



一种沟槽辅助气孔隔离的低串扰高密度异质多芯少模光纤

王彦 韩颖 李增辉 龚琳 王璐瑶 李曙光

A low-crosstalk and high-density multi-core few-mode fiber based on heterogeneous core and trench-assisted air-holes isolation

Wang Yan Han Ying Li Zeng-Hui Gong Lin Wang Lu-Yao Li Shu-Guang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 024205 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20210974

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210974>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种具有低串扰低非线性的双沟槽环绕型十三芯五模光纤

Double-trench assisted thirteen-core five-mode fibers with low crosstalk and low non-linearity

物理学报. 2021, 70(10): 104208 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201825>

开放式多通道多芯少模光纤表面等离子体共振生物传感器

Multi-channel few-mode multicore fiber based surface plasmon resonance biosensor with open air-hole

物理学报. 2020, 69(13): 137802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200353>

三层芯结构在单模大模场面积低弯曲损耗光纤中的应用和分析

Application and analysis of three-layer-core structure in single-mode large-mode-area fiber with low bending loss

物理学报. 2021, 70(22): 224214 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210410>

基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器

Superimposed long period gratings based mode converter in few-mode fiber

物理学报. 2019, 68(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181674>

少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180140>

基于无芯光纤的多参数测量传感器

Multi-parameter measurement sensor based on no-core fiber

物理学报. 2021, 70(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201474>

一种沟槽辅助气孔隔离的低串扰高密度 异质多芯少模光纤*

王彦¹⁾ 韩颖^{1)†} 李增辉²⁾ 龚琳¹⁾ 王璐瑶²⁾ 李曙光²⁾

1) (燕山大学信息科学与工程学院 (软件学院), 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学理学院, 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北省微结构材料物理重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2021 年 5 月 24 日收到; 2021 年 9 月 27 日收到修改稿)

以单模光纤为基础的传统光通信系统的容量已趋近其理论极限, 多芯少模光纤是突破现有传输容量瓶颈的一种有效方式. 本文设计了一种低串扰 5-LP 模的弱耦合异质芯 7 芯光纤, 采用沟槽辅助和气孔隔离相结合的方法, 在标准 125 μm 外径的情况下实现了芯间和模间的低串扰. 利用有限元法计算了纤芯之间的串扰、有效模面积等. 经过设计优化, 光纤在光通信 C+L 波段可以稳定传输 5 个 LP 模式, 其中 LP_{21} 与 LP_{02} 模之间的有效折射率差最小, 且大于 1.1×10^{-3} ; 光纤中 LP_{31} 模式的芯间串扰最大且低于 -50 dB/km , 因此该光纤可以同时实现模间和芯间的低串扰传输. 7 个纤芯中 5 个 LP 模的有效模面积均大于 $86 \mu\text{m}^2$, 在波长 1550 nm 处相对纤芯复用因子为 57.63, 该光纤可用于大容量高速光纤传输系统.

关键词: 多芯少模光纤, 异质纤芯, C+L 波段, 低串扰

PACS: 42.81.-i, 42.79.Sz, 47.11.Fg

DOI: 10.7498/aps.71.20210974

1 引言

随着 5G、大数据、云存储、云计算、高清视频等的迅速发展, “万物互联”的新时代对于光纤传输容量提出了更高的要求, 而传统通信光纤已经逼近其理论极限, 光通信网络面临容量危机^[1,2]. 近年来, 多芯光纤、少模光纤及多芯少模光纤等为主导的新型空分复用光纤通过对纤芯个数和单个纤芯中容纳的模式数量的复用, 极大地增加了单根光纤空间信道数, 在不增加空间和费用的情况下实现对光纤的扩容, 有着十分广阔的应用前景^[3-5].

2009 年贝尔实验室预言了容量危机之后, 国内外开始了关于多芯光纤的系统研究^[1,6]. 2019 年, 烽火通信制备了 19 芯单模光纤并进行了传输系统实验, 19 芯总传输容量为 1.06 Pbit/s, 净频谱

效率达到 $113 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ ^[5]. 2020 年, 北京交通大学的刘畅等^[7]提出了一种异质结构的低串扰十二芯三模光纤, 该光纤采用异质环形芯结构, 在获得低串扰性能的同时, 能够有效地增大光纤的有效模面积.

虽然在一根光纤中增加纤芯可以显著地增加信道数, 但是在有限空间内构建多个纤芯单元, 纤芯之间不可避免地存在串扰问题, 现有的多芯少模光纤主要分为强耦合和弱耦合两种研究方向, 强耦合多芯光纤纤芯间距极小, 通过在纤芯间形成稳定的超模进行传输, 适用于超长距离传输, 但是需要复杂的数字信号处理技术^[8]; 而弱耦合多芯光纤纤芯间距较大, 主要通过异质结构, 空气孔辅助, 沟槽辅助结构来实现低串扰^[9,10]. 然而随着多芯少模光纤空间信道数的不断增加, 使得现有的单一技术方案无法满足高阶模式低串扰设计的要求.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFB2204001) 和河北省自然科学基金 (批准号: F2019203549, F2019105108) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hanyingysu@163.com

本文基于日益增长的通信容量需求及掺铒放大器的成熟,采用微结构及异质纤芯结合的方式,拟在 C+L 波段对多芯少模微结构光纤参数与其传输性能的关系进行研究,具体包括纤芯掺杂、排布方式以及光纤的微结构参数变化对传输性能的影响. 本文设计的为标准 125 μm 外径弱耦合多芯少模光纤,纤芯中传输的 5 个模式在 C+L 波段芯间串扰小于 -50 dB/km,同一纤芯中 2 个相邻模式的有效折射率差均大于 10^{-3} ,模间串扰符合传输要求,本光纤可以用于高密度大容量传输系统.

