

一种具有低串扰抗弯曲的单沟槽十九芯单模异质光纤

马丽伶 李曙光 李建设 孟潇剑 李增辉 王璐瑶 邵朋帅

A kind of single trench 19-core single-mode heterogeneous fiber with low crosstalk and anti-bending performance

Ma Li-Ling Li Shu-Guang Li Jian-She Meng Xiao-Jian Li Zeng-Hui Wang Lu-Yao Shao Peng-Shuai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 104206 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212221

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212221>

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

一种沟槽辅助气孔隔离的低串扰高密度异质多芯少模光纤

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

物理学报. 2022, 71(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210974>

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>

低串扰低弯曲损耗环形芯少模多芯光纤的设计

Design of ring-core few-mode multi-core fiber with low crosstalk and low bending loss

物理学报. 2022, 71(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211534>

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>

国产长锥形光纤实现400 W单频单模激光输出

400-W single-mode single-frequency laser output from homemade tapered fiber

物理学报. 2021, 70(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210682>

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>

一种具有低串扰抗弯曲的单沟槽 十九芯单模异质光纤*

马丽伶 李曙光[†] 李建设 孟潇剑 李增辉 王璐瑶 邵朋帅

(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 12 月 1 日收到; 2022 年 1 月 28 日收到修改稿)

飞速增长的光通信容量需求推动着光纤技术的发展, 基于空分复用技术的多芯光纤作为突破传统单模光纤容量限制的方法引起了广泛的关注. 本文将纤芯异质结构与低折射率沟槽结合, 设计了 1 种具有低串扰的十九芯单模光纤结构, 该结构由环绕沟槽的 3 种不同参数的纤芯按正六边形排布构成, 在 $C+L$ 波段能实现稳定单模传输. 研究表明: 在波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 时, 通过在沟槽中进行掺氟处理, 可以使光纤的芯间串扰降低至 $-39.52\ \text{dB}/100\ \text{km}$. 此外在弯曲半径为 $100\ \text{mm}$ 时, 弯曲损耗为 $-7.7 \times 10^{-5}\ \text{dB}/\text{m}$ 且色散低于 $24\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$. 纤芯中基模的有效模场面积约为 $80\ \mu\text{m}^2$, 有利于降低非线性效应. 与传统单模光纤及单沟槽同质结构光纤相比, 该结构具有更低的串扰、更好的抗弯曲性能和更大的模场面积. 本文设计的光纤适用于空分复用系统中远距离大容量的传输.

关键词: 多芯单模光纤, 异质结构光纤, 单沟槽, 低串扰**PACS:** 42.81.-i, 42.79.Sz, 47.11.Fg**DOI:** 10.7498/aps.71.20212221

1 引言

随着通信网络的快速发展, 光纤作为光信息传输的重要媒介, 已被用于各种情况的信号传输. 单模光纤具有应用领域广泛和应用方式多样的特点, 被用于长距离、大容量通信设备系统及各种光纤传感器中, 在光纤通信中起着尤其重要的作用. 传统单模光纤的传输容量已接近 $100\ \text{Tb/s}$ 的香农传输极限^[1,2], 无法满足当前的通信容量需求. 为解决这一问题, 研究者们开始关注并研究基于空分-模分复用技术的多芯光纤^[3,4].

多芯光纤是将多个独立的纤芯整合在一根光纤中. 它的特点是可以充分利用空间多维度增加纤芯数量, 从而增加光纤的传输容量. 从空分复用的角度来说, 多芯光纤是将多空间的路径整合在一根光纤之中, 但是由于包层厚度有限, 纤芯的数量越

多, 纤芯之间的距离就越近, 这样纤芯之间的能量就易发生耦合, 造成纤芯之间的串扰. 所以如何抑制纤芯之间的串扰成为设计多芯光纤时不可避免的问题. 多芯光纤降低串扰的方法主要有: 沟槽辅助型^[5-7], 空气孔辅助型^[8,9] 和异质结构型光纤^[10-13]. 沟槽辅助和空气孔辅助的方式都是通过增加纤芯和其周围的折射率差将能量束缚在光纤的纤芯之中. 沟槽辅助型是在纤芯外部围绕一层较低折射率材料形成沟槽, 这样使能量约束在纤芯区域内, 缩小了纤芯之间模场的交叠区域, 实现芯间能量耦合的阻挡和抑制. 空气孔辅助型是每个纤芯周围都包裹一圈空气孔, 形成了平均折射率低于周围介质的折射率的低折射率部分, 其抑制串扰的原理与低折射率沟槽相似. 但空气孔辅助型光纤在制备和熔接时易造成空气孔塌陷, 不适合长距离实际制备和应用. 相比而言, 沟槽型辅助光纤在制造工艺上更成熟, 且在制备和熔接的过程中十分稳定. 为纤芯添

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFB2204001) 和国家自然科学基金 (批准号: 12074331) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

加沟槽还能提高光纤在抗弯曲方面的性能, 相比空气孔辅助型光纤更具优势. 异质结构光纤是通过增加相邻纤芯之间的传播常数差, 减少相邻纤芯中的相位匹配, 从而达到抑制芯间串扰的效果. 除此之外, 异质结构光纤的弯曲半径存在临界值^[14], 达到此临界值后, 弯曲半径对芯间串扰的影响很小, 这使光纤具有很好的抗弯曲性.

近年来, 基于空分-模分复用技术的多芯光纤成为光通信领域长距离传输光纤的研究热点. 在文献^[15]中, 提出了1种传统的同质十九芯单模光纤, 该光纤通过将19个环绕低折射率沟槽的纤芯整合在直径为200 μm 的包层中, 达到了传输容量为305 Tb/s, 运用空分复用技术实现了大容量传输的要求, 但是该结构的串扰特性只能降低至-42 dB/km. 未达到多芯光纤远距离传输的标准. 在文献^[16]中, 设计并制备了1种新型高密度三十芯单模异质结构光纤, 运用4种结构参数不同的纤芯进行排布, 在相关长度大于1 m的条件下, 通过模拟得到该结构在理论上的串扰值小于-40 dB/100 km, 且弯曲半径大于88 mm时芯间串扰趋于稳定. 实际制备的高密度三十芯单模异质结构光纤在传输9.6 km时的芯间串扰也达到了-50 dB. 该结构凸显了纤芯异质结构光纤在抑制串扰和抗弯曲性能上的优势以及在制备上的可行性. 在文献^[17]中, 为了扩充传输容量, 设计了方阵排布结构的三十二芯单模异质光纤, 该光纤由3种纤芯组成, 芯间串扰达到了-31 dB/100 km, 符合多芯光纤长距离传输的条件, 发挥了纤芯异质结构在抑制芯间串扰上的优势, 但是在实际制作上有很大难度.

