

异质结构的低串扰少模多芯光纤设计

刘畅, 裴丽*, 解宇恒, 王建帅, 郑晶晶, 宁提纲, 李晶

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 设计了一种基于异质结构的低串扰 3-LP 模 12 芯光纤, 纤芯采用异质无沟槽辅助的环形折射率分布, 结构简单且能增大纤芯的有效模场面积。利用 COMSOL 软件分析了异质纤芯的芯间串扰、有效模场面积等性能, 结果表明, 异质纤芯 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 模的芯间串扰分别低于 -0.78 , -0.66 , -0.4 dB/km, 有效模场面积分别为 150, 166, 200 μm^2 。使用方点阵型纤芯排布方式, 可实现包层直径约为 213.8 μm 、相对纤芯复用因子为 26.9 的低串扰 3-LP 模 12 芯光纤设计, 为通信容量的升级扩容提供器件支持。

关键词 光纤光学; 少模光纤; 多芯光纤; 少模多芯光纤; 低串扰

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1106004

Design of Low Crosstalk Few Mode Multi-Core Fiber Based on Heterogeneous Structure

Liu Chang, Pei Li*, Xie Yuheng, Wang Jianshuai, Zheng Jingjing, Ning Tigang, Li Jing

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract In this paper, a low crosstalk 3-LP mode 12-core fiber based on heterogeneous structure is designed. The core adopts a heterogeneous ring refractive index distribution without trench-assisted structure, which is simple in structure and can increase the effective mode area of the core. COMSOL software is used to analyze the performance of crosstalk and effective mode area of heterogeneous cores. The results indicate that the inter-core crosstalk of the heterogeneous core LP_{01} , LP_{11} , and LP_{12} modes are lower than -0.78 , -0.66 , and -0.4 dB/km, respectively, and their effective mode areas are 150, 166, and 200 μm^2 , respectively. With a square lattice core arrangement, a low crosstalk 3-LP mode 12-core fiber design with a cladding diameter of about 213.8 μm and a relative core multiplexing factor of 26.9 can be realized, providing device support for the upgrade and expansion of communication capacity.

Key words fiber optics; few mode fiber; multi-core fiber; few mode multi-core fiber; low crosstalk

OCIS codes 060.2310; 060.2270; 060.2280; 060.2400

1 引言

互联网、大数据、5G 等业务的发展, 大大增加了对光通信系统的容量需求。通过波分复用、频分复用和偏振复用等技术, 基于单模光纤的通信系统传输容量可接近非线性香农极限 (100 Tbit/s)^[1-2]。在通信容量有限的情况下, 基于空分复用的光纤可充分利用空间维度, 有效解决传统单模光纤传输容量接近理论极限的问题^[3-4]。实现空分复用的光纤

有多芯光纤 (MCF)^[5-7] 和少模光纤 (FMF)^[8-9], 分别通过增加包层中的纤芯数和纤芯中可传输的模式数增加空间信道数, 从而提升传输容量。由于 MCF 包层的限制, 增多纤芯数会增大芯间串扰; 对于 FMF, 增多模式数会增加模式间的耦合程度。为进一步实现大容量长距离的空分复用系统传输, 日本古河电气公司于 2012 年结合 MCF 和 FMF 设计并制造了 W 型折射率结构的 7 芯和 19 芯 2-LP 模式少模多芯光纤 (FM-MCF)^[10]。FM-MCF 的包层包

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-07-02; 录用日期: 2020-07-09

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1801003)、国家自然科学基金 (61827817, 61525501)

