_{\text{eff}}$  的影响。图 2 为光纤  $A_{\text{eff}}$  随  $a$  和  $\Delta_1$  的变化曲线图,为保证光纤在单模下传输,  $a$  的取值范围为  $5 \sim 9 \mu\text{m}$ 。可以发现,  $\Delta_1$  一定时,  $A_{\text{eff}}$  随  $a$  的增加先减小后增加,存在最小值(如  $\Delta_1 = 0.3$  时,  $a = 6 \mu\text{m}$  对应的  $A_{\text{eff}} = 84.1 \mu\text{m}^2$ ;  $a = 6.5 \mu\text{m}$  对应的  $A_{\text{eff}} = 84.2 \mu\text{m}^2$ ,此时  $A_{\text{eff}}$  的最小值在  $a = 6.25 \mu\text{m}$  附近)。当  $a < 6.25 \mu\text{m}$  时,纤芯直径过小,纤芯对光的束缚能力较弱;当  $a > 6.25 \mu\text{m}$  时,纤芯对包层边界处的模场束缚能力较强,  $a$  的增加会引起  $A_{\text{eff}}$  的增加。当  $a$  一定时,  $A_{\text{eff}}$  随  $\Delta_1$  的增

布如图 1 所示,可以发现,7 个纤芯呈正六边形排布,纤芯周围的空气孔呈周期性排布。为了提高纤芯对光的束缚能力,纤芯-包层折射率分布为阶跃型,纤芯材料采用掺锗二氧化硅,其折射率  $n_1$  用 Sellmeier 公式计算<sup>[19]</sup>,基底为纯石英材料,折射率为  $n_0$ 。为进一步缩小芯间距,掺锗纤芯采用旋转排布方式。纤芯直径为  $a$ ,纤芯与包层的相对折射率差  $\Delta_1 = (n_1 - n_0)/n_0$ ,空气孔的直径为  $d$ ,纤芯到空气孔的距离以及相邻空气孔的间距均为  $\Lambda_1$ ,纤芯之间的间距  $\Lambda_2 = 7^{1/2} \Lambda_1$ 。

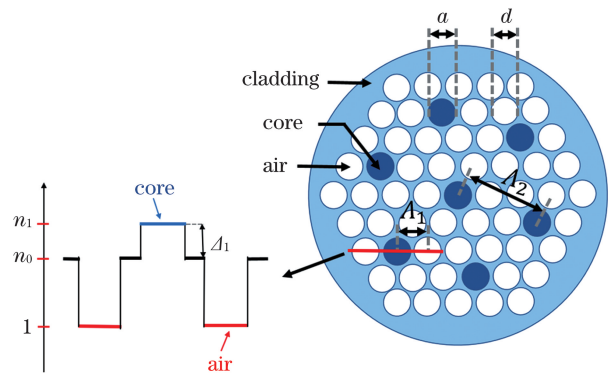


图 1 复合型 7 芯 PCF 的截面及折射率分布

Fig. 1 Cross-section and refractive index distribution of the composite 7-core PCF

为了抑制光纤中的 XT 及非线性效应,分析了光纤结构参数对 XT 及每个纤芯有效模场面积 ( $A_{\text{eff}}$ ) 的影响,优选出一组初始结构参数,如表 1 所示。通过理论分析波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、光纤传播距离  $L = 1 \text{ km}$  的 XT 及  $A_{\text{eff}}$  的变化规律。

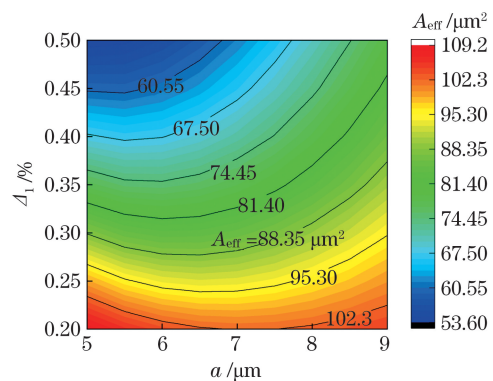


图 2  $A_{\text{eff}}$  随纤芯  $a$  和相对折射率差  $\Delta_1$  的变化

Fig. 2 Variation of the  $A_{\text{eff}}$  with core  $a$  and relative refractive index difference  $\Delta_1$