本文设计了1种沟槽辅助型十九芯单模异质结构光纤. 19个纤芯呈六角密排型, 由3种参数不同的纤芯构成, 每2个相邻纤芯的参数均不同, 同时为每个纤芯增加单层低折射率沟槽. 通过COMSOL软件进行模拟, 采用全矢量有限元方法研究了该光纤的芯间串扰、损耗和色散等性能, 找出影响光纤传输性能的光纤参数并对其进行优化, 得到的结果如下: 光纤在1.55 μm 的波长下传输100 km后, 3种纤芯之间的串扰分别是: -39.52 dB、-33.07 dB、-30.33 dB, 随着沟槽折射率的降低, 3种纤芯之间的串扰可降低至-48.02 dB; 该结构光纤具有抗弯曲的性能, 当弯曲半径达到80 mm后, 光纤的芯间串扰受弯曲半径的影响很小, 且逐

渐接近上述的串扰值; 3种纤芯的色散也能控制在24 ps/(nm·km)以下. 综上所述该光纤具有良好的传输性能, 可用于空分复用系统的大容量长距离传输, 为进一步增加空间信道数和传输容量提供了发展方向.

2 光纤参数设计

2.1 光纤结构

本文将纤芯异质结构与沟槽辅助结构相结合, 设计了1种具有低串扰、低损耗、可以长距离传输的十九芯单沟槽异质结构光纤. 该光纤只对基模进行传输. 19个纤芯由3种不同的纤芯组成, 每种纤芯都环绕着1个石英包层和1个低折射率沟槽. 十九芯异质结构光纤截面如图1. 红色、绿色、黄色纤芯分别代表纤芯1, 2, 3, r_1, r_2, r_3 分别代表3种纤芯的半径. 此外光纤的包层直径 D_{cl} 为240 μm , 芯间距为42 μm .

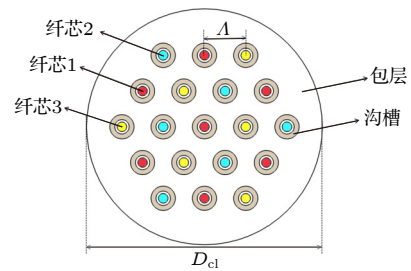


图1 单沟槽辅助型异质十九芯光纤
Fig. 1. Schematic structure of heterogeneous trench-assisted 19-core fiber.

本文所设计的光纤是采用阶跃折射率分布结构. 纤芯区域的折射率是使用掺锗石英材料, 沟槽包层的较低折射率则是采用掺氟石英材料, 石英包层使用纯石英材料. 3种纤芯的折射率和纤芯半径均不同, 图2是光纤从中间纤芯向右的3种纤芯的折射率分布. $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 分别代表3种纤芯与包层之间的相对折射率差, Δ_4 是沟槽和包层之间的相对折射率差, t 为沟槽宽度.

2.2 参数设计

本文的主要研究目的是设计出1种可远距离传输的十九芯单模光纤, 所以高阶模式需要在传输波段截止. 对于传统阶跃折射率光纤, 归一化频率 V ^[18]决定了纤芯中可以容纳的模式数量.

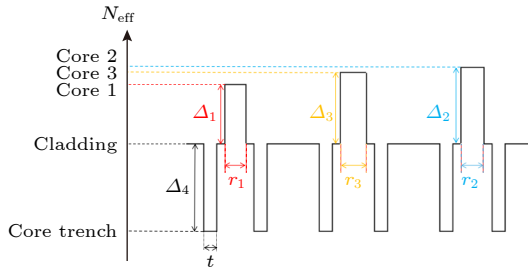


图 2 纤芯折射率分布

Fig. 2. Refractive index profile of adjacent fiber-core.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}, \quad (1)$$

式中, n_{co} 和 n_{cl} 分别代表纤芯和包层的折射率, a 为纤芯半径, λ 为光波的波长. 若想要纤芯中只传输基模, 则需要归一化频率 $V < 2.405$. 对于纤芯异质结构光纤, 则要求所有纤芯的归一化频率都满足上述条件. 本文则利用这一条件确定了纤芯的参数, 且此参数下的高阶模的截止波长 $\lambda_{cc} < 1.53 \mu\text{m}$.

为了降低相邻纤芯之间的串扰, 除了添加沟槽辅助外, 本文还选择了采用纤芯异质结构. 若要做到包层中的相邻纤芯均为参数不同的纤芯, 这样则至少需要 3 种纤芯.

在多芯光纤的设计上, 为了光纤在熔接时尽可能的减小熔接损耗, 我们尽量保持各个纤芯所传输的模式的有效模场面积 A_{eff} 相等. 有效模场面积受纤芯直径和折射率的影响, 纤芯折射率的减小和纤芯直径的增加会使有效模场面积增大. 经过对纤芯参数的优化和对比, 选出有效模场面积相同但是纤芯折射率差值较大的 3 组参数在十九芯光纤中进行排列, 3 种纤芯的参数如表 1 所示.

 表 1 光纤的初始参数
Table 1. The initial fiber parameters.