* E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

含多个纤芯,每个纤芯可传输多个模式,光传输的空间信道数随纤芯数和模式数的乘积成倍增长,大大提高了通信系统的传输容量。

实现低串扰 FM-MCF 的关键技术有沟槽辅助型^[11-12]、空气孔辅助型^[13-14]和异质结构^[15-16]等。沟槽辅助型和空气孔辅助型的 FM-MCF 都是在纤芯周围加入低折射率沟槽以抑制纤芯间的电磁场重叠,从而抑制芯间串扰。空气孔辅助型结构在制作过程中,空气孔容易塌陷,熔接难度较大。且这两种结构的光纤串扰特性随弯曲半径的增大而增大,对弯曲半径的变化比较敏感,不利于光纤传输。采用异质结构的 FM-MCF,相邻纤芯结构参数的差异会得到不同的传输常数,导致纤芯之间产生相位失配,从而有效降低纤芯间的横向耦合。异质 FM-MCF 的芯间串扰在弯曲半径达到临界值后迅速降低并收敛到某个定值,具有良好的抗弯曲性能。Tu 等^[15]设计了一种基于异质结构的 2-LP 模 12 芯光纤,该光纤有两种不同结构参数的纤芯,芯间串扰低于 -0.08 dB/km。FM-MCF 在进一步提高光纤传输容量方面表现出巨大潜力,是解决光传输带宽危机的一种有效方案,但离大规模商用还存在一定的距离。随着 FM-MCF 纤芯数和模式数的增加,高阶模之间的串扰也随之增大,因此还需进一步优化光纤的串扰性能,即达到纤芯数目、模式数目以及串扰性能的平衡。

本文提出了一种 3-LP 模 12 芯光纤,采用两种异质环形纤芯降低芯间串扰,选取方点阵型排布方式排列纤芯。设计的光纤包层厚度约为 $213.8 \mu\text{m}$,芯间串扰低于 -0.4 dB/km,LP₀₁ 模的有效模场面积大于 $150 \mu\text{m}^2$,纤芯复用因子为 26.9。

2 基本原理

采用基于有限元法的数值仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行建模和仿真,边界条件设置为完美匹配层(PML),采用任意三角形网格划分求解域。

光纤中的芯间串扰是制约光纤长距离传输的重要因素,评估 MCF 串扰特性的方法有基于模式耦合理论(CMT)^[17]和基于功率耦合理论(CPT)的计算方法^[18]。CMT 计算纤芯 m 和纤芯 n 之间串扰的模式耦合方程可表示为

$$\frac{dA_m}{dz} = -j \sum_{m \neq n} \kappa_{mn} A_n(z) \exp(j\Delta\beta_{mn}z) f(z), \quad (1)$$

式中, A_m 和 A_n 分别为纤芯 m 和纤芯 n 的模式振

幅, z 为传播距离, κ_{mn} 、 $\Delta\beta_{mn}$ 分别为纤芯 n 到纤芯 m 的模式耦合系数、传播常数差, f 为光纤弯曲的相位函数。

由于异质 MCF 中纤芯结构之间存在差异,纤芯之间的耦合系数互不相同,即 $\kappa_{mn} \neq \kappa_{nm}$,用 CMT 计算串扰会成倍增加计算量。而 CPT 通过纤芯 m 的输入光功率和纤芯 n 在纤芯 m 中的耦合光功率计算芯间串扰,功率耦合方程为

$$\frac{dP_m}{dz} = \sum_{m \neq n} h_{mn}(z) [P_n(z) - P_m(z)], \quad (2)$$

式中, P_m 和 P_n 分别为纤芯 m 和纤芯 n 中的平均功率, h_{mn} 为纤芯 m 和纤芯 n 的功率耦合系数。相邻纤芯之间的串扰可表示为

$$X_i = \tanh(\bar{h}_{mn}L), \quad (3)$$

式中, L 为光纤的长度, \bar{h}_{mn} 为平均功率耦合系数,可表示为

$$\bar{h}_{mn} = \frac{2K_{mn}^2 R}{\beta_m \Delta} L, \quad (4)$$

式中, K_{mn} 为模式耦合系数 κ_{mn} 和 κ_{nm} 的平均值, β_m 为纤芯 m 的模式传播常数, R 为光纤的弯曲半径, Δ 为纤芯 m 与纤芯 n 之间的距离。