大而减小,原因是  $\Delta_1$  越大,二氧化硅中锗的含量越高,纤芯对光的束缚能力就越好。对于复合型 7 芯 PCF,增大光纤  $A_{\text{eff}}$  对增加传输容量、克服非线性效应十分重要,在保证光纤单模传输的情况下,适当增加  $a$ 、合理控制  $\Delta_1$ ,利用其纤芯周围周期性排布的空气孔对光束良好的束缚能力优化设计空气孔结构,从而抑制 XT,在较低  $\Delta_1$  下获得较大的  $A_{\text{eff}}$ 。

图 3 为  $\Delta_1=10,11,12,13 \mu\text{m}$  时光纤的 XT 随  $a$  的变化曲线,从图 2 可以发现,当  $a > 6.25 \mu\text{m}$  时,纤芯对模场有一定的束缚能力。为了保证光纤单模传输,计算  $a$  在  $6.25 \sim 9.0 \mu\text{m}$  范围内 XT 的

变化。可以发现,不同  $\Delta_1$  对 XT 的影响程度不同。当  $\Delta_1=10 \mu\text{m}$  时, $\Delta_2$  相对较小,随着  $a$  的增大,相邻纤芯边缘间的距离减小,纤芯间模场的重叠部分变大,XT 也随之变大,如图 3(a) 所示。当  $\Delta_1=11,12,13 \mu\text{m}$  时, $\Delta_2$  相对较大,此时纤芯对光的束缚能力为影响 XT 的主导因素,如图 3(b) 所示。可以发现,纤芯对空气孔包层边界处的模场束缚能力随  $a$  的增大而增强,纤芯间的模场耦合减弱,XT 降低,且  $\Delta_1$  越大,降低得越明显。在  $\Delta_1=11,12 \mu\text{m}$  时, $a$  的大小对 XT 的影响较小,此时主要分析  $a$  的大小对  $A_{\text{eff}}$  的影响。

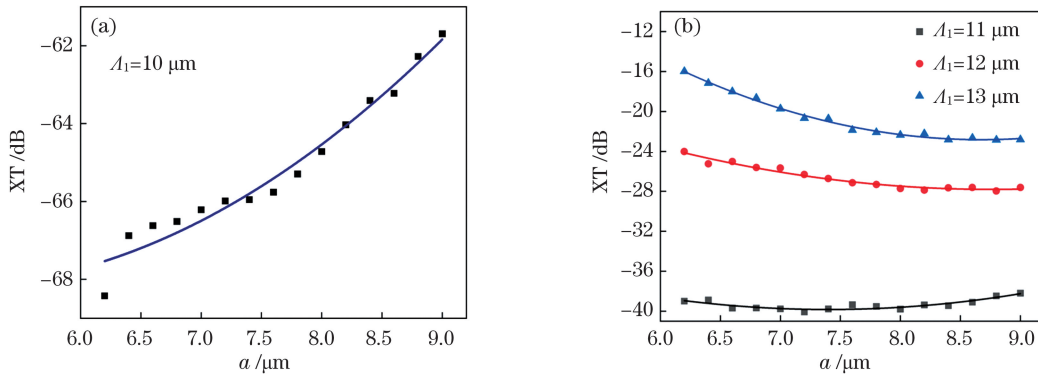


图 3 XT 随纤芯  $a$  的变化曲线。(a)  $\Delta_1=10 \mu\text{m}$ ; (b)  $\Delta_1=11,12,13 \mu\text{m}$   
 Fig. 3 XT variation curve with core  $a$ . (a)  $\Delta_1=10 \mu\text{m}$ ; (b)  $\Delta_1=11,12,13 \mu\text{m}$

综上所述,低 XT 和大  $A_{\text{eff}}$  相互制约,要获得较大的  $A_{\text{eff}}$ ,可适当增加  $a$ ,降低  $\Delta_1$ ;芯间距  $\Delta_2$  较小时,要获得低 XT,可适当减小  $a$ ;芯间距  $\Delta_2$  较大时,可适当增加  $a$ 。该复合型 7 芯 PCF 的空气孔结构对纤芯周围模场的束缚能力较强,可有效减小相邻纤芯模场间的重叠。但为了保证光纤的单模传输, $\Delta_1$  不宜过高,且纤芯的尺寸不宜过大。