2 基本原理

2.1 理论模型

实现纤芯之间的低串扰是多芯光纤长距离传输的关键因素. 对于同质纤芯而言,随着光纤弯曲半径不断增大,纤芯间差异逐渐减小,光纤串扰不断增大. 而对于异质纤芯而言,由于相邻纤芯间存在差异,在弯曲半径增大过程中纤芯经历相位失配到相位匹配再失配的过程,在相位匹配区串扰达到最大^[11]时的弯曲半径 R_{pk} 为^[12]

$$R_{\text{pk}} = \Lambda \frac{n_{\text{eff}}}{\Delta n_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中, Λ 为纤芯间的距离, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Δn_{eff} 为纤芯间的折射率差. 当弯曲半径小于 R_{pk} 时,此时异质纤芯与同质纤芯串扰 XT 的计算公式均为^[13]

$$\text{XT} \approx k^2 L \frac{2R}{\beta \Lambda}, \quad (2)$$

式中, k 为模式耦合系数 k_{ij} 和 k_{ji} 的平均值, β 为纤芯 m 的模式传播常数, R 是弯曲半径, L 是光纤长度. 根据耦合模理论,芯间耦合系数 k 可由 (3) 式获得^[14]:

$$k_{mn} = \frac{\varepsilon_0 \omega \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_0^2 - n_i^2) \mathbf{e}_j^* \cdot \mathbf{e}_i \, dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{z} \cdot (\mathbf{e}_j^* \times \mathbf{h}_j + \mathbf{e}_j \times \mathbf{h}_j^*) \, dx dy}, \quad (3)$$

式中, ε_0 是真空介电常数, ω 是电磁场的角频率, n_0 为实际的折射率, i 为耦合纤芯, j 为被耦合纤芯, n_i 为其他芯不存在时芯 i 的折射率, \mathbf{e}_j 为纤芯 j 中分布的电场能量, \mathbf{e}_i 为纤芯 j 的电场能量在纤芯 i 中的分布, \mathbf{h}_j 为纤芯 j 中的磁场能量.

当弯曲半径大于 R_{pk} 时,异质纤芯串扰计算公

式为^[15]

$$\text{XT} = \frac{2k^2}{\Delta \beta^2 d} L, \quad (4)$$

式中, $\Delta \beta$ 为 j 芯和 i 芯的对应模式的传播常数差, d 为耦合长度. 实验结果表明 $d = 50 \text{ mm}$ 时与实际相契合^[16].

2.2 有效模面积

光纤的非线性效应制约光纤通信的发展,大的模场面积有助于抑制光纤的非线性效应,同时也能有效地减小热效应带来的不利影响,表达式为^[17]

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

式中, E 为电场的横向分量, S 为整个光纤端面.

2.3 纤芯复用因子

纤芯复用因子是表征多芯光纤容量大小的重要参数,纤芯复用因子的被定义为^[18]

$$\text{CMF} = \frac{N \Sigma A_{\text{eff}l-m}}{(\pi/4) \cdot D_{\text{clad}}^2}, \quad (6)$$

式中, A_{eff} 为有效模面积, m 为纤芯中复用的模式数, N 为对应纤芯的个数, l 为每个纤芯的空间模数, D_{clad} 为外包层直径.

相对纤芯复用因子光纤 CMF 值与标准单模光纤 CMF 值之比,表达式为^[7]

$$\text{RCMF} = \frac{\text{CMF}}{80/[(\pi/4) \cdot 125^2]}. \quad (7)$$

3 光纤设计思路及模拟结果分析

3.1 光纤结构参数设计

本文所研究的光纤纤芯结构为最为经典的阶跃型光纤结构,通过环绕每个纤芯的沟槽以及部分共用的空气孔结构来降低纤芯之间的相互耦合,其光纤截面图及折射率分布如图 1 所示.