参数	纤芯 1	纤芯 2	纤芯 3
纤芯半径/ μm	4.79	4.87	4.83
纤芯与包层的相对折射率差/%	0.26	0.31	0.29
沟槽宽度/ μm		4.5	
沟槽与包层的相对折射率差/%		-0.5	
芯间距/ μm		42	
包层直径/ μm		240	

3 光纤串扰特性的分析

3.1 异质结构光纤芯间串扰的计算方法

芯间串扰是检测光纤是否能用于远距离传输

的重要标准. 芯间串扰是通过模式耦合理论和功率耦合理论进行计算得到的. 在光纤的 m 芯和 n 芯中, 首先应用模式耦合方程^[14]:

$$\frac{dA_m}{dz} = -j \sum_{m \neq n} k_{mn} A_n(z) \exp(j\Delta\beta_{mn}z) f(z), \quad (2)$$

式中, $\Delta\beta_{mn}$ 是纤芯 n 和纤芯 m 之间的传播常数差, A_n 和 A_m 是 n 芯和 m 芯模式振幅, k_{mn} 是纤芯 n 与纤芯 m 之间的模式耦合系数, $f(z)$ 为相位函数, 主要受光纤的弯曲的影响. 在异质结构的多芯光纤中, 由于纤芯参数并不相同, 所以 m 芯和 n 芯之间的模式耦合系数互不相同, 即 $k_{mn} \neq k_{nm}$. 功率耦合理论是在模式耦合理论的基础上进行的. 在模式耦合理论中若是不考虑 2 个纤芯之间互不相同的模式耦合系数, 那么在后续的计算中, 会产生极大的误差. 所以需要定义模式耦合系数为平均模式耦合系数 $K_{mn} = (k_{mn} + k_{nm})/2$ ^[14], 再进行后续的分析 and 计算.

最后通过应用功率耦合理论, 得出中间芯和其相邻芯之间的串扰值. 功率耦合方程^[14] 为

$$\frac{dP_m}{dz} = \sum_{m \neq n} h_{mn}(z) [P_n(z) - P_m(z)], \quad (3)$$

式中, h_{mn} 为纤芯 m 与纤芯 n 的功率耦合系数, P_m 为纤芯 m 的平均功率. 为了避免功率耦合方程的数值解, 我们将功率耦合系数在一个扭转间隔内取平均, 如 (4) 式所示^[19]:

$$\bar{h}_{mn} = \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\gamma}} h_{mn}(z) dz. \quad (4)$$

此时, 纤芯 m 和纤芯 n 之间的串扰可以表示为^[19]

$$XT = 10 \lg \tanh(\bar{h}_{mn}L), \quad (5)$$

式中 L 是光纤长度. 在异质结构的光纤中, 弯曲半径对串扰的影响分为 2 个区域. 首先是相位匹配区域, 在此区域中芯间串扰主要受弯曲半径的影响. 此区域中平均功率耦合系数^[19] 表达式为

$$\bar{h}_{mn} = \frac{2K_{mn}^2 R_b}{B_{mn}}, \quad (6)$$

式中, K_{mn} 为平均模式耦合系数, R_b 为光纤的弯曲半径. 其中 B_{mn} 是由纤芯 m, n 的传播常数 β_m, β_n , 以及坐标 $(x_m, y_m), (x_n, y_n)$ 推导出的参量, 公式表示为^[19]

$$B_{mn} = \sqrt{(\beta_m x_m - \beta_n x_n)^2 + (\beta_m y_m - \beta_n y_n)^2}. \quad (7)$$

随着光纤的弯曲半径的增加, 相邻的纤芯从相位匹配状态过渡到相位不匹配状态, 芯间串扰值达到最高处后骤然降低, 并逐渐趋于稳定. 在此区域中, 主要受相关长度的影响. 平均功率耦合系数^[19]表达式为

$$\bar{h}_{mn} = \frac{2K_{mn}^2}{(\Delta\beta_{mn})^2 d}, \quad (8)$$

式中, d 为相关长度, 是由于光纤在弯曲时产生的相位偏移而引起的一个任意值. 经过研究者多次实验和模拟, 当相关长度为 0.05 m 时最符合实验结果^[11].

3.2 沟槽对芯间串扰的影响

低折射率的沟槽能够很好的限制光信号的泄漏, 因此它对串扰的抑制有很好的效果. 在纤芯参数确定后, 优化辅助结构参数, 也可以使光纤的性能得到提升. 本文采用的是添加掺氟沟槽的辅助结构, 通过改变沟槽的宽度和折射率来抑制芯间串扰. 芯间串扰值与沟槽宽度之间的关系如图 3 所示. 在计算过程中, 纤芯采用的是表 1 中的参数, 此时沟槽掺杂的浓度为 -0.5%, 相关长度选用的是 $d = 0.05$ m. 由图 3 可以看出, 随着沟槽宽度的增加, 串扰的抑制效果越好, 当沟槽宽度达到 $4.5 \mu\text{m}$ 时, 3 种相邻纤芯之间均满足串扰值小于 -30 dB/100 km, 已达到多芯光纤长距离传输的标准.

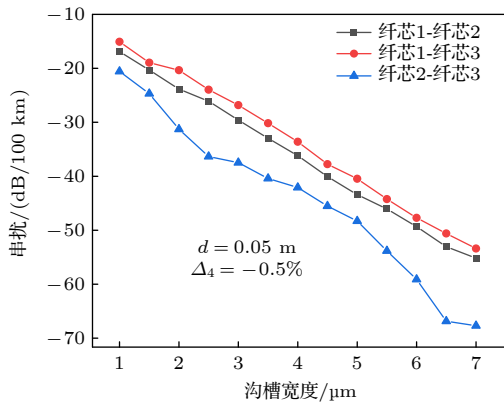


图 3 芯间串扰与沟槽宽度的关系

Fig. 3. The relation between crosstalk and trench width.

除了沟槽宽度, 沟槽的折射率也影响着相邻纤芯间的串扰值. 本文计算了沟槽与包层的相对折射率差对芯间串扰的影响, 计算结果如图 4 所示: 随着沟槽折射率降低, 能量更好地束缚在纤芯之中. 由于光纤制作工艺的限制, 沟槽的相对折射率最低

为 -0.7%. 在图 4 中, 芯间串扰随着沟槽折射率的降低而降低, 当沟槽浓度为 -0.5% 时, 3 种纤芯之间的串扰均满足远距离传输条件. 继续降低沟槽的相对折射率直至 -0.7%, 此时 3 种纤芯之间的串扰可达到 -48.02 dB/100 km, -38.50 dB/100 km, -39.23 dB/100 km.