### 3.2 包层空气孔参数的分析

空气孔直径  $d$  以及空气孔间距  $\Lambda_1$  是影响复合

型 7 芯 PCF 光学性能的重要因素,芯间距  $\Delta_2$  可通过控制空气孔间距  $\Lambda_1$  进行调整。图 4 为  $d=7,8,9 \mu\text{m}$  时 XT 及  $A_{\text{eff}}$  随  $\Lambda_1$  的变化曲线。从图 4(a) 可以发现,当  $d$  一定时,XT 随  $\Lambda_1$  的增加先增大后减小,此时会出现一个最大值(如  $d=7 \mu\text{m}$  时,XT 最大值对应的  $\Lambda_1$  约为  $12.5 \mu\text{m}$ );当  $\Lambda_1$  较小时,相邻两纤芯间空气占空比较大,两纤芯间的模场交叠较小,XT 的抑制效果较好,此时可通过缩小芯间距缩小 XT;随着  $\Lambda_1$  的增大,纤芯间空气占空比变小,

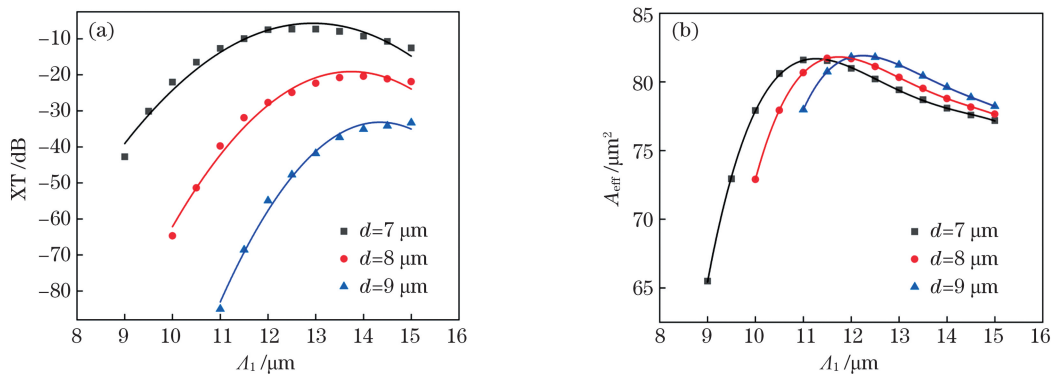


图 4 不同空气孔对 MCF 的影响。(a) XT; (b)  $A_{\text{eff}}$   
 Fig. 4 Influence of different air holes on MCF. (a) XT; (b)  $A_{\text{eff}}$

XT 随纤芯间距的增大呈下降趋势,光纤尺寸也会增加;当  $\Delta_1$  一定时,增大  $d$ ,包层空气孔对纤芯模场的抑制作用变强,相邻纤芯间的模场耦合变小,XT 降低。考虑到光纤的实际制备,相邻空气孔边缘不能完全接触,因此相邻空气孔边缘的间距最小为  $2 \mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>。

图 4(b)为空气孔直径  $d=7, 8, 9 \mu\text{m}$  时,  $A_{\text{eff}}$  随  $\Delta_1$  的变化曲线。可以发现,  $A_{\text{eff}}$  随  $\Delta_1$  的增大先增大后减小,此时会出现一个最大值(如  $d=7 \mu\text{m}$  时,  $A_{\text{eff}}$  最大,为  $81.6 \mu\text{m}^2$ )。当  $d$  一定时,随着  $\Delta_1$  的增大,包层空气孔占空比减小,对光的束缚能力减弱,  $A_{\text{eff}}$  增大,且  $\Delta_1$  越小,  $A_{\text{eff}}$  增大得越明显;超过峰值后,纤芯周围空气孔的排布变稀疏,空气孔结构对  $A_{\text{eff}}$  的影响逐渐减弱,曲线趋于平缓。对于设计的复合型 7 芯 PCF,选择合适的空气孔参数可达到芯间距离越小 XT 越小的效果,从而克服传统 MCF