图 1 中纤芯半径为 a , 相对芯-包折射率差为 Δ , 1, 2, 3 分别对应不同折射率分布的纤芯, t 为沟槽, 纤芯内包层厚度为 b , 沟槽区域的宽度为 c , 气孔半径为 r , 基底材料为石英,基底与纤芯折射率由 sellmeier 方程得到^[19], 1550 nm 处 $n_{\text{silica}} = 1.444$,

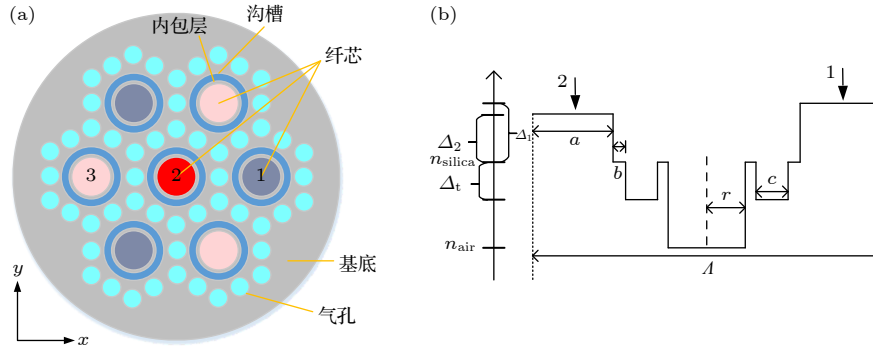


图 1 光纤端面图及其折射率分布 (a) 七芯五模光纤的截面图; (b) 相邻纤芯间的折射率分布

Fig. 1. Schematic cross section and its refractive index profile: (a) Schematic cross section of seven-core five-mode fiber; (b) refractive index profile between adjacent cores.

$n_{\text{air}} = 1$. 该结构增强了纤芯的限制能力, 使得光纤能够在标准 $125 \mu\text{m}$ 外径的条件下实现数个高阶模式的低串扰, 实现更大容量的信息传输. 光纤的初始参数如表 1 所示.

表 1 光纤的初始参数

Table 1. The initial parameters of the optical fiber.

$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$c/\mu\text{m}$	$\Delta_1/\%$	$\Delta_2/\%$	$\Delta_3/\%$	$r/\mu\text{m}$	$A/\mu\text{m}$	$\Delta_t/\%$
7.5	1	3	1.45	1.35	1.25	3.6	32.5	-0.6

3.2 芯间串扰的计算思路

对于阶跃型光纤, 若想保证纤芯中能够稳定传输 5 个 LP 模式, 光纤归一化频率必须满足^[20] $5.1 < V < 5.5$. 然而当光纤 5 模截止时, 相邻纤芯之间的高阶模式 LP_{31} 串扰极大, 难以满足通信编码要求; 而且由于引入了微结构, 中心纤芯截止波长退化难以避免^[21]; 故整体提高了设计 V 值降低工作带宽以实现其他传输性能的优化.

异质纤芯在 R_{pk} 处取得串扰最大值, 而同质纤芯串扰随着弯曲半径的增大而增大, 代入 (1) 式得 $R_{\text{pk}} \approx 30 \text{ mm}$, 故对比了光纤弯曲半径 $R = 30 \text{ mm}$ 时光纤中前 5 个 LP 模式的芯间串扰情况, 在仿真过程中, 光纤的弯曲通过等效折射率的方法实现, 公式为^[22]

$$n_{\text{eq}} = n \left(1 + \frac{x}{R_{\text{bend}}} \right), \quad (8)$$

式中, n_{eq} 为等效后的折射率分布; n 为直光纤时材料本身的折射率分布; x 为光纤截面的横坐标; R_{bend} 为考虑弹光效应之后的等效弯曲半径, R_{bend} 约为实际 R 的 1.28 倍^[23].

旁芯仅与 3 个纤芯距离较近, 受串扰影响较

小, 中心纤芯与周围 6 个纤芯等间距, 串扰最大, 故求解 $R = 30 \text{ mm}$ 时中心纤芯的芯间串扰情况.

3.3 数值模拟与结果分析

本文采用基于有限元法的 Comsol Multiphysics 进行建模和仿真, 边界条件为完美匹配层和散射边界条件, 网格划分为自由剖分三角形. 图 2 给出了 $R = 30 \text{ mm}$ 时中心纤芯与其他 6 个纤芯之间的芯间串扰随波长的变化.

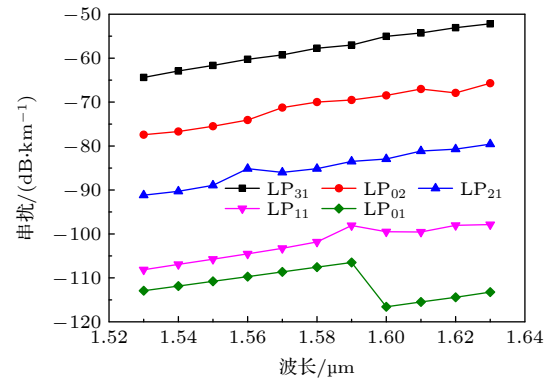


图 2 中心纤芯前 5 个模式在 C+L 波段的串扰变化情况
Fig. 2. The crosstalk changes of the first 5 modes of the central core in the C+L band.

如图 2 所示, 随着 LP 模式的升高, 模式的芯间串扰在逐渐增大, 故选取了 LP_{31} 模式, 讨论不同微结构对于芯间串扰的影响, 结果如图 3 所示.

如图 3 所示, 气孔相比于沟槽有更加显著地降低串扰达到效果, 气孔与沟槽辅助结合的方式可以更好地抑制纤芯间的耦合, 降低串扰. 对于特定的 LP 模式, 随着传输波长的红移, 芯间串扰逐渐增大. 故选取了波长为 $1.63 \mu\text{m}$ 时的 LP_{31} 模式, 讨论随着弯曲半径的变化, 不同纤芯排布方式对串扰

的影响,即分别由纤芯1、纤芯2和纤芯3构成的同质纤芯结构,以及三种纤芯交替排布的异质纤芯结构,结果如图4所示。

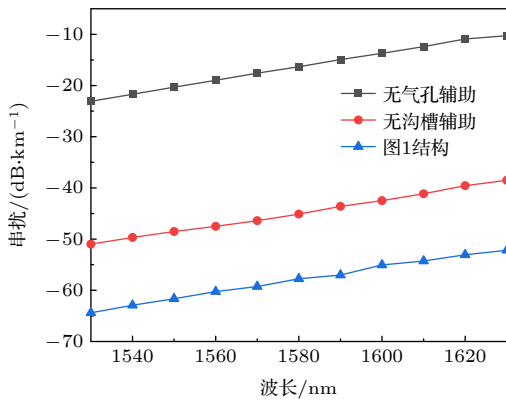


图3 随微结构变化中心纤芯 LP₃₁ 串扰变化情况

Fig. 3. Changes in LP₃₁ inter-core crosstalk with micro-structure changes.

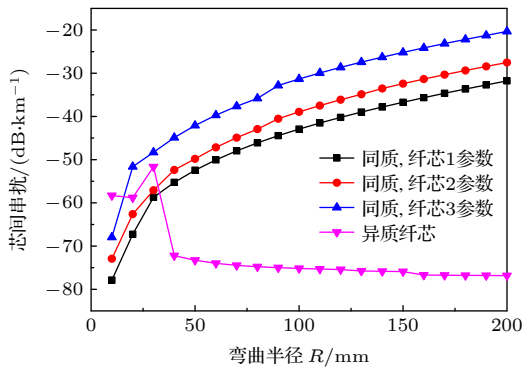


图4 LP₃₁ 模芯间串扰与弯曲半径 R 的变化关系

Fig. 4. The relationship between LP₃₁ inter-core crosstalk and bending radius R .

如图4所示,对于同质纤芯结构,随着纤芯折射率的增大,LP₃₁的芯间串扰有明显的减小,随着弯曲半径的不断增大,芯间串扰也在不断增大;与同质结构相比,3种纤芯交替排布的结构在弯曲半径较小时并无明显优势,此时弯曲造成的结构差异占据主导地位;当弯曲半径大于 R_{pk} 时,同质纤芯的纤芯差异随着弯曲半径的增大逐渐消失,而异质纤芯结构自带结构差异,串扰性能整体优于同质结构;故选择图1(a)所示的3种不同纤芯交替排布的光纤结构。图4中对应于异质纤芯在 R_{pk} 附近的突变是由于异质纤芯中所传模式相位发生变化造成的。

模间串扰是影响光纤传输的重要参数之一,同一纤芯中各模式之间的有效折射率相差较大且大于 10^{-3} 时,纤芯内的模间串扰可以被忽略^[24]。选取

光纤平直时讨论三种纤芯结构的模式折射率分布情况及模面积变化情况,模式折射率变化如图5所示。

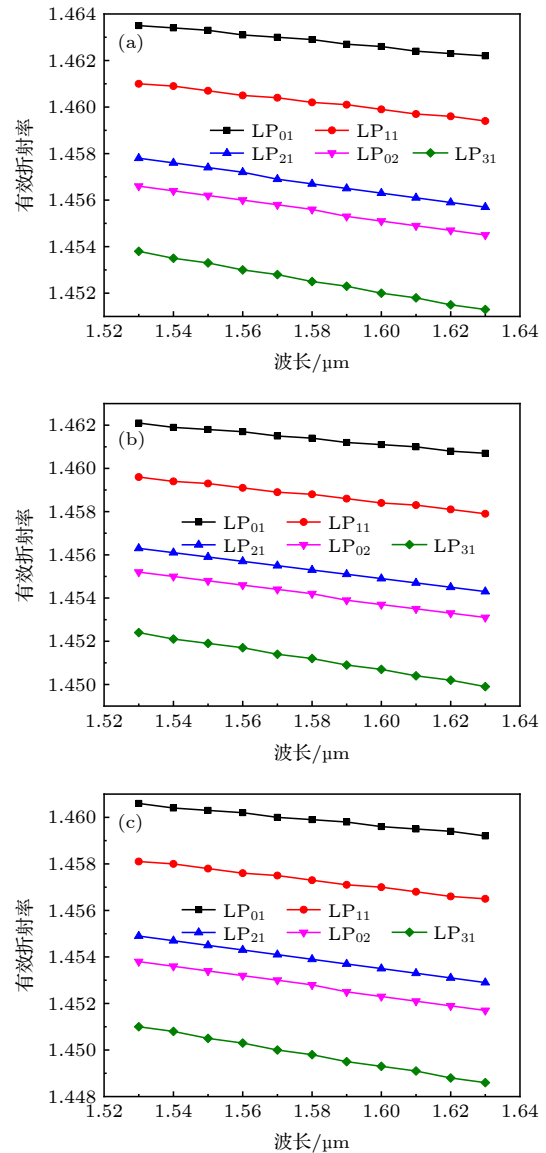


图5 不同纤芯中各个模式折射率随波长的变化关系 (a) 纤芯1; (b) 纤芯2; (c) 纤芯3

Fig. 5. The relationship between the refractive index of each mode in different cores and the wavelength: (a) Core 1; (b) Core 2; (c) Core 3.

如图5所示,对于所有的纤芯,LP₂₁与LP₀₂之间的模式折射率差最小,经过计算发现针对三种不同的纤芯,其LP₂₁与LP₀₂模式的最小有效折射率差都大于 10^{-3} ,如图6所示,因此单个芯内的模间串扰可以忽略不计。

有效模面积是关系光纤非线性大小的重要参数,也与多芯光纤的容量大小息息相关,三种纤芯在C+L的有效模面积变化情况如图7所示。

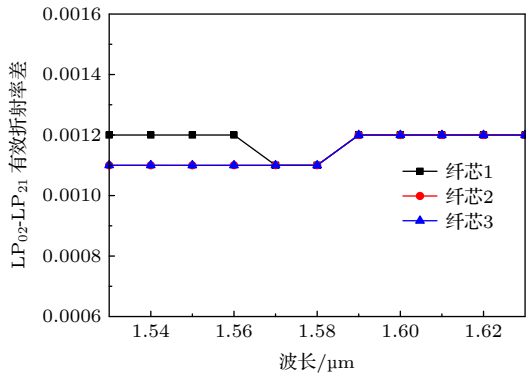
图6 3种纤芯中LP₀₂与LP₂₁模的有效折射率差

Fig. 6. The refractive index difference between LP₀₂ and LP₂₁ modes in the three cores.

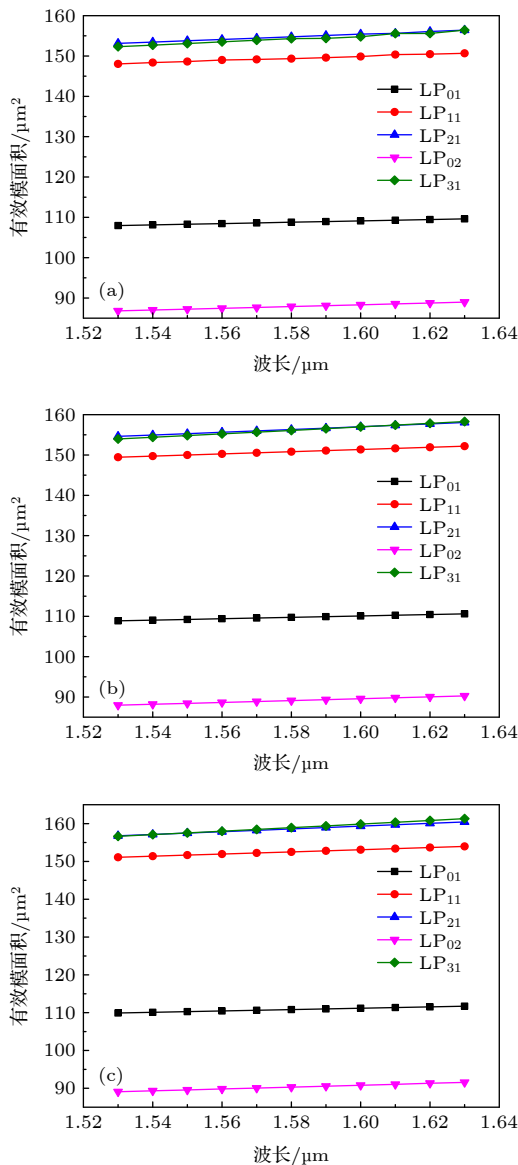


图7 各LP模式在C+L波段的有效模面积变化情况 (a) 纤芯1; (b) 纤芯2; (c) 纤芯3

Fig. 7. Effective mode area changes of each LP mode in the C+L band: (a) Core 1; (b) Core 2; (c) Core 3.

如图7所示,基模与LP₀₂模式的有效模面积远小于其他模式,并且LP₀₂模式的有效模面积最小,有效模面积主要受LP₀₂模式制约;随着波长的增大,纤芯中各个模式的有效模面积都略微增大;3种纤芯外径相同,折射率不同,纤芯折射率的增加使得各个模式的有效模面积略有减小;纤芯1中各模式的有效模面积相对较小,LP₀₂模的有效模面积最小,为86.81 μm²,最小值出现在1.53 μm处.折射率变化对光纤有效模面积影响较小.

由于采用弱耦合进行模式传输,故正交的LP模式作为一个模群进行传输,选取波长1550 nm处3种纤芯5个模式的有效模面积代入(5)式和(6)式可得多芯光纤的RCMF = 57.63.

为了优化光纤结构,进一步讨论光纤的几个结构参数对芯间串扰的影响,这些参数主要有沟槽宽度 c ,内包层厚度 b ,气孔半径 r 等参数.图8给出了沟槽宽度 c 的变化对LP₃₁模芯间串扰的影响.

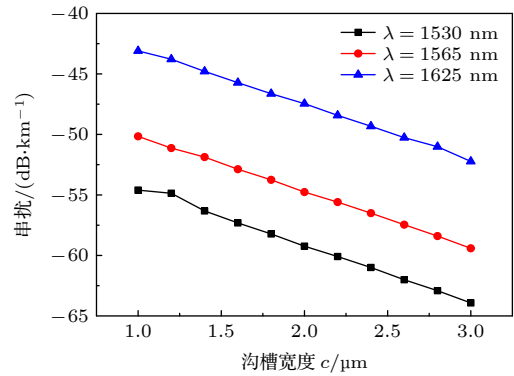
图8 沟槽宽度 c 的变化对LP₃₁芯间串扰的影响

Fig. 8. The influence of the change of trench width c on the inter-core crosstalk of LP₃₁ mode.

如图8所示,随着沟槽宽度的不断增大,LP₃₁模式的芯间串扰不断减小,为保证空气孔的实现,空气孔与纤芯单元外层的沟槽保持一定间距,故选取 $\lambda = 1625$ nm, $c = 2$ μm时,讨论内包层厚度 b 的变化对于芯间串扰的影响.图9给出了内包层厚度 b 的变化对芯间串扰的影响.

如图9所示,在内包层厚度从1 μm增长到1.5 μm时,LP₃₁模式的串扰有些许的减小,再增大内包层厚度芯间串扰几乎没有变化;与图7对比可得,沟槽对芯间串扰的减小相比于内包层有着更加显著的效果.

与沟槽结构相比,空气孔有着更大的折射率差,对整个纤芯单元都有着较强的约束力,图10显示了空气孔的大小变化对于芯间串扰的影响.

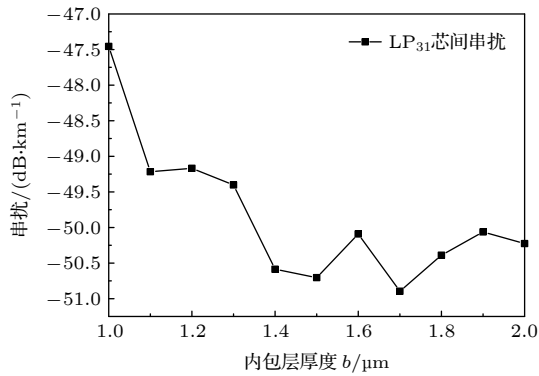
图9 内包层厚度 b 的变化对芯间串扰的影响

Fig. 9. The influence of the change of the inner cladding thickness b on the inter-core crosstalk.

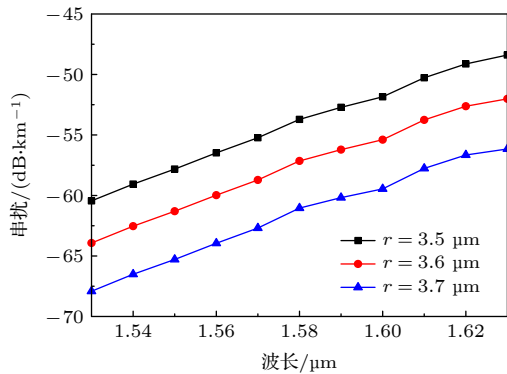
图10 气孔半径 r 变化对于 LP_{31} 模式的芯间串扰影响

Fig. 10. The influence of the change of the air hole radius r on the inter-core crosstalk of the LP_{31} .

如图10所示,随着部分复用的空气孔结构半径的增大,纤芯间的串扰显著的减小;取 $\lambda = 1.53 \mu\text{m}$ 时与图7对比可得,气孔半径增大 $0.2 \mu\text{m}$ 与沟槽增大 $1.4 \mu\text{m}$ 效果相近。

经过模拟分析可知,内包层 b 选择合适的厚度可以有效地降低芯间串扰,沟槽宽度 c 的增加有助于降低串扰,但是沟槽宽度的增加会增大光纤的成本,且相比于增加沟槽的宽度,气孔的增大可以更加有效地降低串扰。经过仿真优化,优化后的光纤参数如表2所示。

表2 优化后的光纤参数

Table 2. The optimized parameters of the optical fiber.

$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$c/\mu\text{m}$	$\Delta_1/\%$	$\Delta_2/\%$	$\Delta_3/\%$	$r/\mu\text{m}$	$\Delta_t/\%$
7.5	1.5	2.5	1.45	1.35	1.25	3.7	-0.6

4 讨论

为实现低模间和芯间串扰,同时保证传输模式具有足够大的有效模面积和较高的相对纤芯复用

因子,本文在光纤设计时采用纤芯高掺杂、沟槽辅助和气孔隔离的思路,利用有限元法对几个重要参数的影响进行了分析,如纤芯折射率差、沟槽区域宽度、气孔半径等。对于芯间串扰,低阶模式的串扰可以被有效控制,随着模式阶数的增加,对应模式的芯间串扰急剧增大,通过增大纤芯和沟槽的掺杂浓度可以有效抑制串扰,但掺杂浓度又受到非线性效应和光纤实际制备时掺杂上限的限制,因此本文采用沟槽辅助和气孔隔离相结合的方案。本文设计的多芯少模微结构光纤的一个明显的缺点是光纤结构比较复杂,给光纤的制备带来了一定的难度。在光纤预制棒制备过程中,纤芯和沟槽区域可以通过化学气相沉积法控制掺杂浓度形成三种结构参数不同的预制棒,然后对预制棒进行多次延伸,使之与其他堆叠组件尺寸匹配^[25],气孔区域通过空心石英管控制而成,最终根据设计结构通过堆积法在石英外套管内堆叠形成预制棒,进一步利用分布气压控制法控制多芯微结构光纤。

表3将几种已发表的多芯光纤结构及其所能稳定传输的最高阶模式的串扰情况与本文设计的光纤进行对比。从表中可以看出,本文采用的空气孔+沟槽结构能够传输的模式数量最多,同时其光纤外径最小;文献[27]虽然在光纤外径 $125 \mu\text{m}$ 的情况下也达到了 -50 dB/km 的低串扰,但它仅能传输1个模式(属于单模光纤)。综合各特性参数,本文设计的光纤在传输信道数与芯间串扰方面具有优势。

表3 与已发表的多芯光纤串扰性能对比

Table 3. Crosstalk characteristics comparison with multicore fibers published.

光纤	纤芯个数	模式数量	光纤结构	芯间串扰/(dB·km ⁻¹)	光纤直径/ μm
文献[9]	7	3	空气孔	-32	192
文献[26]	7	2	沟槽	-57	243
文献[27]	6	1	沟槽	-50	125
文献[28]	7	4	空气沟槽	-52	200
本文设计	7	5	空气孔+沟槽	-50	125

5 结论

本文提出了一种外径为标准 $125 \mu\text{m}$ 的低串扰高密度多芯少模光纤。采用低折射率沟槽与气孔隔离的方式使得光纤5个LP模式芯间的串扰在

整个 C+L 波段低于 -50 dB/km, 光纤中 5 个模式的有效模面积均大于 $86 \mu\text{m}^2$. 相对纤芯复用因子为 57.63. 数值分析表明相比于同质纤芯, 异质纤芯能够使得光纤在纤芯折射率较低时获得良好的串扰性能, 且整体弯曲性能优于同质光纤; 沟槽结构能够有效地降低串扰, 气孔大小对光纤串扰的影响极为明显, 如要获得更低的串扰性能, 应当设置适当的沟槽宽度, 尽可能增大气孔直径. 该光纤可突破香农极限, 满足容量日益增长的光通信系统的需求.

参考文献

- [1] Jiang S L 2019 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University)(in Chinese) [姜寿林 2019 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [2] Li G F, Bai N, Zhao N B, Xia C 2014 *Adv. Opt. Photonics* **6** 413
- [3] Sasaki Y, Takenaga K, Matsuo S, Aikawa K, Saitoh K 2017 *Opt. Fiber Technol.* **35** 19
- [4] LI J H, Ge D W, Gao Y Y, JIA J C, Yu J Y, He Y Q, Chen Z Y 2018 *Study on Optical Communications* **6** 31 (in Chinese) [李巨浩, 葛大伟, 高宇洋, 贾骏驰, 于津怡, 何永琪, 陈章渊 2018 光通信研究 **6** 31]
- [5] Yu H, Qu H X, Peng C Y, He Z X 2019 *CICC* Chengdu, Sichuan, November-30, 2019, p147 (in Chinese) [喻煌, 曲华昕, 彭楚宇, 贺志学 2019 中国信息通信大会论文集 中国 四川 成都, 11–30, 2019 p147]
- [6] Chralyvy A 2009 *35th European Conference on Optical Communication* Vienna, Austria, Sept. 20–24, 2009 p1
- [7] Liu C, Pei L, Xie Y H, Wang J S, Zheng J J, Ning T G, Li J 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 1106004 (in Chinese) [刘畅, 裴丽, 解宇恒, 王建帅, 郑晶晶, 宁提纲, 李晶 2020 中国激光 **47** 1106004]
- [8] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, Bolle C, Sierra A, Mumtaz S, Esmaelpour M, Burrows E C, Essiambre R J, Winzer P J, Peckham D W, McCurdy A H, Lingle R 2012 *J. Light. Technol.* **30** 521
- [9] Xia C, Amezcua-Correa R, Bai N, Antonio-Lopez E, Arriola DM, Schulzgen A, Richardson M, Linares J, Montero C, Mateo E, Zhou X, Li G F 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1914
- [10] Xie X, Tu J, Zhou X, Long K, Saitoh K 2017 *Opt. Express* **25** 5119
- [11] Tu J J, Li Z H 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0106003 (in Chinese) [涂佳静, 李朝晖 2021 光学学报 **41** 0106003]
- [12] Saitoh K, Koshiha M, Takenaga K, Matsuo S 2012 *Conference on Next-Generation Optical Communication - Components, Sub-Systems, and Systems*, San Francisco, CA, JAN 24–26, 2012 p8284
- [13] Amma Y, Sasaki Y, Takenaga K, Matsuo S, Tu J, Saitoh K, Koshiha M, Morioka T, Miyamoto Y 2015 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* Los Angeles, CA, Mar. 22–26, 2015
- [14] Wen M Y 2015 *M. S. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [温明妍 2015 硕士学位论文 (北京: 北京交通大学)]
- [15] Koshiha M, Saitoh K, Takenaga K, Matsuo S 2012 *IEEE Photon. J.* **4** 1987
- [16] Koshiha M, Saitoh K, Takenaga K, Matsuo S 2011 *Opt. Express* **19** 102
- [17] Takenaga K, Sasaki Y, Guan N, Matsuo S, Kasahara M, Saitoh K, Koshiha M 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1941
- [18] Kumar D, Ranjan R 2018 *Opt. Fiber Technol.* **41** 95
- [19] Fleming J W 1984 *Appl. Opt.* **23** 4486
- [20] Liu J Y 2015 *M. S. Thesis* (Beijing: Beijing Youdian University) (in Chinese) [刘俊彦 2015 硕士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [21] Matsuo S, Sasaki Y, Akamatsu T, Ishida I, Takenaga K, Okuyama K, Saitoh K, Koshiha M 2012 *Opt. Express* **20** 28398
- [22] Yuan L B 2019 *Laser. Opt. Pro.* **56** 170612 (in Chinese) [苑立波 2019 激光与光电子学进展 **56** 170612]
- [23] Marcuse D 1982 *Appl. Opt.* **21** 4208
- [24] Salsi M, Koebele C, Sperti D, Tran P, Mardoyan H, Brindel P, Bigo S, Boutin A, Verluise F, Sillard P, Bigot-Astruc M, Provost L, Charlet G 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 618
- [25] Li Z H, Wang L Y, Wang Y, Li S G, Meng X J, Guo Y, Wang G R, Zhang H, Cheng T L, Xu W W, Qin Y, Zhou H 2021 *Opt. Express* **29** 26418
- [26] K Mukasa, K Inamura, R Sugizaki 2012 *Opto-Electronics and Communications Conference* Busan, Korea, July 2–6, 2012 p473
- [27] Jiang S L, Ma L, Velazquez M N, He Z Y, Sahu J K 2019 *Opt. Fiber Technol.* **50** 55
- [28] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, Zhao Q, Ning T G, Li J 2020 *Opt. Commun.* **474** 126155

A low-crosstalk and high-density multi-core few-mode fiber based on heterogeneous core and trench-assisted air-holes isolation*

Wang Yan¹⁾ Han Ying^{1)†} Li Zeng-Hui²⁾ Gong Lin¹⁾

Wang Lu-Yao²⁾ Li Shu-Guang²⁾

1) (*The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering (School of Software), Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*Key Laboratory for Microstructural Material Physics of Hebei Province, State Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

(Received 24 May 2021; revised manuscript received 27 September 2021)

Abstract

The capacity of a traditional optical communication system based on single-mode fiber has approached to its theoretical limit. Multi-core few-mode fibers provide an effective way to break through the bottleneck of existing transmission capacity. In this paper, a 5-LP-mode weakly-coupled low-crosstalk 7-core fiber is designed by using a combination of trench assistance and air hole isolation structure. The fiber with a standard outer diameter achieves low crosstalk between cores and modes. The inter-core crosstalk area and the effective mode area of the core are calculated by the finite element method. After design optimization, there are 5 stable transmission LP modes in the C+L band of optical communication in this fiber. The effective refractive index difference between LP₂₁ mode and LP₀₂ mode is the smallest and is greater than 1.1×10^{-3} . The LP₃₁ mode in the optical fiber has the largest inter-core crosstalk and the loss is lower than -50 dB/km. The fiber can achieve low crosstalk transmission between modes and cores at the same time. The mode areas of the 5 LP modes in the 7 cores are larger than $86 \mu\text{m}^2$, and the relative core multiplexing factor is 57.63 at a wavelength of 1550 nm. Therefore, this fiber can be used in a large-capacity high-speed fiber transmission system.

Keywords: multi-core few-mode fiber, heterogeneous core, C+L band, low crosstalk

PACS: 42.81.-i, 42.79.Sz, 47.11.Fg

DOI: 10.7498/aps.71.20210974

* Project supported by the National Key Research and Development Project, China (Grant No. 2019YFB2204001) and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2019203549, F2019105108).

† Corresponding author. E-mail: hanyingysu@163.com