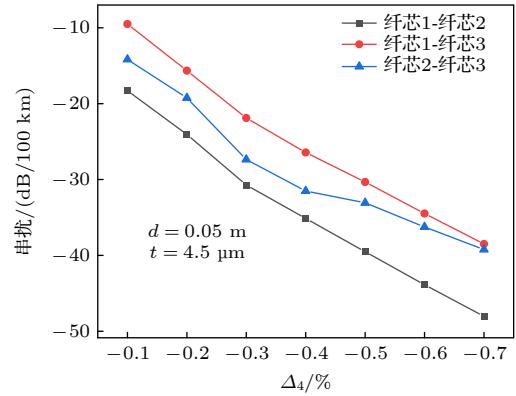


图 4 芯间串扰与沟槽相对折射率之间的关系

Fig. 4. Relation between crosstalk and the relative refractive index of the trench.

3.3 弯曲半径对串扰的影响

光纤弯曲使光能泄露到包层, 光能损耗增加的同时相邻纤芯间的串扰也会增加. 弯曲半径的临界值 R_{pk} 将芯间串扰随弯曲半径的变化分为两部分, R_{pk} 可以通过计算得到, 其表达式^[17]为

$$R_{pk} = \frac{n_{eff}}{\Delta n_{eff}} \Lambda, \quad (9)$$

式中, Δn_{eff} 为不同纤芯的有效折射率差, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为芯间距. 在本文中的 3 种纤芯弯曲半径的临界值均低于 80 mm. 在弯曲半径大于临界值且相关长度 $d = 0.05$ m 时, 3 种纤芯的串扰均满足传输条件. 3 种纤芯的芯间串扰值与弯曲半径的关系如图 5.

如图 5 所示, 计算了 3 种纤芯之间的串扰随弯曲半径变化的曲线. 图中芯间串扰最大值对应的是弯曲半径的临界值 R_{pk} . 在弯曲半径从 10 mm 增大到 R_{pk} 时, 芯间串扰随着弯曲半径的增加而增大, 在相关长度分别为 0.01 m, 0.05 m, 1 m, 10 m 的条件下计算的芯间串扰曲线重合, 其原因是因为此时处于相位匹配区域, 弯曲半径是使芯间串扰变化的主要因素. 当弯曲半径大于临界值 R_{pk} 后, 芯间串扰随弯曲半径变化的曲线逐渐平稳, 芯间串扰主要受相关长度的影响, 随着相关长度的增加,

芯间串扰的抑制效果越好. 当弯曲半径大于 R_{pk} 时, 芯间串扰的抑制效果十分显著. 图 5 中的 3 种纤芯的 R_{pk} 值均在 80 mm 之内, 光纤具有弯曲不敏感的传输特性. 当弯曲半径一直增大, 3 种纤芯的芯间串扰呈稳定趋势, 如图 6 所示, 当弯曲半径增加到 3000—5000 mm 时, 图像接近一条直线, 此时芯间串扰保持稳定, 且数值逐渐接近该光纤不存在弯曲状态时的芯间串扰. 经过计算, 当此光纤为直光纤时, 3 种纤芯之间的芯间串扰分别是 -39.52 dB/100 km, -33.07 dB/100 km, -30.33 dB/

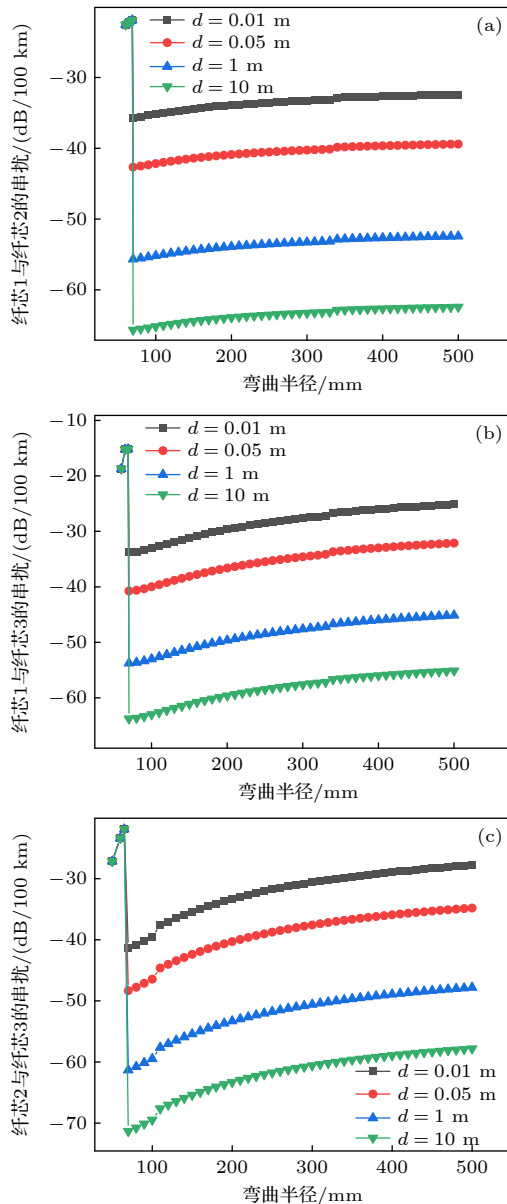


图 5 不同纤芯间的串扰与弯曲半径之间的关系 (a) 纤芯 1 和纤芯 2 之间的串扰; (b) 纤芯 1 和纤芯 3 之间的串扰; (c) 纤芯 2 和纤芯 3 之间的串扰

Fig. 5. Crosstalk dependence on bending radius of (a) Core 1-Core 2; (b) Core 1-Core 3 and (c) Core 2-Core 3.

100 km. 已满足多芯光纤远距离传输的条件, 包层中的每个纤芯都可以作为独立的信道进行信号传输.