中低 XT 和高纤芯密度相互制约的难题,对设计研发支持长距离、大容量传输的 SDM 系统具有指导意义。

图 5 为  $\Delta_1=10, 11, 12, 13, 14 \mu\text{m}$  时, XT 及  $A_{\text{eff}}$  随  $d$  的变化曲线。从图 5(a)可以发现,  $\Delta_1$  越小,纤芯与空气孔的排布越紧密,空气孔对纤芯周围模场的抑制作用越明显;  $\Delta_1$  一定时,  $d$  越大,对 XT 的抑制作用越明显,在  $\Delta_1$  较大时, XT 与  $d$  近似呈线性关系。从图 5(b)可以发现,当  $\Delta_1$  较大时,纤芯周围空气孔排布比较稀疏,  $d$  对  $A_{\text{eff}}$  的影响很小,由上述分析可知,掺锗纤芯对光的束缚能力在  $a > 6.25 \mu\text{m}$  时较强,因此周围空气孔对模场分布的影响不明显。当  $\Delta_1$  较小时,空气孔距离纤芯更近,对周围模场的束缚作用更强,此时  $A_{\text{eff}}$  随空气孔直径的增加呈下降趋势,且在  $\Delta_1$  较小时下降趋势更明显。

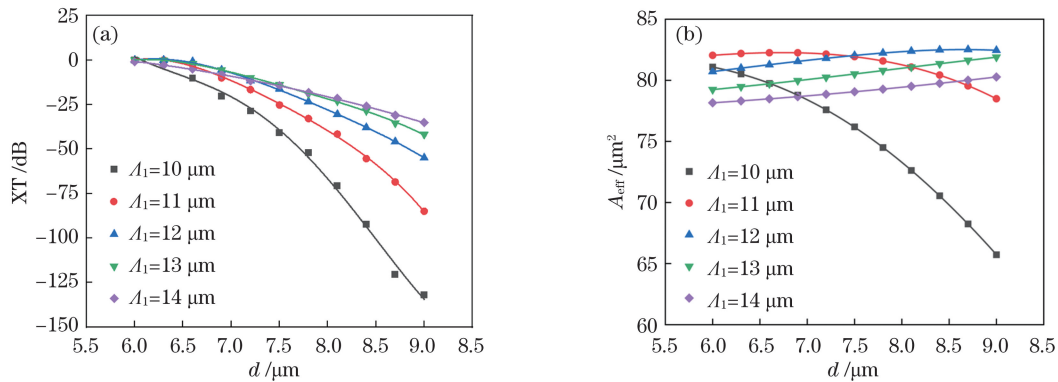


图 5 不同孔间距对 MCF 的影响。(a) XT; (b)  $A_{\text{eff}}$

Fig. 5 Influence of different hole spacing on MCF. (a) XT; (b)  $A_{\text{eff}}$

综上所述,复合型 7 芯 PCF 的空气孔排布很大程度上影响着光纤的性能,可通过调整  $\Delta_1$  和  $d$ ,在较小芯间距下实现较低的 XT。但  $\Delta_1$  过小时,  $A_{\text{eff}}$  受空气孔结构的影响较大,包层空气孔等效折射率的降低也会导致单模光纤截止波长向长波方向移动。为了使复合型 7 芯 PCF 支持长距离、大容量网络传输,需同时满足在通信波段单模传输、大模场面积及低 XT,且三者相互制约,光纤各参数设计时需平衡这三个方面<sup>[21]</sup>。为适应不同纤芯结构,设计了三组平衡参量,如表 2 所示。基于 FEM 得到光纤的 XT、模场以及色散特性,三组光纤可实现 1550 nm 波长、单模传输 1 km 下中间纤芯与外围 6 个纤芯的 XT 低于  $-60 \text{ dB}$ ,  $A_{\text{eff}}$  大于  $90 \mu\text{m}^2$ ,满足长距离传输对 MCF 的要求,对设计支持大容量传输系统的高纤芯密度 MCF 具有重要意义。

表 2 三组复合型 7 芯 PCF 的参数及性能

Table 2 Parameters and performance of the three groups of composite 7-core PCF

Parameter	Fiber A	Fiber B	Fiber C
$a / \mu\text{m}$	7.0	7.5	8.0
$\Delta_1 / \%$	0.27	0.23	0.21
$d / \mu\text{m}$	9.4	9.6	10.4
$\Delta_1 / \mu\text{m}$	12	12	13
$\Delta_2 / \mu\text{m}$	31.7	31.7	34.4
$A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	92.8	100.7	114.5
XT / dB	-64.0	-69.1	-73.6
Dispersion / $[\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}]$	24.4	25.3	24.4