有效模场面积是光纤性能的重要指标^[19],可表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy}, \quad (5)$$

式中, E 为光纤传输中电场横向分量的大小。

3 低串扰少模多芯光纤的设计

3.1 纤芯结构

实验主要研究基于环形结构纤芯的光纤,其纤芯折射率截面如图 1 所示。其中, r_1 、 r_2 分别为环形纤芯的内半径、外半径, $r_2 - r_1$ 为环形纤芯的厚度, Δ 为纤芯和包层的相对折射率差。相比阶跃型折射率纤芯,该纤芯结构的有效模场面积(A_{eff})更

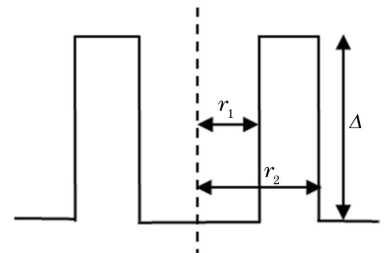


图 1 环形纤芯的折射率分布

Fig. 1 Refractive index profile of ring core

大,有利于抑制光传输中的非线性效应^[20]。

环形纤芯中的模式分布与环芯的厚度及半径大小有关,对于标量模 LP_{xy} ,传播模式的方位数 x 取决于环芯的半径和厚度,而径向传播模式数 y 只取决于环芯的厚度^[21-22]。

在工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $r_2 = 6.3 \text{ }\mu\text{m}$, $\Delta = 1.0\%$ 时,环芯 FMF 支持多个模式,各模式的有效折射率随 r_1 的变化曲线如图 2 所示。可以发现,当 r_1 逐渐增大,即环芯厚度逐渐减小时, LP_{02} 模会截止。 LP_{02} 与 LP_{01} 模的模场分布相似会导致模式间的耦合增大,因此,只研究环芯光纤的 LP_{01} 、 LP_{11} 和 LP_{21} 模传输。

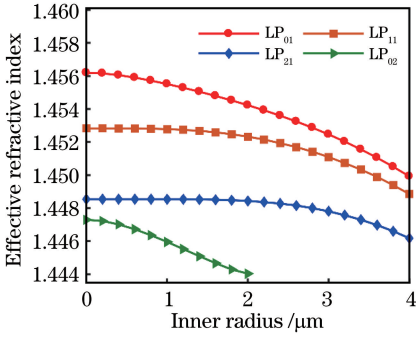


图 2 光纤的有效折射率随 r_1 的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of the effective refractive index of the optical fiber with r_1

3.2 异质纤芯

异质纤芯是指纤芯的半径、折射率等参数存在差异,相比同质纤芯,异质纤芯之间的结构差异会使纤芯之间产生相位失配,从而减小纤芯之间的横向耦合程度,降低芯间串扰^[18]。对于采用异质纤芯结构的 FM-MCF,当弯曲半径小于其临界值时,芯间串扰会逐渐增大;当弯曲半径大于临界值时,由于相位不匹配,芯间串扰会急剧减小^[23]。因此,在设计低串扰 FM-MCF 时,应尽量减小弯曲半径的临界值,增大相位不匹配区域。

实验研究的异质 FM-MCF 纤芯均采用环芯,通过优化环芯的结构参数(内、外半径以及纤芯和包层的相对折射率差)设计异质纤芯。若异质 FM-MCF 各个纤芯的传输质量存在差异,则不利于光通信系统的信号处理,因此需尽量保持各纤芯的 A_{eff} 较大且一致,以抑制光传输的非线性效应。