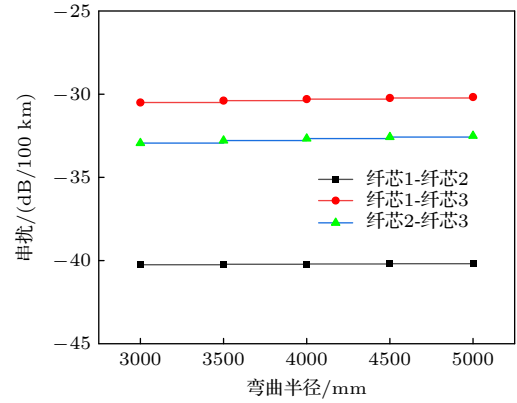


图 6 弯曲半径增加到 3000—5000 mm 时的芯间串扰
Fig. 6. Crosstalk dependence on bending radius ($R_{pk} = 3000-5000$ mm).

3.4 满足芯间串扰标准的工作波段

除了以上各个因素, 工作波长也影响着光纤的芯间串扰. 同样的一根光纤, 工作波长越长, 芯间串扰的抑制效果越差. 本文所设计的光纤在 $C+L$ 波段下可以稳定传输, 且芯间串扰值小于 -30 dB/100 km. 在弯曲半径为 100 mm, 传输距离为 100 km 时, 光纤的芯间串扰在不同波长下的变化如图 7 所示.

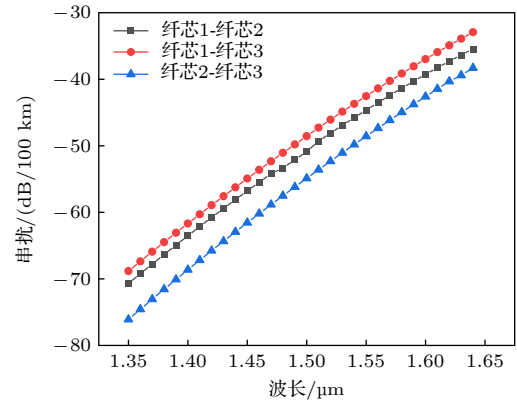


图 7 芯间串扰与工作波长的关系
Fig. 7. The relationship between crosstalk and wavelength.

图 7 中, 黑色、红色、蓝色分别表示纤芯 1 与纤芯 2、纤芯 1 与纤芯 3、纤芯 2 与纤芯 3 之间的芯间串扰, 它们均随着工作波长的增加而增加. 在工作波长为 $1.63 \mu\text{m}$ 时, 3 种纤芯的串扰值分别为 -38 dB, -35 dB, -32 dB, 满足多芯光纤的传输条件. 除此之外, 本文所设计的结构使高阶模的截止波长小于 $1.53 \mu\text{m}$, 保证了光纤在 $C+L$ 波段始终

保持单模传输.

随着工作波长的改变, 纤芯中模式的有效模场面积也会改变, 在不同的工作波长下, 纤芯对模式能量的束缚能力不同, 随着工作波长的增加, 纤芯对能量的束缚减弱, 模式的有效模场面积增加. 本文计算了该结构在不同波长下 3 种纤芯中 LP_{01} 模式的有效模场面积, 结果如图 8 所示. 图中, 黑色、红色、蓝色的线分别代表纤芯 1、纤芯 2、纤芯 3 中 LP_{01} 模式的有效模场面积, 它们随着工作波长的增加而增大. 在 $1.55 \mu\text{m}$ 处 3 种纤芯中 LP_{01} 模式的有效模场面积分别是 $81.52 \mu\text{m}^2$, $79.44 \mu\text{m}^2$, $80.17 \mu\text{m}^2$, 使异质结构光纤有着同质光纤所具备的有效模场面积一致的效果.

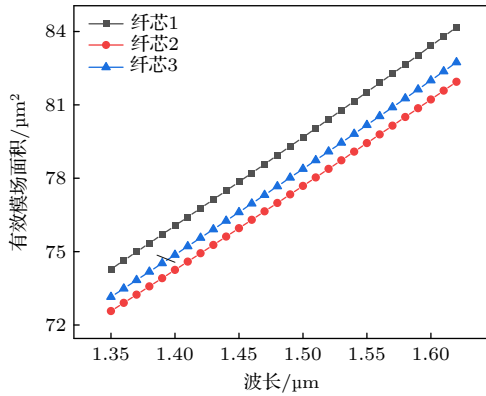


图 8 有效模场面积与工作波长的关系

Fig. 8. The relationship between A_{eff} and wavelength.

3.5 芯间距对光纤弯曲损耗的影响

光纤在使用过程中不可避免的会存在弯曲状态, 光纤弯曲会使纤芯中的能量产生损耗, 这种损耗使纤芯中的模式不能正常传输. 多芯光纤的每个纤芯的损耗都需要达到单芯光纤的损耗标准, 弯曲损耗^[20]的公式为

$$BL = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{imag}(n_{\text{eff}}), \quad (10)$$

式中, BL 为光纤的弯曲损耗, λ 是此光纤的工作波长, $\text{imag}(n_{\text{eff}})$ 是波导中所需模式有效折射率的虚部.

若想 LP_{01} 模式能正常传输, 则需该模式在工作波长为 $1.625 \mu\text{m}$, 弯曲半径是 $R_b=30 \text{ mm}$ 时, 损耗在 $0.5 \text{ dB}/100 \text{ turns}$ 之内. 而若想 LP_{11} 模式截止, 则需该模式在波长为 $1.53 \mu\text{m}$, 弯曲半径为 140 mm 时, 损耗大于 $1 \text{ dB}/\text{m}$. 本文所设计的结构需要保证每个纤芯都单模传输, 所以每个纤芯均需满足上述两个条件. 本文的多芯单模光纤将异质排

布和沟槽辅助结构相结合使光纤具有对弯曲不敏感的特性, 并且有效地减小了光纤中能量的弯曲损耗, 保证基模的低损耗传输.