## 4 光纤性能的对比优化

### 4.1 结构对比

常用来抑制 XT 的方法包括传统阶跃型、空气

孔辅助型、沟道辅助型等结构<sup>[10,22-23]</sup>,为了展现复合型多芯 PCF 在芯间距较小时抑制 XT 的优势,将设计的复合型 7 芯 PCF 与已知结构参数的传统阶跃型 MCF 和沟道辅助型 MCF 进行对比。对于沟道辅助型 MCF,为更好地抑制 XT,下陷层沟道在纤芯所占的比例越大越好<sup>[24]</sup>,若要同时获得低 XT 和小  $\Delta_2$ ,需通过降低沟道折射率、提高纤芯折射率、采用双层包层结构<sup>[20]</sup>等方法。考虑到二氧化硅掺杂工艺的极限以及光纤制备难度,一般采用扩大沟道宽度的方法降低 XT, $\Delta_2$  较小时若想获得低串扰,增大沟道宽度会造成沟道重叠,因此,设计沟道辅助型 MCF 需要平衡 XT 和  $\Delta_2$ 。本方案设计的复合型多芯 PCF 在  $\Delta_2$  较小时,纤芯与空气孔间的排布更密集,减小了纤芯间的模场交叠,在有效抑制 XT、提高光纤纤芯密度方面更具优势。

图 6 为 7 芯阶跃型<sup>[13]</sup>、沟道辅助型 MCF<sup>[21,25]</sup> 与本方案设计的复合型 7 芯 PCF (Fiber A) 在 1550 nm 波长处传输 1 km 后中间纤芯的 XT。可以发现,阶跃型 MCF 虽然制作过程相对简单,但纤芯周围没有通过低折射率结构减小相邻纤芯模场间的重叠,对 XT 的抑制效果较差;沟道辅助型 MCF 需通过增大芯间距实现较低的 XT;本方案设计的复合型 7 芯 PCF 可在芯间距较小的情况下获得相对较低的 XT,有效缓解了低 XT 和高密度相互制约的难题,可用于设计高密度多芯 MCF,更适应未来大容量传输系统的需求。

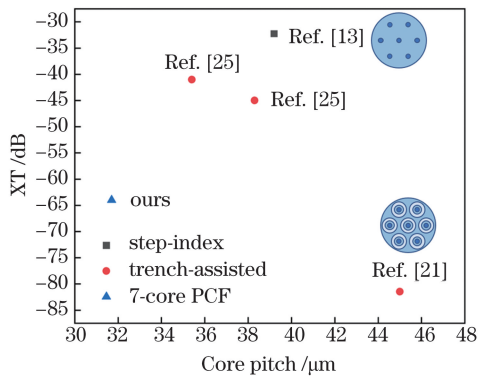


图 6 不同 MCF 的性能

Fig. 6 Performance of different MCFs

#### 4.2 传输通道数的扩展

为了进一步增加光纤的传输容量,利用复合型多芯 PCF 低 XT、小  $\Delta_2$  的特点,将光纤中的纤芯数量从 7 芯扩展到 31 芯,其结构如图 7 所示。利用 Fiber A 的参数,设计高密度 MCF,纤芯数为 31,外包层厚度(OCT)表示最外层纤芯到包层边缘的距

离, $D_{cl}$  为包层直径。 $D_{cl}$ 、 $\Delta_1$ 、 $OCT(X_{OCT})$  的关系为

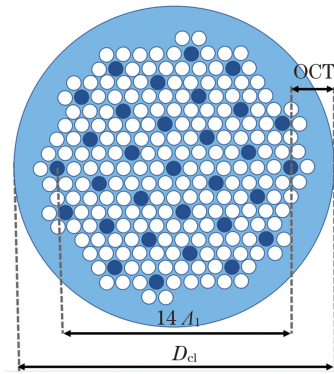
$$D_{cl} = 14\Delta_1 + 2 X_{OCT} \quad (5)$$