当 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $r_2 = 6.3 \text{ }\mu\text{m}$, r_1 为 $2.5 \sim 4.0 \text{ }\mu\text{m}$, Δ 为 $0.7 \sim 0.9\%$ 时,得到 LP_{01} 模的 A_{eff} 如图 3 所示。选取 LP_{01} 模中 $A_{\text{eff}} = 150 \text{ }\mu\text{m}^2$ 的两种纤芯结构,记为 core1 和 core2,其参数 r_1 和 Δ 分别为

$3.1 \text{ }\mu\text{m}$ 、 0.86% 和 $3.05 \text{ }\mu\text{m}$ 、 0.78% ,两种纤芯的结构参数及各模式的 A_{eff} 如表 1 所示。

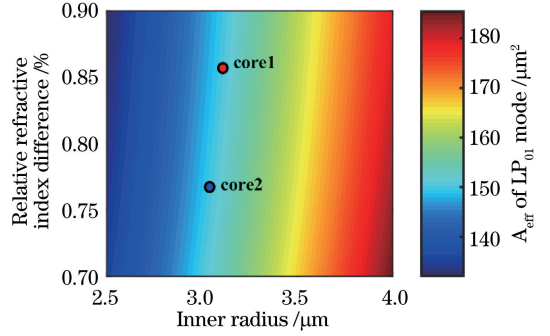


图 3 LP_{01} 模的 A_{eff} 随纤芯内半径 r_1 和 Δ 的变化
Fig. 3 Variation of the LP_{01} mode with the core radius r_1 and Δ

表 1 异质纤芯的参数及各模式的 A_{eff}

Table 1 Parameters of heterogeneous core and A_{eff} of each mode

Parameter	Value	
	Core1	Core2
Inner radius / μm	3.1	3.05
External radius / μm	6.3	6.3
Relative refractive index difference / $\%$	0.86	0.78
A_{eff} of LP_{01} mode / μm^2	150.08	150.02
A_{eff} of LP_{11} mode / μm^2	166.83	170.15
A_{eff} of LP_{21} mode / μm^2	200.39	212.82

core1 和 core2 纤芯中各模式的有效折射率在 C+L 波段($1530 \sim 1625 \text{ nm}$)的变化曲线如图 4 所示,可以发现,各模式的有效折射率差大于 10^{-3} ,因此可以忽略纤芯内的模式串扰。

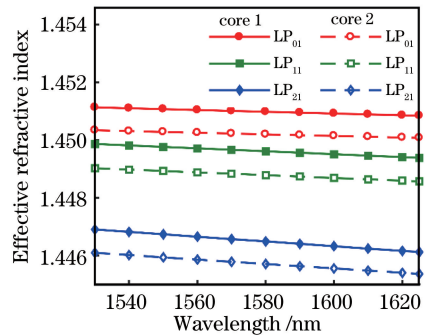


图 4 不同模式下有效折射率随工作波长的变化曲线
Fig. 4 Variation curve of effective refractive index with working wavelength in different modes

对于 core1 和 core2 两种环形纤芯的 FMF,其差分模式时延 DMD 在 C+L 波段的变化曲线如图 5 所示,其中, DMD_{01-11} 和 DMD_{01-21} 分别为 LP_{11} 模和 LP_{21} 模的差分模式时延。可以发现,对于环形纤

芯结构光纤, 环形纤芯中间的凹陷会导致 LP_{01} 模的群时延 τ 减小, 其差分模式时延比采用阶跃型折射率纤芯的光纤大。因此, 可采用与差分模式时延无关的低复杂度多输入多输出 (MIMO) 均衡系统^[24] 处理接收信号。

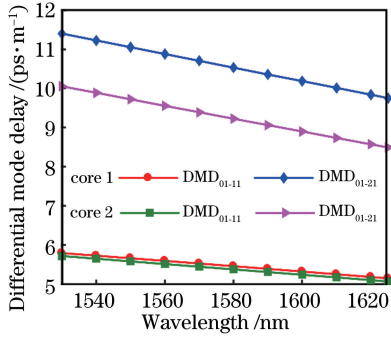


图 5 差分模式时延随波长的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of differential mode delay with wavelength