在模拟计算的过程中, 芯间距也是影响弯曲损耗的因素之一. 芯间距增大的同时纤芯更靠近包层边缘, 此时模式的弯曲损耗和芯间串扰也会改变. 所以本文计算了芯间距对光纤损耗和串扰的影响, 计算结果如图 9 所示, 其中图 9(a) 是在工作波长为 $1.625 \mu\text{m}$ 下进行模拟的, 可以看出芯间距对中间芯和最外层纤芯影响较大, 在芯间距大于 $42 \mu\text{m}$ 时, 损耗值出现大幅度上升. 本文所提出的结构在波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 传播长度为 100 km 时, 光纤最外层纤芯的损耗为 $-7.7 \times 10^{-5} \text{ dB}/\text{m}$. 图 9(b) 是芯间串扰与芯间距之间的关系. 可以看出随着芯间距的增加, 3 条曲线均呈减小趋势. 在芯间距为 $38 \mu\text{m}$ 处, 芯间串扰值便已符合传输条件. 国际上目前多芯光纤的芯间距多数设为 $42 \mu\text{m}$, 综合考虑选择此光纤的芯间距为 $42 \mu\text{m}$.

综上所述, 为提高十九芯单模异质结构光纤优异性, 最终确定光纤的结构参数如表 2 所示.

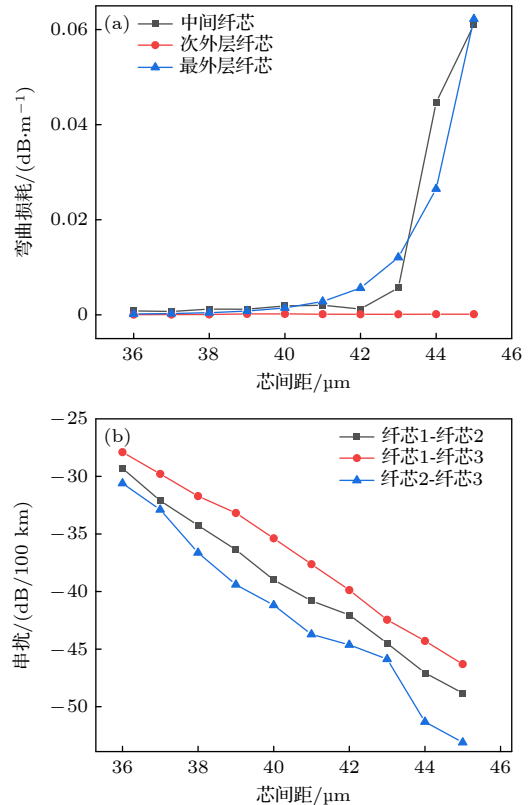


图 9 (a) 弯曲损耗与芯间距的关系; (b) 芯间串扰与芯间距的关系

Fig. 9. Bending loss and crosstalk dependence on core pitch: (a) Bending loss; (b) crosstalk.

表 2 十九芯单模异质光纤的结构参数

Table 2. The parameters of the final proposed structure.

参数	纤芯1 / 纤芯2 / 纤芯3
纤芯半径/ μm	4.79/4.87/4.83
纤芯与包层的相对折射率差/%	0.26/0.31/0.29
芯间距/ μm	42
包层直径/ μm	240

4 光纤的色散、非线性系数的分析

4.1 光纤的色散分析

多芯光纤的色散是考虑低串扰的情况不可避免会影响到的性能,也是我们必须考虑的光纤的传输特性之一.色散的增加会使光脉冲展宽,限制着光通信速率,对光纤通信极为不利.色散 $D^{[20]}$ 的表达式为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (11)$$

式中, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为模式有效折射率的实部, c 为光速. 根据上式,可以计算出 3 种不同纤芯在 $C+L$ 波段内的色散性能,如图 10 所示,3 种纤芯的色散随着工作波长的增加而增加.色散受有效模场面积的影响,随着有效模场面积的增大而增加,所以色散与工作波长的关系曲线和图 8 中有效模场面积与工作波长的关系曲线走势相同.经计算,在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 下,3 种纤芯的色散均保持在 $24 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 以内,相比目前通信用的 G.655 光纤仅大了约 $5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$.

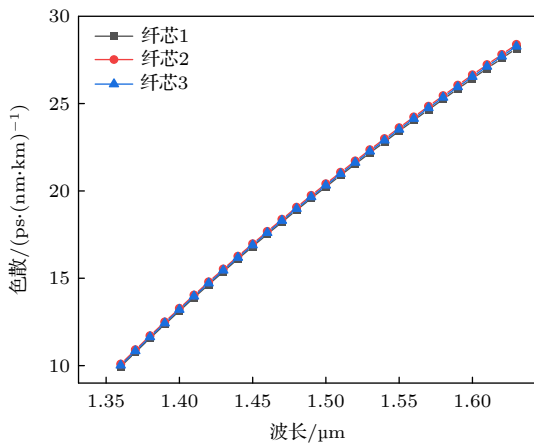


图 10 色散与波长的关系

Fig. 10. The relation between the dispersion and wavelength.

4.2 光纤的非线性系数分析

在现行的光纤通信系统中,由于光纤材料和结构而引起的非线性效应会导致信噪比降低、信号失真等现象,使光纤的传输信号质量劣化.对于多芯光纤来说,为了扩大光纤的传输容量,就需要增大所需模式的有效模场面积.有效模场面积增加使非线性效应减弱,非线性系数减小.非线性系数 $\gamma^{[21]}$ 和有效模场面积 $A_{\text{eff}}^{[22]}$ 的计算公式如下

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (12)$$

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy}, \quad (13)$$

式中, n_2 是石英玻璃 (SiO_2) 的非线性折射率系数, $n_2 = 2.7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$.

从 (12) 式可以看出有效模场面积的增加可以有效的降低非线性系数,但是有效模场面积增大时,会使相邻纤芯中的电场发生重合,芯间串扰增大.所以需要平衡芯间串扰与有效模场面积之间的关系,按照需求择优设计.本文所设计的结构在大模场大容量的前提下降低芯间串扰,保证此光纤可以大容量、远距离传输.本文所设计的光纤在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 下,3 种纤芯的非线性系数约为 $1.3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.如图 11 所示,纤芯的非线性系数在 $C+L$ 波段内呈降低趋势.