图 7 31 芯光纤的结构

Fig. 7 Structure of the 31-core fiber

对于通信中使用的 MCF,涂覆层材料的折射率大于基底二氧化硅的折射率,OCT 过小时,高折射率的涂覆层会造成外层纤芯的附加损耗<sup>[26]</sup>。根据标准,MCF 中  $LP_{01}$  模在弯曲半径  $R=140$  mm、 $\lambda=1625$  nm 处最外层纤芯的弯曲损耗(BL)应小于 0.001 dB/km<sup>[26]</sup>。图 8 为 Fiber A 在  $R=140$  mm、 $\lambda=1625$  nm 时,BL 与 OCT 的关系曲线,可以发现,OCT 大于 42.5  $\mu$ m 时,BL 小于 0.001 dB/km。

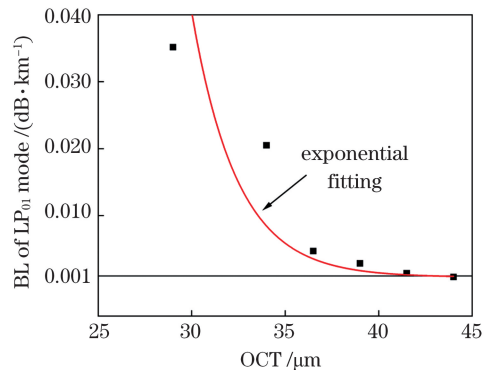


图 8 BL 随 OCT 的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of the BL with OCT

MCF 的纤芯密度可由 CMF 表示为<sup>[26]</sup>

$$X_{CMF} = \frac{N_{core} A_{eff}}{\pi(D_{cl}/2)^2} \quad (6)$$

式中, $N_{core}$  为光纤中的纤芯数量。为了与标准单模光纤进行对比,引入相对 CMF(RCMF)<sup>[26]</sup>,RCMF 为 MCF 与标准单模光纤 CMF 的比,标准单芯单模光纤在 1550 nm 波长处的  $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$ ,包层直径为 125  $\mu$ m,其 RCMF 可表示为

$$X_{RCMF} = \frac{N_{core} A_{eff}}{\pi(D_{cl}/2)^2} / \frac{80}{\pi(125/2)^2} \quad (7)$$

计算得到 31 芯光纤的 RCMF 可达到 8.78,相

比已报道的高密度 MCF<sup>[27-29]</sup> 有很大优势。该光纤可利用堆积法制备,为用于 SDM 系统的高密度 MCF 设计提供了新思路。

## 5 结 论

设计的复合型 7 芯 PCF 具有低串扰、高密度、设计灵活等特点,通过分析光纤的纤芯大小、纤芯包层相对折射率差、空气孔间距和空气孔结构参量对该复合型 7 芯 PCF 光学性能的影响,平衡单模传输、大模场面积以及低 XT 之间的关系,得到三组平衡参数,在 1550 nm 波长处的 XT 低于 -60 dB/km,  $A_{\text{eff}}$  超过  $90 \mu\text{m}^2$ 。将复合型 7 芯 PCF 与传统阶跃型 MCF 和沟道辅助型 MCF 进行对比,结果表明,该复合型 7 芯 PCF 对降低 XT、缩小纤芯间距更具优势,可以有效缓解低 XT 和高纤芯密度相互制约的难题,在高密度、长距离、大容量的信息传输系统中具有广阔的应用前景。将纤芯数量扩展到 31 芯,计算得到 OCT 的最小值为  $42.5 \mu\text{m}$ ,RCMF 达到 8.78。

## 参 考 文 献

- [1] Qian D Y, Huang M F, Ip E, et al. 101.7-Tb/s ( $370 \times 294$ -Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over  $3 \times 55$ -km SSMF using pilot-based phase noise mitigation [C] // 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1-3.
- [2] Cho J, Chen X, Chandrasekhar S, et al. Trans-Atlantic field trial using high spectral efficiency probabilistically shaped 64-QAM and single-carrier real-time 250-Gb/s 16-QAM [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(1): 103-113.
- [3] Chi R H, Zhou Y P, Li L Y. Research status and development analysis of multicore fiber amplifier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190005.  
迟荣华, 周燕萍, 李立亚. 多芯光纤放大器研究现状及发展分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190005.
- [4] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [5] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, et al. Ultra-low-crosstalk multi-core fiber feasible to ultra-long-haul transmission[C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1-3.
- [6] Wang G L, Ning T G, Zheng J J, et al. Novel bend-resistant large-mode-area fan-segmented cladding fiber with double trenches [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006008.  
王冠利, 宁提纲, 郑晶晶, 等. 新型双沟槽抗弯曲大模场扇形瓣状光纤研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1006008.
- [7] Xie X Q, Tu J J, Zhou X, et al. Design and optimization of 32-core rod/trench assisted square-lattice structured single-mode multi-core fiber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5119-5132.
- [8] Yuan L B. Multi-core fiber characteristics and its sensing applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170612.  
苑立波. 多芯光纤特性及其传感应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170612.
- [9] Kumar D, Ranjan R. Analysis of crosstalk performance and its reduction amount in single-mode homogeneous trench-assisted multicore fiber [C] // 2018 Conference on Information and Communication Technology (CICT), October 26-28, 2018, Jabalpur, India. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [10] Sakamoto T, Saitoh K, Hanzawa N, et al. Crosstalk suppressed hole-assisted 6-core fiber with cladding diameter of  $125 \mu\text{m}$  [C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London, UK. London: IET, 2013: 1-3.
- [11] Knight J C, Birks T A, St J Russell P, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [12] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [13] Takenaga K, Arakawa Y, Tanigawa S, et al. An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2011, E94-B(2): 409-416.
- [14] Zhu B, Taunay T F, Yan M F, et al. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11117-11122.
- [15] Marcuse D. Derivation of coupled power equations [J]. *Bell System Technical Journal*, 1972, 51(1): 229-237.
- [16] Birks T A, Knight J C, St J Russell P. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 961-963.
- [17] Saitoh K, Koshiya M. Empirical relations for simple

- design of photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2005, 13(1): 267-274.
- [18] Taylor J R. Theory of dielectric optical waveguides [M]. Amsterdam: Elsevier, 1991.
- [19] Fleming J W. Material and mode dispersion in  $\text{GeO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  glasses [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1976, 59(11/12): 503-507.
- [20] Watanabe T, Kokubun Y. Ultra-large number of transmission channels in space division multiplexing using few-mode multi-core fiber with optimized air-hole-assisted double-cladding structure [J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8309-8319.
- [21] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, et al. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16576-16592.
- [22] Sakaguchi J, Awaji Y, Wada N Y, et al. Space division multiplexed transmission of 109-Tb/s data signals using homogeneous seven-core fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 658-665.
- [23] Xia C, Amezcua-Correa R, Bai N, et al. Hole-assisted few-mode multicore fiber for high-density space-division multiplexing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(21): 1914-1917.
- [24] Zheng S W, Ren G B, Lin Z, et al. Influence of trench parameters on the characteristic of trench-assisted multi-core fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006001.
- 郑斯文, 任国斌, 林桢, 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.
- [25] Takenaga K, Arakawa Y, Tanigawa S, et al. Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber[C]// 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1-3.
- [26] Takenaga K, Arakawa Y, Sasaki Y, et al. A large effective area multi-core fiber with an optimized cladding thickness [J]. Optics Express, 2011, 19(26): B543-B550.
- [27] Matsuo S, Sasaki Y, Akamatsu T, et al. 12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28398-28408.
- [28] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, et al. 305 Tb/s space division multiplexed transmission using homogeneous 19-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 554-562.
- [29] Sakaguchi J, Klaus W, Puttnam B J, et al. 19-core MCF transmission system using EDFA with shared core pumping coupled via free-space optics[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 90-95.