3.3 异质少模多芯光纤的芯间距

对于 FM-MCF, 为了在有限的包层中容纳更多的纤芯, 纤芯之间的距离应尽量小。但芯间串扰会随芯间距的减小而增大, 且光纤直径及包层厚度会限制芯间距, 因此, 应在保证传输质量的条件下优化芯间距。

当 λ 为 1550 nm, 弯曲半径 R_b 为 100 mm, Λ 为

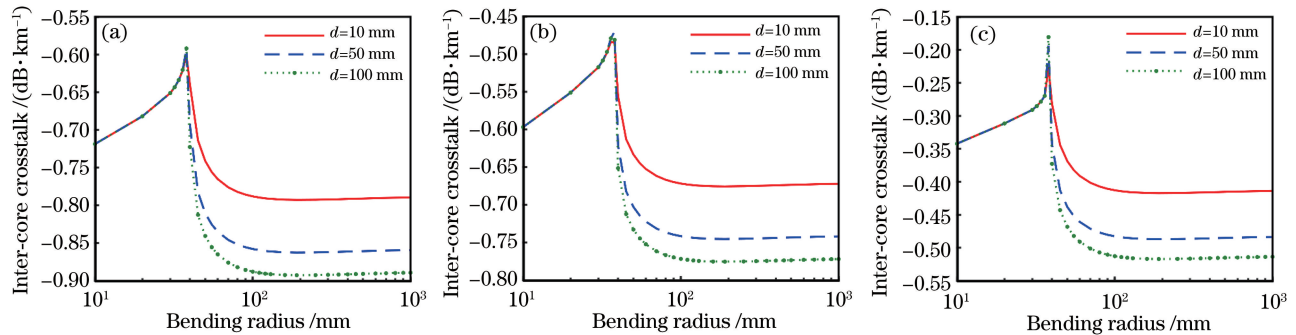


图 7 不同 d 时芯间串扰与弯曲半径的关系。(a) LP_{01} 模; (b) LP_{11} 模; (c) LP_{21} 模

Fig. 7 Relationship between crosstalk between cores and bending radius at different d .

(a) LP_{01} mode; (b) LP_{11} mode; (c) LP_{21} mode

从图 7 中可以发现, 弯曲半径 R_b 从 10 mm 增大到 1000 mm 时, 芯间串扰随 R_b 的增大先增大到一个峰值, 再迅速下降并趋于稳定。芯间串扰峰值对应的弯曲半径为临界值 R_{pk} , 图 7 中的临界值 $R_{pk} = 38$ mm。当 $R_b < R_{pk}$ 时, 三条曲线重合, 不同相关长度下的芯间串扰没有明显变化, 原因是该区域为相位匹配区域, 串扰主要由光纤弯曲引起; 当 $R_b > R_{pk}$ 时, 为相位失配区域, 芯间串扰与光纤相关长度有关, 相关长度越大, 芯间串扰越小。当弯曲半径大于 10 cm 时, FMF 光纤的芯间串扰会大大减

小, 且对于弯曲不敏感。当相关长度为 10 mm 时, LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 模之间的串扰分别低于 -0.78 、 -0.66 、 0.4 dB/km。

3.4 纤芯排布方式

FM-MCF 的纤芯排布方式会影响光纤的传输性能, 常见的纤芯排布方式有六边形排布、单环形排布 (ORS)、双环形排布及方点阵型排布 (SLS) 等^[25]。假设异质环芯 FM-MCF 的纤芯数 $N_{core} = 12$, ORS 和 SLS 两种纤芯排布方式的光纤截面如图 8 所示, 共有 core1 和 core2 两种纤芯, 包层厚度为 T_{clad} 。

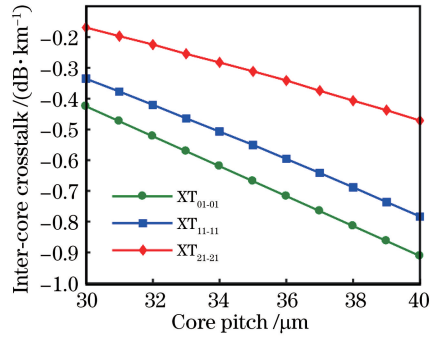


图 6 芯间串扰随芯间距的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of inter-core crosstalk with core pitch

利用功率耦合理论求解弯曲状态下的芯间串扰时, 纤芯的平均功率可用自相关函数表示, 当 $\Lambda = 36$ μm , $\lambda = 1550$ nm, R_b 为 10~1000 mm, 相关长度 d 分别为 10, 50, 100 mm 时, 各模式芯间串扰与弯曲半径的关系如图 7 所示。当 $d = 50$ mm 时, 计算结果与实际测量结果的吻合度较高^[18]。

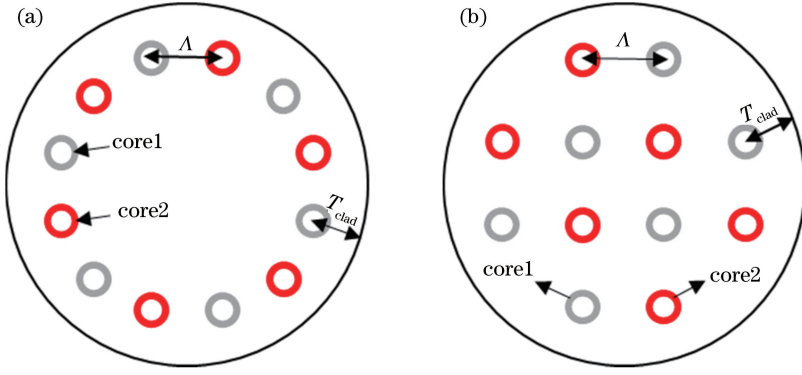


图 8 不同纤芯排布方式的 12 芯光纤截面图。(a) ORS;(b) SLS

Fig. 8 Cross-sectional views of 12-core fiber with different core arrangements.

(a) ORS; (b) SLS

采用 ORS 的少模 12 芯光纤,其 Λ 、 D_{clad} 和 T_{clad} 之间的关系为

$$D_{\text{clad}} = \frac{\Lambda}{\sin(\pi/12)} + 2T_{\text{clad}} \quad (6)$$

采用 SLS 的少模 12 芯光纤,其 Λ 、 D_{clad} 和 T_{clad} 之间的关系为

$$D_{\text{clad}} = \sqrt{10}\Lambda + 2T_{\text{clad}} \quad (7)$$

包层厚度过小会使外层纤芯在光纤弯曲时产生更多的能量泄漏,因此 T_{clad} 不能过小。当 $\lambda = 1625 \text{ nm}$ 、 $R_b = 140 \text{ mm}$ 时,FM-MCF 中最外层纤芯 core1 和 core2 中 LP_{21} 模的弯曲损耗随包层厚度的变化曲线如图 9 所示。若 $\lambda = 1625 \text{ nm}$ 时,纤芯的弯曲损耗小于 0.001 dB/km ,则认为在 C+L 波段上的弯曲损耗小于 0.001 dB/km ^[26]。可以发现,对于 core1 和 core2,包层厚度需分别大于 $40 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$,对于 ORS 和 SLS,包层厚度至少应为 $50 \mu\text{m}$ 。

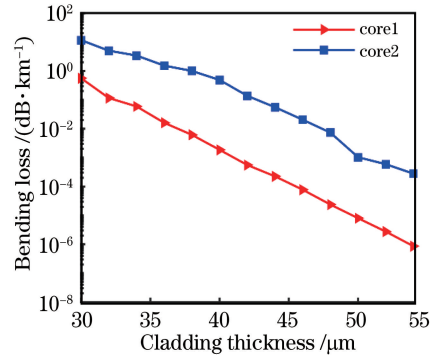


图 9 弯曲损耗随包层厚度的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of bending loss with cladding thickness

综上所述,取 $\Lambda = 36 \mu\text{m}$ 、 $T_{\text{clad}} = 50 \mu\text{m}$,则可实现 D_{clad} 为 $239.1 \mu\text{m}$ 和 $213.8 \mu\text{m}$ 的 ORS 和 SLS 少模 12 芯光纤,其参数如表 2 所示。由于光纤的包层直径小于 $225 \mu\text{m}$ 时就能满足光纤制作的良品率^[27],因此,可采用 SLS 排列纤芯。

表 2 不同排列方式的 12 芯光纤参数

Table 2 Parameters of 12-core fiber in different arrangements

Core arrangement	Core count	Core pitch / μm	Cladding thickness / μm	Cladding diameter / μm
ORS	12	36	50	239.1
SLS	12	36	50	213.8

纤芯复用因子(CMF)可以衡量多芯光纤的纤芯复用度,CMF 越大,表明光纤的传输容量越大,CMF 可表示为

$$X_{\text{CMF}} = \frac{(N_{\text{core}}/2) \sum A_{\text{eff-1-q}} + (N_{\text{core}}/2) \sum A_{\text{eff-2-q}}}{(\pi/4)D_{\text{clad}}^2}, \quad (8)$$

式中, $A_{\text{eff-1-q}}$ 、 $A_{\text{eff-2-q}}$ 分别为 core1、core2 的 q 阶模有效模场面积。

相对纤芯复用因子(RCMF)为光纤 CMF 与标准单模光纤 CMF 的比值,可表示为

$$X_{\text{RCMF}} = \frac{80X_{\text{CMF}}}{(\pi/4) \times 125^2}. \quad (9)$$

设计的方点阵型排布异质环芯 3-LP 模 12 芯光纤,包层直径约为 $213.8 \mu\text{m}$,相对纤芯复用因子为 26.9,其结构参数和光学性能(工作波长为 1550 nm)如表 3 所示。

表 3 设计的光纤结构参数和光学性能

Table 3 Designed fiber structure parameters and optical performance

Parameter	Value(core1/core2)
Inner radius / μm	3.1/3.05
External radius / μm	6.3/6.3
Relative refractive index difference /%	0.86/0.78
Core pitch / μm	36/36
Cladding thickness / μm	50/50
Cladding diameter / μm	213.8/213.8
Effective area of LP ₀₁ mode / μm^2	150.08/150.02
Effective area of LP ₁₁ mode / μm^2	166.83/170.15
Effective area of LP ₂₁ mode / μm^2	200.39/212.82
Inter-core crosstalk XT _{LP₀₁-LP₀₁} /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	-0.4/-0.4
Inter-core crosstalk XT _{LP₁₁-LP₁₁} /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	-0.66/-0.66
Inter-core crosstalk XT _{LP₂₁-LP₂₁} /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	-0.78/-0.78
Differential mode delay DMD _{LP₀₁-LP₁₁} /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	5.66/5.58
Differential mode delay DMD _{LP₀₁-LP₂₁} /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	11.05/9.72
Bending loss at 140 mm /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	$2.6 \times 10^{-5} / 5.3 \times 10^{-2}$

4 结 论

为使大容量长距离光通信系统中空分复用光纤具有低串扰光学特性,提出了一种基于异质结构的环形纤芯低串扰少模多芯光纤。采用有限元法分析了少模多芯光纤的结构参数对光纤有效模场面积、芯间串扰、差分模式时延等性能的影响,采用方点阵纤芯排布方式设计了一种包层直径约为 213.8 μm 的 3-LP 模 12 芯光纤。实验结果表明,在弯曲半径大于 10 cm 时,相邻纤芯 LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁ 模的芯间串扰分别低于 -0.78, -0.66, -0.4 dB/km,有效模场面积分别为 150, 166, 200 μm^2 ,光纤的相对纤芯复用因子为 26.9,在通信容量的升级扩容中具有很大的应用优势。

参 考 文 献

[1] Saitoh K, Matsuo S. Multicore fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 55-66.

[2] 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.

[3] Takenaga K, Sasaki Y, Guan N, et al. Large effective-area few-mode multicore fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(21): 1941-1944.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Ye F H, Tu J J, Saitoh K, et al. Design of homogeneous trench-assisted multi-core fibers based on analytical model [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4406-4416.

[7] 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.

[8] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Few-mode fibers supporting more than two LP modes for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(14): 2468-2479.

[9] Lin Zhen, Zheng S W, Ren G B, et al. Characterization and comparison of 7-core and 19-core large-mode-area few-mode fibers [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 256-263.
林桢, 郑斯文, 任国斌, 等. 七芯及十九芯大模场少模光纤的特性研究和对比分析[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 256-263.

- [10] Mukasa K, Imamura K, Sugizaki R. Multi-core few-mode optical fibers with large a_{eff} [C] // European Conference and Exhibition on Optical Communication 2012, September 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. Washington, D.C.: OSA, 2012: 1-3.
- [11] Sakamoto T, Matsui T, Saitoh K, et al. Low-loss and low-DMD 6-mode 19-core fiber with cladding diameter of less than $250 \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 443-449.
- [12] Sakamoto T, Saitoh K, Saitoh S, et al. Six-mode seven-core fiber for repeated dense space-division multiplexing transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(5): 1226-1232.
- [13] 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.
- [14] Jin W X, Ren G B, Pei L, et al. Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(2): 024210.
靳文星, 任国斌, 裴丽, 等. 环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析 [J]. *物理学报*, 2017, 66(2): 024210.
- [15] Tu J J, Saitoh K, Amma Y, et al. Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with graded-index profile and square-lattice layout for low differential mode delay [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 17783-17792.
- [16] Tu J J, Saitoh K, Koshiha M, et al. Optimized design method for bend-insensitive heterogeneous trench-assisted multi-core fiber with ultra-low crosstalk and high core density [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(15): 2590-2598.
- [17] 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.
- [18] Koshiha M, Saitoh K, Takenaga K, et al. Multi-core fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory [J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B102-B111.
- [19] 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.
- [20] Liu S N, Ning T G, Ma S S, et al. Trench-assisted fan-segmented cladding fiber with large mode area [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1206001.
刘诗男, 宁提纲, 马绍朔, 等. 一种大模场沟槽辅助型扇形瓣状光纤的研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1206001.
- [21] Kasahara M, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Design of three-spatial-mode ring-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1337-1343.
- [22] Li J P, Liu J, Gao S C, et al. Manipulation and transmission technologies of optical field for multidimensional multiplexing optical fiber communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126008.
李建平, 刘洁, 高社成, 等. 面向光纤通信多维复用的光场调控与传输技术 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126008.
- [23] Tu J J, Saitoh K, Takenaga K, et al. Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with low differential mode delay [J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4329-4341.
- [24] Sakamoto T, Mori T, Yamamoto T, et al. Mode-division multiplexing transmission system with DMD-independent low complexity MIMO processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(13): 2192-2199.
- [25] Sasaki Y, Takenaga K, Matsuo S, et al. Few-mode multicore fibers for long-haul transmission line [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 35: 19-27.
- [26] Sasaki Y, Takenaga K, Aikawa K, et al. Single-mode 37-core fiber with a cladding diameter of $248 \mu\text{m}$ [C] // 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2017: 1-3.
- [27] Matsuo S, Takenaga K, Arakawa Y, et al. Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about $200 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4626-4628.