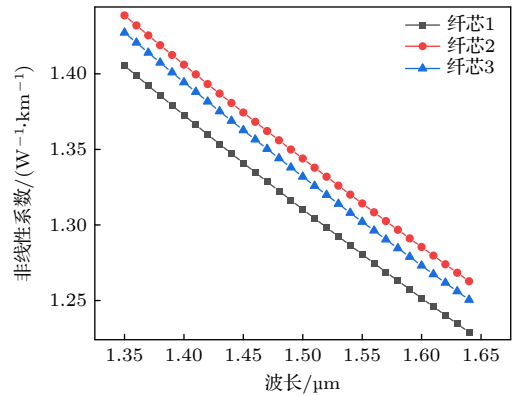


图 11 非线性系数与波长的关系

Fig. 11. The relationship between nonlinear coefficient and wavelength.

在本文中,我们研究了可用于空分复用传输系统的沟槽辅助型异质十九芯光纤,经过模拟计算,该结构具有低串扰、大容量等特性,表 3 给出了本

表 3 几种多芯光纤性能对比

Table 3. Comparison of performance of several multi-core fibers.

多芯光纤	纤芯数量	串扰	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$
沟槽辅助型 ^[7]	7	-35 dB/100 km	70.7
十九芯同质光纤 ^[15]	19	-42 dB/km	71.5
二十二芯光纤 ^[23]	22	-45 dB/km	~75
棒辅助型异质结构光纤 ^[17]	32	-31 dB/100 km	74
沟槽辅助型十九芯异质结构光纤	19	-39.5 dB/100 km	~80

文的光纤与目前已发表研究的对比, 可以得出异质结构十九芯光纤具有一定的优势. 相对于七芯光纤, 十九芯异质结构光纤增加了一定数量的传输信道, 并能够保持每个纤芯的有效模场面积约为 $80 \mu\text{m}^2$, 达到了增大通信容量的效果. 另一方面, 与同质十九芯光纤相比, 增强了抑制串扰的能力; 与纤芯数量大于十九的多芯光纤相比, 本文所提出的结构具有既能保持其低串扰传输又能增大有效模场面积的优点.

此外, 根据单沟槽十九芯异质光纤的结构特点, 该光纤的制备方法和流程如下: 1) 首先是纤芯预制棒的制备. 利用改进的化学气相沉积法, 在高温的石英管中通入含氟掺杂剂, 使之形成一定厚度的低折射率包层, 接着通过加入不同浓度的含锗掺杂剂沉积出 3 种高折射率纤芯, 制备出 3 种异质芯棒; 2) 将相应的芯棒通过延伸法将其拉长至预期的尺寸; 3) 利用超声打孔法在石英母棒上对应位置打孔, 形成具有 19 个孔的结构; 4) 并将拉制好的纤芯预制棒按照结构分布插入孔内形成最终的十九芯预制棒. 最后通过光纤拉丝技术, 将制备好的预制棒进行拉制得到目标光纤. 19 芯异质芯预制棒的制备流程如图 12 所示.

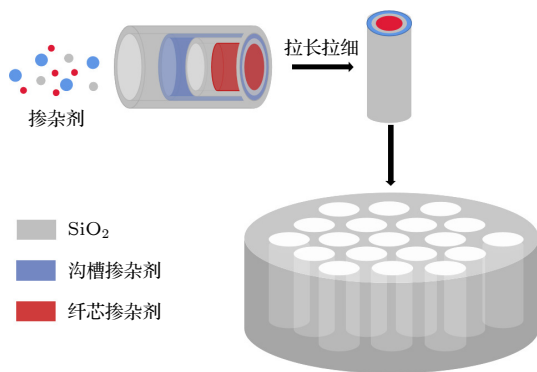


图 12 十九芯异质光纤预制棒的制备流程

Fig. 12. Fabrication process of 19-core heterogeneous fiber preform.

5 总 结

本文提出了 1 种低串扰、抗弯曲光纤结构——单沟槽辅助型异质结构十九芯单模光纤. 光纤的 19 个纤芯呈六边形紧密排列 3 层, 相邻纤芯均不相同, 每个纤芯外分别环绕 1 层包层辅助结构和 1 层低折射率沟槽辅助结构, 这样既可以减少相邻纤芯之间的能量耦合, 抑制芯间串扰, 又可以降低光纤的弯曲损耗, 从而能够有效提升光纤的抗弯曲性能. 本文基于全矢量有限元的方法, 使用 COMSOL Multiphysics 软件计算光纤的传输特性, 得到该结构的性能如下: 在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 且传输距离为 100 km 时, 最低芯间串扰为 $-39.52 \text{ dB}/100 \text{ km}$, 同时能够保证 19 个纤芯的基模能低损耗传输. 结构中的每个纤芯的有效模场面积均保持在 $80 \mu\text{m}^2$, 有利于降低非线性效应. 另一方面, 基于本文所设计光纤中纤芯和沟槽的相对折射率不高, 可以采用改进的化学气相沉积法进行制备, 而且由于该设计结构不包含空气孔, 所以在高温拉丝时能够保持良好的结构稳定性. 综上所述, 单沟槽的十九芯单模异质结构光纤在空分复用系统远距离传输中具有很大的优势.