## Theoretical Study on Low Crosstalk High-Density Composite Multi-Core Photonic Crystal Fiber

Zhang Han, Wang Guorui, Zhang Jiwei, Li Shuguang, Yan Xin, Wang Fang,  
Zhang Xuenan, Cheng Tonglei\*

*State Key Laboratory of Process Industry Integrated Automation, School of Information Science and Engineering, Northeast University, Shenyang, Liaoning 110004, China*

### Abstract

**Objective** In this paper, a composite 7-core photonic crystal fiber is designed and investigated theoretically. By combining the step-index structure and the photonic crystal fiber structure, the inter-core crosstalk of the proposed fiber can be effectively reduced and the core density could be greatly improved, which provides a new opportunity for the realization of large-capacity and long-distance optical fiber space division multiplexing technology. The parameters of the fiber structure are analyzed by the theoretical analysis and research. At the wavelength of 1550 nm, the crosstalk between the intermediate core and the peripheral core is lower than  $-60$  dB/km, the effective mode field area is over  $90 \mu\text{m}^2$ , and the core spacing is up to  $31.7 \mu\text{m}$ . When increasing the core number to 31, the relative core multiplexing factor can reach 8.78, which effectively improves the core density. This work has a guiding significance for the design of multi-core photonic crystal fiber for space division multiplexing technology and can be used in the network system which demands low crosstalk and large capacity for long distance transmission.

**Methods** Based on the theory of mode coupling and power coupling, the finite element method is used to calculate

the crosstalk characteristics of the fiber. The cross-section and refractive index distribution of the composite multi-core photonic crystal fiber proposed in this paper are shown in **Fig. 1**. In order to suppress the crosstalk and nonlinear effects in the fiber, analyze the influence of the fiber structure parameters on the crosstalk and the effective mode area of each core, and select a set of initial structure parameters, as shown in **Table 1**, the theoretical analysis is at the wavelength of 1550 nm, the crosstalk and the effective mode area variation law of  $L = 1$  km in fiber propagation. In order to show the advantages of composite multi-core photonic crystal fiber in suppressing XT when the core spacing is small, this paper compares the designed composite 7-core PCF with the traditional step multi-core fiber and trench assisted multi-core fiber with known structural parameters. In order to further increase the transmission capacity of the optical fiber, the composite multi-core photonic crystal fiber has the characteristics of low crosstalk and small core spacing to expand the number of cores in the optical fiber from 7 to 31 cores.

**Results and Discussion** For the composite 7-core photonic crystal fiber, increasing the effective mode field area of the fiber is very important to increase the transmission capacity and overcome the nonlinear effect. Under the condition of ensuring the fiber single-mode transmission, appropriately increase the core size and reasonably control the core doping concentration, Using the air holes periodically arranged around the core to restrain the beam, by optimizing the design of the air hole structure to suppress crosstalk, a larger effective mode field area can be obtained at a lower doping concentration (**Fig. 2**). For the composite 7-core photonic crystal fiber designed in this paper, choosing the appropriate air hole parameters can achieve the effect of the smaller the distance between the cores, the smaller the crosstalk, so as to overcome the mutual restriction of low crosstalk and high-density in traditional multi-core fibers (**Fig. 4**). In the 31-core example presented in this article, the relative core multiplexing factor can reach 8.78, which has great advantages over the reported high-density multi-core fiber (**Fig. 7**).

**Conclusions** The composite 7-core photonic crystal fiber proposed in this paper has the characteristics of low crosstalk, high-density, and flexible design. By analyzing the influence of fiber core size, core-cladding relative refractive index difference, air hole spacing, and air hole structure parameters on the optical performance of the 7-core photonic crystal fiber, three sets of balance parameters are obtained, it balances single-mode transmission, larger mode field area, and lower crosstalk. The restriction relationship between the three sets of balance parameters can be obtained, and the crosstalk can be lower than  $-60$  dB/km at the wavelength of 1550 nm, and the effective mode field area can exceed  $90 \mu\text{m}^2$ . Comparing the composite 7-core photonic crystal fiber with the conventional step multi-core fiber and trench assisted multi-core fiber that have been reported, the results show that the 7-core photonic crystal fiber has more advantages in reducing crosstalk and distance between cores. It can effectively alleviate the mutual restriction of low crosstalk and high-density. On this basis, the number of fiber cores is expanded to 31-core, the minimum value of outer cladding thickness is calculated to be  $42.5 \mu\text{m}$ , and the relative core multiplexing factor reaches 8.78. The composite 7-core photonic crystal fiber designed in this paper has broad application prospects in the direction of high-density, long-distance, and large-capacity information transmission systems.

**Key words** fiber optics; multi-core fiber; space division multiplexing; crosstalk

**OCIS codes** 060. 5295; 060. 4230; 060. 4005; 060. 2430