参考文献

- [1] Saitoh K, Matsuo S 2016 *J. Light. Technol.* **34** 55
- [2] Cai J X, Cai Y, Davidson C R, Lucero A, Zhang H, Foursa D G, Sinkin O V, Patterson W W, Pilipetskii A, Mohs G, Bergano N S 2011 *Conference on Optical Fiber Communication (OFC)/National Fiber Optic Engineers Conference(NFOEC)* Los Angeles, California United States, March 6–10, 2011
- [3] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E 2013 *Nat. Photonics* **7** 354
- [4] 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
- [5] Sakamoto T, Saitoh K, Saitoh S, Shibahara K, Wada M, Abe Y, Urushibara A, Takenaga K, Mizuno T, Matsui T, Aikawa K, Miyamoto Y, Nakajima K 2018 *J. Light. Technol.* **36** 1226

- [6] Ye F H, Tu J J, Saitoh K, Morioka T 2014 *Opt. Express* **22** 23007
- [7] Takenaga K, Arakawa Y, Tanigawa S, Guan N, Matsuo S, Saitoh K, Koshiha M 2011 *Conference on Optical Fiber Communication (OFC)/National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)* Los Angeles, California United States, March 6–10, 2011
- [8] Jin W X, Ren G B, Pei L, Jiang Y C, Wu Y, Shen Y, Yang Y G, Ren W H, Jian S S 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 024210 (in Chinese) [靳文星, 任国斌, 裴丽, 姜有超, 吴越, 谌亚, 杨宇光, 任文华, 简水生 2017 *物理学报* **66** 024210]
- [9] Xia C, Amezcua-Correa R, Bai N, Antonio-Lopez E, Arrijoja D M, Schulzgen A, Richardson M, Linares J, Montero C, Mateo E, Zhou X, Li G F 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1914
- [10] Egorova O N, Semjonov S L, Senatorov A K, Salganskii M Y, Koklyushkin A V, Nazarov V N, Korolev A E, Kuksenkov D V, Li M J, Dianov E M 2014 *Opt. Lett.* **39** 2168
- [11] Tu J J, Saitoh K, Koshiha M, Takenaga K, Matsuo S 2013 *J. Light. Technol.* **31** 2590
- [12] Tu J J, Saitoh K, Koshiha M, Takenaga K, Matsuo S 2012 *Opt. Express* **20** 15157
- [13] Tu J J, Saitoh K, Takenaga K, Matsuo S 2014 *Opt. Express* **22** 4329
- [14] Koshiha M, Saitoh K, Takenaga K, Matsuo S 2011 *Opt. Express* **19** 102
- [15] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, Awaji Y, Wada N, Kanno A, Kawanishi T, Imamura K, Inaba H, Mukasa K, Sugizaki R, Kobayashi T, Watanabe M 2012 *Optical Fiber Communication Conference* Los Angeles, California United States, March 4–8, 2012
- [16] 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, California United States, March 22–26, 2015
- [17] Xie X Q, Tu J J, Zhou X, Long K P, Saitoh K 2017 *Opt. Express* **25** 5119
- [18] Ademgil H, Haxha S 2012 *Opt. Commun.* **285** 1514
- [19] Koshiha M, Saitoh K, Takenaga K, Matsuo S 2012 *IEEE. Photon. J.* **4** 1987
- [20] Wang L Y, Li S G, Meng X J, Guo Y, Li Z H 2021 *J. Opt. Soc. Am. B* **38** 3849
- [21] Li Z H, Li S G, Li J S, Wang L Y, Wang X K, Wang Y, Gong L, Cheng T L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 104208 (in Chinese) [李增辉, 李曙光, 李建设, 王璐瑶, 王晓凯, 王彦, 龚琳, 程同蕾 2021 *物理学报* **70** 104208]
- [22] Wang L Y, Li S G, Li J S, Meng X J, Guo Y, Li Z H, Wang X K, Wang Y 2021 *Opt. Fiber Technol.* **67** 102721
- [23] Puttnam B J, Luís R S, Klaus W, et al. 2015 *European Conference on Optical Communication (ECOC)* Valencia, Spain, September 27–October 1, 2015

A kind of single trench 19-core single-mode heterogeneous fiber with low crosstalk and anti-bending performance^{*}

Ma Li-Ling Li Shu-Guang[†] Li Jian-She Meng Xiao-Jian Li Zeng-Hui
Wang Lu-Yao Shao Peng-Shuai

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

(Received 1 December 2021; revised manuscript received 28 January 2022)

Abstract

The rapid growth of the demand for optical communication capacity promotes optical fiber communication technology. As a method to break through the capacity limitation of conventional single-mode fiber, multi-core fiber based on space division multiplexing technology has attracted extensive attention. In order to respond to the capacity of traditional single-mode fiber positively, we design a scheme of single-mode multi-core fiber combining the arrangement of heterogeneous fiber cores with secondary structure of low refractive index trench. The scheme consists of nineteen fiber cores arranged in a hexagonal closed-packed structure. Heterogeneous trench-assisted multi-core fiber (Hetero-TA-MCF) has low inter-core crosstalk and excellent anti-bending performance. Compared with conventional single-mode fiber, the Hetero-TA-MCF has the large transmission capacity and average effective area of each core of about $80\ \mu\text{m}^2$. The transmission capacity of 19 cores is equivalent to the sum of the transmission capacities of 19 single-core single-mode fibers. We use COMSOL Multiphysics to simulate the fiber structure, finding the parameters that affect the properties of the fiber, selecting parameters and structures for optimal performance. Then we calculate the transmission characteristics by the finite element method, and the results of substantive simulating compute are as follows. The Hetero-TA-MCF achieves a low inter-core crosstalk (XT) of about $-39\ \text{dB}/100\ \text{km}$ so that each core can be transmitted as a separate channel. It meets the standard of multi-core fiber long distance transmission. The XT of the heterogeneous 19-core single-mode fiber is suitable for multi-core fiber long distance transmission standards. The bending loss of the outermost fiber core is $-7.7 \times 10^{-5}\ \text{dB}/\text{m}$ when the bending radius is 10 cm, which reflects the low loss characteristics of the structure. The nonlinear coefficients of three kinds of core are $1.28\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, $1.31\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, and $1.30\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ respectively, reducing the nonlinear effect of optical fiber effectively; the dispersions of three kinds of cores are less than $24\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$. In addition, the steady single-mode transmission is achieved in $C+L$ band. Compared with traditional single-mode fiber and single-trench homogeneous fiber, the proposed fiber in this work has low crosstalk, good bending resistance and large mode field area, which is suitable for long distance and large capacity transmission in space division multiplexing system.

Keywords: multi-core single-mode fiber, non-identical cores, single trench, low inter-core crosstalk

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

DOI: 10.7498/aps.71.20212221

^{*} Project is supported by National Key Research and Development Project of China (Grant No. 2019YFB2204001), the National Natural Science Foundation of China (Grant No.12074331).

[†] Corresponding author. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn