



·强激光物理与技术·

抗弯曲大模场面积少模光子晶体光纤*

解国兴, 谭芳, 张云龙, 高斌豪, 崔顺发, 穆伟, 朱先和

(长春大学理学院, 长春 130022)

摘要: 为更好地解决少模光纤在传输中由于模式耦合过强而导致的信号串扰问题, 对弱耦合光子晶体光纤中的线偏振(LP)模式以及矢量模的传输特性进行了研究, 设计了一种可传输 20 种矢量模的双包层光子晶体光纤。通过有限元法模拟光纤参数对相邻 LP 模式间最小有效折射率差的影响, 优化结构参数, 使光纤支持稳定传输 6 种 LP 模式并满足弱耦合要求。最后分析了不同模式的有效模场面积、弯曲损耗。结果表明: 各模式之间的最小有效折射率差达到 1.12×10^{-4} , 表明模式间的串扰可忽略。基模有效模场面积达到了 $1040 \mu\text{m}^2$, 且其相应的非线性系数低至 1.07×10^{-10} 。此外, 在弯曲半径为 38 mm 时, 各模式弯曲损耗最大仅为 5.65×10^{-8} dB/km。与主流的单模光纤及少模单包层相比, 该结构具有大模场面积, 低模间串扰及更强的抗弯曲能力, 丰富了空分复用技术的开发思路。在大数据、虚拟现实、网络传输容量等新兴业务以及光纤传感方面提供了有益的参考方案。

关键词: 光子晶体光纤; 弱耦合少模; 空分复用技术; 大模场面积; 抗弯曲

中图分类号: TN252

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230046

Bending resistant large mode field area few-mode photonic crystal fiber

Xie Guoxing, Tan Fang, Zhang Yunlong, Gao Binhao, Cui Shunfa, Mu Wei, Zhu Xianhe

(School of Science, Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: To better solve the problem of signal crosstalk caused by mode coupling in the transmission of few mode optical fiber, the transmission characteristics of linear polarization (LP) mode and vector mode in weakly coupled photonic crystal fibers were studied. A double clad photonic crystal fiber has been designed that can transmit 20 vector modes. The effect of fiber parameters on the minimum effective refractive index difference between adjacent LP modes was simulated using finite element method to optimize the structural parameters, allowing the fiber to support stable transmission of six LP modes, which meets the weak coupling requirements. Finally, the effective mode field area and bending loss of different modes were analyzed. The results show that the minimum refractive index difference between the modes of the fiber is more than 1.12×10^{-4} , indicating that the crosstalk between the modes is negligible. Effective mode field area of basic mode reaches $1040 \mu\text{m}^2$, where the corresponding nonlinear coefficient is as low as 1.07×10^{-10} . In addition, at the bending radius of 38 mm, the maximum bending loss of each mode is only 5.65×10^{-8} dB/km. Compared with mainstream single-mode fiber and few mode single cladding, this structure has larger mode field area, lower inter mode crosstalk and stronger bending resistance, enriching the development ideas of space division multiplexing technology. It provides useful reference solutions for emerging services such as big data, virtual reality, network transmission capacity and optical fiber sensing.

Key words: photonic crystal fiber, weakly coupled few mode, space division multiplexing technology, large mode field area, bending resistance

随着数据中心、虚拟现实、无源光网络等短距离通信网络的兴起, 高时均功率密度、超快速传输的需求日益凸显。光波作为调制或复用的信号载体, 可通过时间、空间、频率等多维度传输。而空分复用技术是以“空间”作为光信号的传输方式, 基于此技术而设计的少模光纤, 纤芯内传输模式数量增加, 为光纤通信容量欠缺问题提供了解决方案, 成为光通信最前沿的热点研究方向^[1-4]。空分复用技术包含模分复用、芯分复用以及模芯同时复用^[5-7], 均

* 收稿日期: 2023-03-07; 修订日期: 2023-10-28

基金项目: 中青年科技创新创业卓越人才项目(20210509044RQ)

联系方式: 解国兴, xieguoxing97@163.com。

通信作者: 谭芳, tanf280267@sina.com。

可缓解近距离传输中容量不足的问题。现阶段实现空分复用可利用所设计的单芯少模光纤结构来抑制模间串扰,实现空间传输模式的调制与复用。在短距离通信传输中,光纤结构的设计是重要因素,合理的结构与成熟的制备工艺,在提高能源效率方面具有明显优势。

光子晶体光纤(PCF),又称微结构光纤(MF)。在面对无法兼顾避免模式串扰与非线性效应等问题时,相比传统光纤,PCF通过结构的灵活调控为解决此类问题提供了有效途径。相比单模PCF,少模PCF纤芯通常直径更大,且存在高阶模截止频率,在结构设计时通过控制空气孔直径与间距的大小,可以实现多模式传输。

为减少或避免模间信号串扰,国内研究者开始着手对光纤结构的创新设计,以期能应用到短距离空分复用传输中。李巨浩等^[8]在没有数字信号处理(DSP)的弱耦合模分复用系统中实现4模式模分复用实时视频传输。张金玉等^[9]研究了在1.55 μm波长下,10个LP模式的功率分布和弯曲损耗,所研究的少模PCF在C波段范围内相邻模式间最小有效折射率差值 $\min|\Delta n_{\text{eff}}|=5.155 \times 10^{-4}$,且该光纤在高阶模式下呈现出更高的传感灵敏度以及可区分特定弯曲方向,此研究为提高光纤传感器灵敏度方面的应用提供了价值参考。雷晓等^[10]设计出支持14个LP模式的沟槽和纳米孔辅助双包层弱耦合少模光纤,在C+L波段 $\min|\Delta n_{\text{eff}}|=6 \times 10^{-4}$,且模场面积大于100 μm²,弯曲损耗仅为10⁻⁵ dB/m,此研究表明了沟槽和纳米孔辅助双包层FMF可用于低复杂度短距离传输模分复用系统中。

但上述研究不能同时实现模场面积大、抗弯曲强、模间串扰低等特性,针对此类情况,本文提出了一种支持6种线偏振模式(包含20种矢量模)的弱耦合双包层PCF,利用全矢量有限元法结合COMSOL等其他数值分析软件对PCF结构进行模拟数值分析,构建特殊双包层结构以降低传输损耗。在1.55 μm波段,6个模式间最小折射率差大于10⁻⁴,从而降低模间的耦合。除此之外还研究了模场面积、弯曲半径对光纤性能的影响,结果表明,该双包层PCF具有较小的弯曲损耗以及较大的有效模场面积,其优良的综合性能在低能耗、大容量传输空分复用传输系统及传感领域具有较为广阔的应用前景。

1 基本原理

利用COMSOL Multiphysics软件对PCF进行模拟仿真。采用电磁波-频域物理场以及散射边界条件,在物理场求解方法方面,有限元法(FEM)把求解域离散成有限个互不重叠的单元,每个单元内选择一些合适的节点作为插值点,建立线性数理方程组(刚性矩阵),联立求解数值边界问题^[11],有限元法可与计算机相结合,对随意排列的不同形状的空气孔等复杂结构、材料光纤波导等建模和分析计算精密度高,更为适用。本文即采用有限元法对PCF数值分析,建立PCF的光学波动模型,进行偏微分方程的求解,从而实现真实物理环境的仿真实验。非线性系数 γ 则定义为

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} = \frac{2n_2}{\lambda r_{\text{eff}}^2} \quad (1)$$

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

式中: n_2 为非线性折射率系数,取 2.76×10^{-20} m²/W; r_{eff} 为有效模场半径; A_{eff} 为有效模场面积; \mathbf{E} 代表电场矢量; S 代表光纤横截面。

当光纤在 x 轴正方向上弯曲时,光纤横截面等效折射率分布为^[12]

$$n(x, y) = n_0(x, y) \sqrt{1 + 2x/R_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式中: $n_0(x, y)$ 为光纤初始折射率, $n(x, y)$ 为弯曲后光纤的折射率, R_{eff} 为引入光学校正因子后的等效弯曲半径, R 为光纤的弯曲半径, $R_{\text{eff}}=1.28R$ 。

光纤的损耗 δ (单位: dB/km)表达式为^[13]

$$\delta = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^9 \quad (4)$$

式中: $2\pi/\lambda$ 为真空中自由波数, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为模式有效折射率虚部, λ (单位: μm)为入射波长。

2 光纤结构与性能分析

本文设计的PCF横截面如图1所示,外包层直径 D 为125 μm。基底玻璃域材料为石英玻璃(SiO₂),外包层由

两层相邻的空气孔呈圆环状错位排列, 结构呈现为空气孔三角形晶格环形排列, 有利于实际预制棒的制备; 内包层由两层呈八边形排列的空气孔组成, 结构呈现为空气孔菱形晶格环形排列; 双包层的结构利于将光信号限制在纤芯中。纤芯由中心缺少的 24 个空气孔所形成的缺陷部分构成, 结构简单且呈现严格的对称性。PCF 结构参数 $M=d/L$, d 为空气孔直径, L 为空气孔间距, 如图 2 所示。本文通过调节参数 M 进行多次模拟, 从而确定基本结构。空气折射率为 1, 固定空气孔间距 l_1, l_2, l_3, l_4 分别为 $7.4, 7, 16.9, 9.77 \mu\text{m}$, 改变空气孔直径 d 的值, 得到不同结构参数 M 。考虑到材料色散对光纤色散参数的影响, 在使用 FEM 计算有效折射率时, 应用二阶 Sellmeier 方程^[14]拟合所用的石英 (SiO_2) 基底材料折射率, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下其基底玻璃折射率为 1.44。

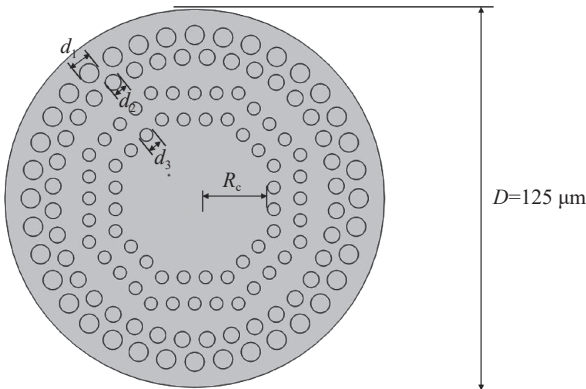


Fig. 1 Double-clad photonic crystal fiber structure
图 1 双包层光子晶体光纤结构

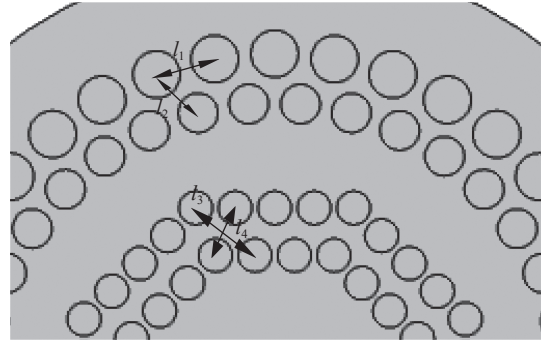


Fig. 2 Local structure of photonic crystal fiber
图 2 光子晶体光纤局部结构图

PCF 设计结构基底玻璃域材料为石英, 预制棒制备工艺选定溶胶-凝胶法, 该技术在 2002 年提出时应用至今已趋于成熟^[15], 为本文 PCF 结构后续的制备工艺提供了适用的方法。因本文提出的结构具有简单性、对称性等特点, 可极大地降低光纤预制棒拉制过程中复杂程度。在考虑到拉制过程中内包层空气孔易发生变形等情况发生, 本文结构采取从外包层向内包层的空气孔直径逐渐减小的方式进行设计, 此方法在一定程度上可以提高拉制工艺的成功率。

2.1 PCF 结构优化

固定空气孔间距 l_1 为 $7.4 \mu\text{m}$, 因空气孔设计时为旋转固定角度所得, l_2, l_3, l_4 均与 l_1 呈正相关, 随 l_1 变化而改变, 此时 l_2, l_3, l_4 分别为 $7, 16.9, 9.77 \mu\text{m}$ 。分别改变空气孔直径 d_1, d_2, d_3 的值, 其结构参数 $M=d/L$ 有相应变化, 图 3(a)、(b)、(c) 分别表示不同大小的 d_1, d_2, d_3 其功率值随光纤径向距离变化趋势。如图 3 所示, 距离光纤中心越近, 其模场功率值越大。在图 3(a) 中, 当 d_1 取 $4.7, 5.5, 6.2 \mu\text{m}$ 时, M 分别为 $0.64, 0.74, 0.84$, 此时 M 为 0.64 时功率最大。图 3(b) 中 d_2 取 $4.0, 4.7, 5.5 \mu\text{m}$ 时, M 分别为 $0.54, 0.64, 0.74$, 此时 M 为 0.54 时功率最大。图 3(c) 中 d_3 取 $2.9, 3.6, 4.4 \mu\text{m}$ 时, M 分别为 $0.39, 0.49, 0.59$, 此时 M 为 0.59 时功率最大。综合上述分析, 以及结构设计需要空气孔直径由外向内逐渐减小的趋势, 故选取 $d_1=5.5, d_2=4.7, d_3=3.6$ 作为本文基本结构进行后续性能分析。

2.2 光纤模式分析

Gloge 等^[16] 提出的标量近似法简化了光纤模场分布的复杂度, 其基础就是依靠线偏振模 LP_{mn} 。本质就是把线

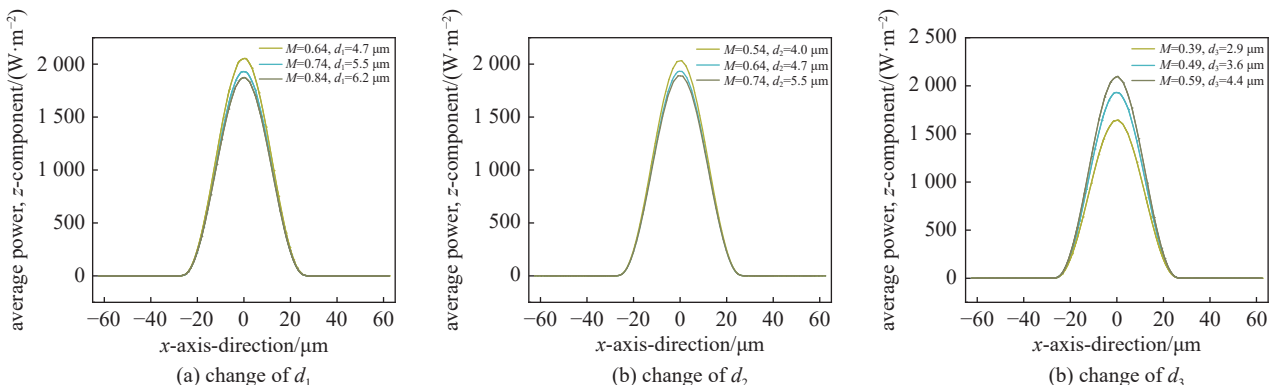


Fig. 3 Distribution of fiber mode field power along the radial axis of the fiber under different air hole diameters

图 3 不同空气孔直径下光纤模场功率随光纤径向轴线分布图

偏振模在直角坐标系下分解为相近纵向分量传播常数的矢量模叠加。通常把矢量模分为以下几类：横电模 (TE 模)、横磁模(TM 模)、混合模(HE 模或 EH 模)。并有以下结论： LP_{01} 模由 $HE_{1,n}$ 模组成； LP_{1n} 模由 TM_{0n} 、 TE_{0n} 、 $HE_{1,n}$ 模组成； LP_{mn} 模 ($m > 2$) 由 $HE_{m-1,n}$ 与 $HE_{m+1,n}$ 组成。基于该理论，研究人员普遍利用模式群复用技术去实现弱耦合空分复用的目的。将传播常数相近的简并态定义为一种模式群，每一模式群中加载一路信号，使得不同模式群之间的传播常数发生偏差，没有能量的交换，不容易产生耦合现象^[7]。本文设计的 PCF 模场如图 4 所示，共有 6 种 LP 模式包含 20 种矢量模，电场矢量的方向用红色箭头来表示。

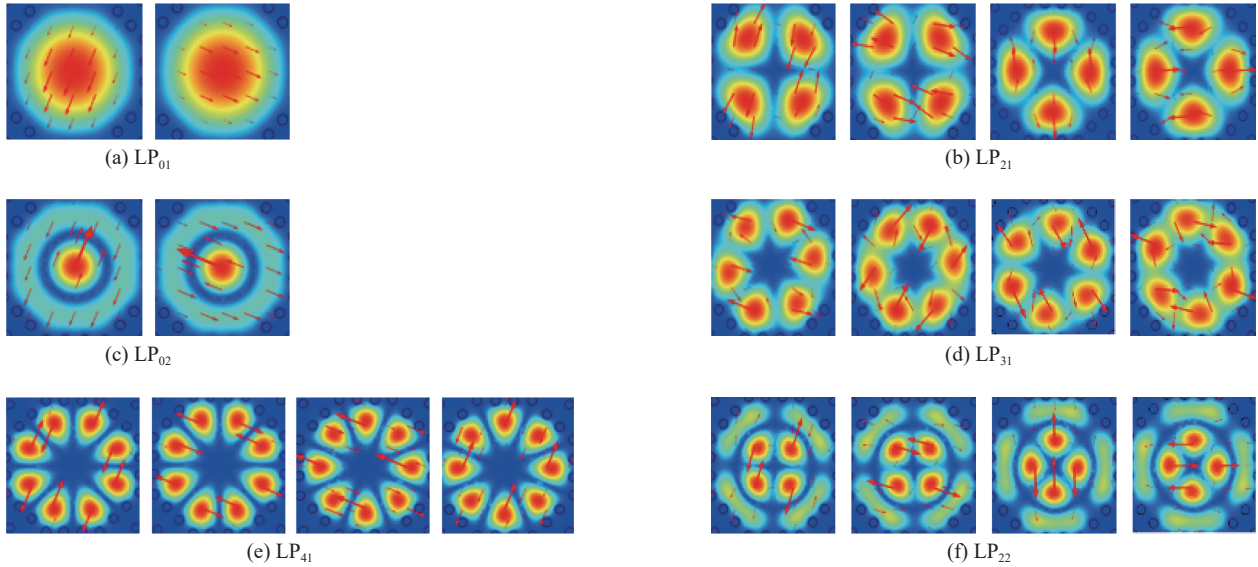


Fig. 4 Six LP modes of PCF and their electric field distributions

图 4 PCF 的 6 种 LP 模式及其矢量模电场分布图

纤芯半径与相对折射率差都会影响光纤模式的数量及模间最小折射率差 ($\min|\Delta n_{\text{eff}}|$)。并且一般情况下纤芯半径越大，模式间折射率差越大，模间串扰越小。为了研究 PCF 的模式耦合，仿真模拟了 6 个模式的功率沿模场径向轴线分布情况，并列出了各模式的功率模场分布。从图 5 中可以看出有两个模式 LP_{01} 、 LP_{02} 功率分布最大区域在纤

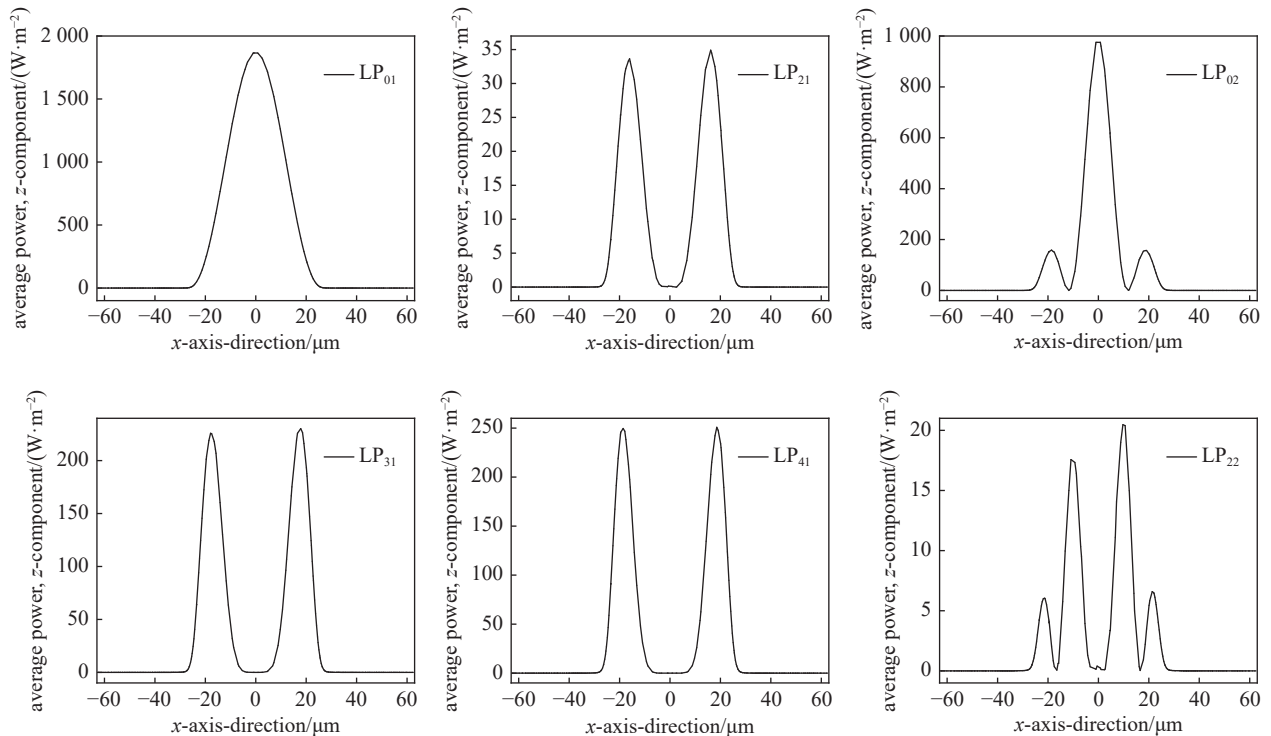


Fig. 5 Power distribution of six linear polarization modes along radial axis of core radius

图 5 6 个线偏振模式功率随纤芯半径径向轴线分布图

芯中心位置, 剩余几个模式功率分布的最大区域在离纤芯非常近的区域, 这表明改变 LP_{01} 、 LP_{02} 的 n_{eff} 对其他模式的 n_{eff} 没有太大影响。

根据模式耦合理论^[18], 不同模式间的折射率差 Δn_{eff} 与耦合的强弱呈反比, 即可通过增大模式间有效折射率差 Δn_{eff} 使其变为弱耦合, 提高抗串扰能力。根据木桶原理, 光纤的弱耦合特性受限于最小的 Δn_{eff} , 即 $\min|\Delta n_{\text{eff}}|$ 。通过设计 PCF 结构使最小有效折射率差 $\min|\Delta n_{\text{eff}}|$ 最大化, 便可减少模式间的串扰问题。

大量实验研究表明, 少模光纤中两个模式间最小折射率差大于 10^{-4} 时, 即可认为两种模式间的串扰可忽略^[19-20], 图 6(a) 为在 $1.55 \mu\text{m}$ 下, 有效折射率 n_{eff} 随纤芯半径 R_c 变化的曲线, 不难看出, 基模的有效折射率比高阶模普遍大一些, 且各模式有效折射率在纤芯半径为 $19.5 \sim 20.5 \mu\text{m}$ 范围内都随纤芯径向距离增大而增大。而图 6(b) 有效折射率差 Δn_{eff} 显示出如下规律: LP_{21} 与 LP_{02} 的有效折射率差为几个模式间差值的最小值, 可以得到模式间 $\min|\Delta n_{\text{eff}}| = 1.12 \times 10^{-4}$ 。满足弱耦合光纤的条件, 即最小折射率差 $\min|\Delta n_{\text{eff}}| > 10^{-4}$, 表明本文所设计 PCF 可实现稳定的六模传输, 与预期的目标相符。

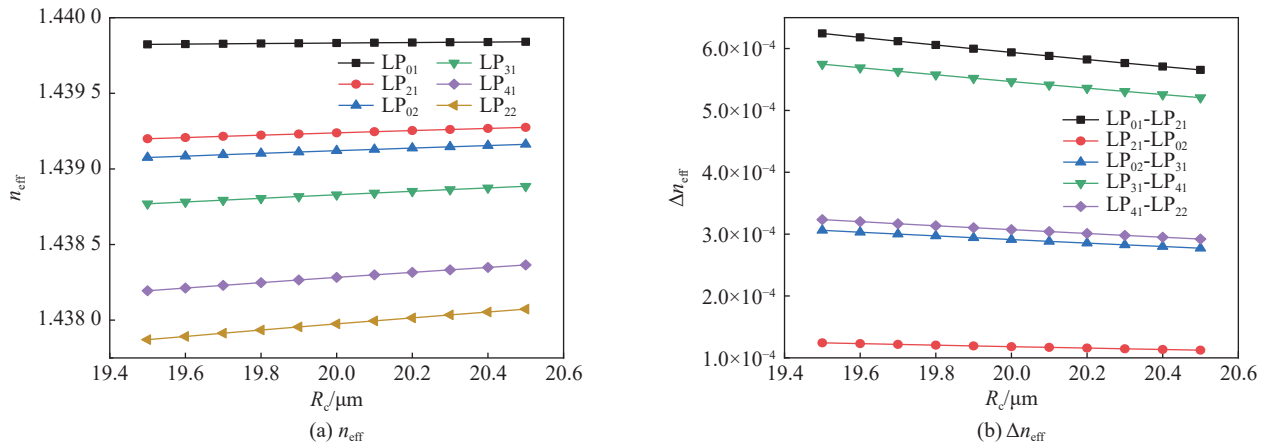


Fig. 6 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, n_{eff} and Δn_{eff} change with core radius R_c

图 6 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 处有效折射率与折射率差随纤芯半径 R_c 变化

2.3 有效模场面积

基模的模场面积反映了光纤横截面上光场横向分布的情况。光纤容量的大小受到非线性效应的限制。抑制非线性效应的影响, 最行之有效的方法是增大模场面积, 使光纤提升非线性效应的功率阈值, 降低功率密度过大对光纤产生的损耗, 使得光纤传输容量得到提升。模场面积大小与非线性系数有密切关系, 通常在稳定功率下, 模场面积越大, 非线性系数越低。本文结合 COMSOL 模拟数据计算得 PCF 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段处有效模场面积与非线性系数随纤芯半径变化趋势如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出, 随着纤芯半径增加, 各模式有效模场面积呈现增大的趋势。而图 7(b) 中的非线性系数随纤芯半径 R_c 的增大呈现下降的趋势, 其走势与模场面积的趋势呈相反的关系, 这更印证了模场面积与非线性之间呈反比的关系。当光纤直径达到 $19.5 \mu\text{m}$ 时, 基模 LP_{01} 有效模场面积达到了 $1040 \mu\text{m}^2$,

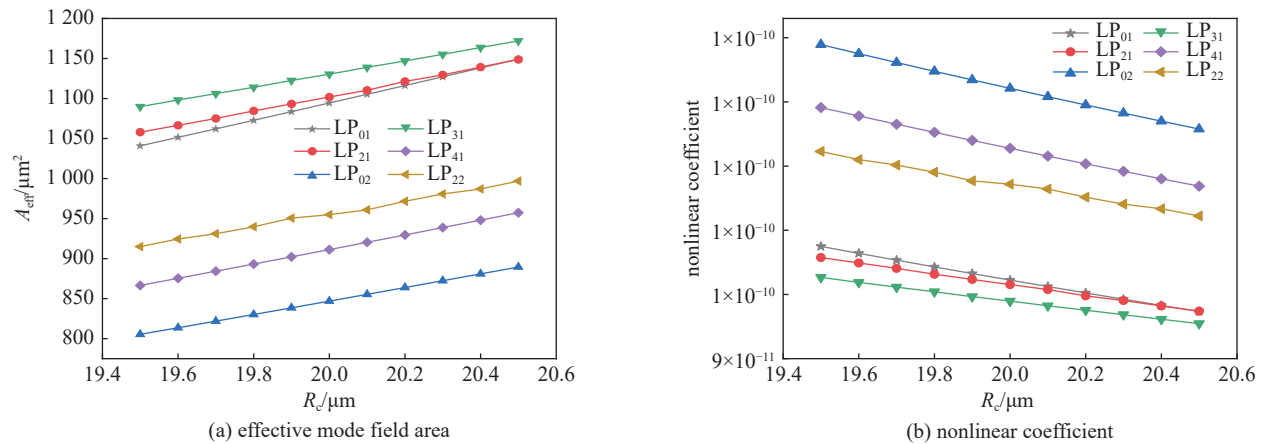


Fig. 7 Trend chart of effective mode field area and nonlinear coefficient of six modes changing with core radius R_c

图 7 6 种模式有效模场面积与非线性系数随纤芯半径 R_c 变化趋势图

相应的非线性系数低至 1.07×10^{-10} 。证明了本文中所设计的结构是一种具有大模场面积、低非线性的优质 PCF。

2.4 光纤弯曲损耗

光纤在使用时,会不可避免的产生弯曲形变,会引起光纤内部的光子能量泄露产生损耗,光纤横截面折射率产生变化,从而导致模场发生形变,功率不能集中在纤芯,致使无法正常传输。此时部分模式不满足全反射原理,从而产生光波泄露,利用 COMSOL 软件对本文结构进行弯曲状态下模拟,如图 8 所示,电场矢量的方向用白色箭头表示。

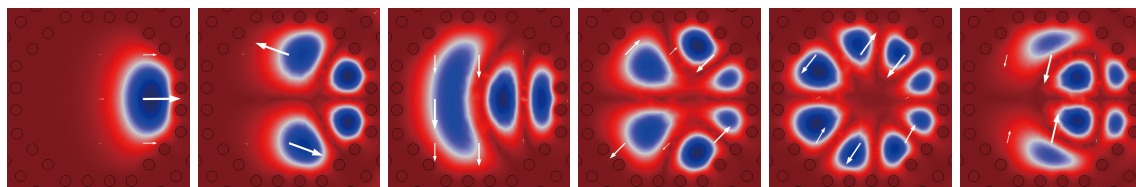


Fig. 8 Mode fields of six linearly polarized modes in bend fiber

图 8 弯曲光纤 6 个线偏振模式模场图

弯曲损耗作为弯曲 PCF 特性之一,是影响 PCF 功率的最重要因素。因此,弯曲特性也是研究的重点。根据光纤模式传输理论,当传输中损耗大于 1 dB/m 时,此模式截止^[21];模式折射率 n_{eff} 满足 $n_{\text{clad}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{core}}$ 时,可达到模式传输条件,低于包层折射率 n_{clad} 时,光波不能在光纤中传输^[22]。从式(4)中可知弯曲损耗与折射率虚部呈正相关关系。可通过与弯曲半径之间的关系变化确定弯曲损耗最少的弯曲半径。

弯曲半径越小,体现在 PCF 上为曲率变大,弯曲程度越大。弯曲特性便可通过弯曲半径变化趋势来表示。图 9 为弯曲半径逐渐扩大过程中,弯曲光纤 6 种模式弯曲损耗所呈现的变化趋势。可以看出,当弯曲半径增大过程中,弯曲损耗呈下降趋势。且通常情况下高阶模式的损耗要比低阶模式损耗大。当弯曲半径分别达到 5.5 、 9.5 mm 附近时, LP_{01} 、 LP_{22} 模式损耗各有一个明显的增大起伏,各损耗的峰值为 6.95×10^{-5} 、 $8.0 \times 10^{-5} \text{ dB/km}$,6 个模式在 38 mm 附近处回落至低点,各模式最高损耗降至 $5.65 \times 10^{-8} \text{ dB/km}$,可以忽略不计。表明在弯曲半径大于 38 mm 时,其弯曲特性呈现出优质 PCF 抗弯曲的能力,进而说明本文设计的 PCF 抑制模间串扰能力明显提升。

2.5 工作波段分析

大量实验模拟表明,工作波段也会对弱耦合光纤的串扰问题有一定影响^[23],对此研究了光纤的串扰损耗^[24]在波长不同的情况下所呈现的变化趋势,如图 10 所示。光纤的 6 种模式在不同波长下都呈现出起伏的趋势,高阶模串扰损耗比低阶模的要更明显,起伏更大。随着波长增大起伏越明显,代表对模间串扰限制能力越弱。在图 10 中,6 种模式在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,损耗分别为 2.57×10^{-9} 、 6.51×10^{-9} 、 1.49×10^{-8} 、 3.28×10^{-8} 、 4.9×10^{-8} 、 $6.9 \times 10^{-4} \text{ dB/km}$ 。在 C+L 波段范围内,其串扰损耗都限制在 10^{-4} 量级范围内,可以实现 6 模稳定传输。

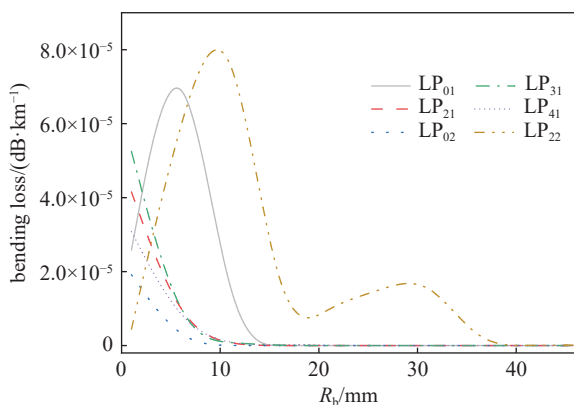


Fig. 9 Variation of bending loss with bending radius R_b

图 9 弯曲损耗随弯曲半径 R_b 的变化图

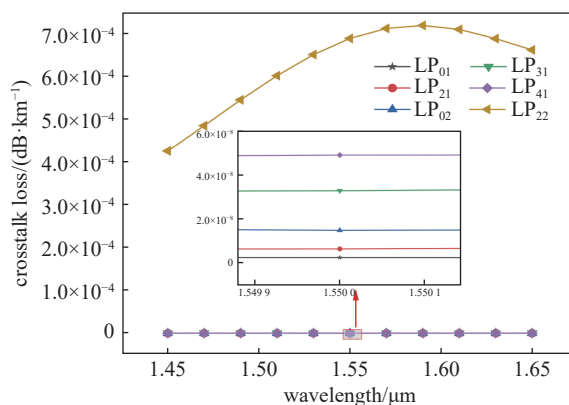


Fig. 10 Crosstalk loss trend of six modes with wavelength

图 10 6 种模式串扰损耗随波长变化趋势图

3 结论

本文设计了一种可支持 6 种模式、20 个简并偏振模式的低串扰、大模场面积、抗弯曲光纤结构——弱耦合少模双包层光子晶体光纤。外包层设置为呈圆环状交错排列的两层空气孔,内包层为八边形排列的空气孔。本文通过 COMSOL 进行仿真实验,模拟并获得模场功率分布规律及相关数据,计算并分析了各模式的模场性能。其中,

$\min|\Delta n_{\text{eff}}|$ 差达到 1.12×10^{-4} , 满足弱耦合少模光纤的条件。较大的模场面积 ($R_c=19.5 \mu\text{m}$ 时 $A_{\text{eff}}=1040 \mu\text{m}^2$) 以及较低的非线性系数 (1.07×10^{-10}), 表明本文所设计的 PCF 能有效减少传输中的非线性效应积累速度, 提高系统的传输距离和性能。同时, 工作波段位于 C+L 波段的串扰损耗限制在 $10^{-9} \sim 10^{-4}$ dB/km 量级范围内, 各模式在弯曲半径为 38 mm 附近处的损耗降至 10^{-8} 量级, 表明该结构能同时稳定传输 6 个模式, 并大大提高了抗弯曲损耗能力。上述研究表明, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下, 本文设计的弱耦合少模双包层光子晶体光纤, 在 C+L 波段的光纤传感、光纤通信以及短距离空分复用传输中有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] Velázquez-Benítez A M, Alvarado-Zacarias J C, Lopez-Galmiche G, et al. Six spatial modes photonic lanterns[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. 2015: W3B. 3.
- [3] Gross S, Riesen N, Love J D, et al. Three-dimensional ultra-broadband integrated tapered mode multiplexers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(5): L81-L85.
- [4] Benyahya K, Simonneau C, Ghazisaeidi A, et al. Multiterabit transmission over OM2 multimode fiber with wavelength and mode group multiplexing and direct detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 355-360.
- [5] Liu Huiyuan, Wen He, Zacarias J C A, et al. Demonstration of stable 3×10 Gb/s mode group-multiplexed transmission over a 20 km few-mode fiber[C]//Proceedings of 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition. 2018: 1-3.
- [6] 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.
- [7] Soma D, Wakayama Y, Beppu S, et al. 10.16-peta-B/s dense SDM/WDM transmission over 6-mode 19-core fiber across the C+L band[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(6): 1362-1368.
- [8] 李巨浩, 葛大伟, 高宇洋, 等. 基于弱耦合少模光纤的模分复用技术进展 (特邀)[J]. *光通信研究*, 2018(6): 31-37. (Li Juhao, Ge Dawei, Gao Yuyang, et al. Recent progress in mode division multiplexing techniques based on weakly-coupled few-mode fiber[J]. *Study on Optical Communications*, 2018(6): 31-37)
- [9] 张金玉, 任芳, 张艺赢, 等. 面向传感应用的弱耦合偏芯少模光纤设计与分析[J]. *光学学报*, 2020, 40: 2406001. (Zhang Jinyu, Ren Fang, Zhang Yiying, et al. Design and analysis of weakly-coupled eccentric-core few-mode fiber for sensing application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40: 2406001)
- [10] 雷晓, 任芳, 张艺赢, 等. 面向模分复用的沟槽-纳米孔辅助双包层弱耦合少模光纤[J]. *光学学报*, 2021, 41: 2306003. (Lei Xiao, Ren Fang, Zhang Yiying, et al. Trench-nanopore assisted double-clad weakly coupled few-mode fiber for mode division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41: 2306003)
- [11] 许鹏飞, 宋向阳, 周德春, 等. 铋酸盐玻璃高双折射大负色散微结构光纤设计[J]. *中国激光*, 2021, 48: 2406002. (Xu Pengfei, Song Xiangyang, Zhou Dechun, et al. Bismuthate glass microstructure fiber with high birefringence and large negative dispersion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 2406002)
- [12] Zheng Siwen, Ren Guobin, Lin Zhen, et al. A novel four-air-hole multicore dual-mode large-mode-area fiber: proposal and design[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(5): 419-427.
- [13] Sharma M, Dixit V, Konar S, et al. Endlessly single-mode photonic crystal fiber with high birefringence for sensing applications[J]. *Modern Physics Letters B*, 2020, 34: 2050077.
- [14] Yang S H, Jung E M, Han S K. Indoor location estimation based on LED visible light communication using multiple optical receivers[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(9): 1834-1837.
- [15] 李锦豪, 姜海明, 谢康. 光子晶体光纤制备工艺的发展与现状[J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(26): 105-110,114. (Li Jinhao, Jiang Haiming, Xie Kang. Development and situation of preparation process of photonic crystal fiber[J]. *Technology Innovation and Application*, 2021, 11(26): 105-110,114)
- [16] Gloge D. Weakly guiding fibers[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(10): 2252-2258.
- [17] Ren Fang, Li Juhao, Hu Tao, et al. Cascaded mode-division-multiplexing and time-division-multiplexing passive optical network based on low mode-crosstalk FMF and mode MUX/DEMUX[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7: 7903509.
- [18] Olshansky R. Mode coupling effects in graded-index optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(4): 935-945.
- [19] Riesen N, Love J D, Arkwright J W. Few-mode elliptical-core fiber data transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 24(5): 344-346.
- [20] Rahman M S, Haque M, Kim K D. High precision indoor positioning using lighting LED and image sensor[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Computer and Information Technology. 2011: 309-314.
- [21] Haxha S, Ademgil H. Novel design of photonic crystal fibres with low confinement losses, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(2): 278-286.
- [22] Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 961-963.
- [23] 马丽伶, 李曙光, 李建设, 等. 一种具有低串扰抗弯曲的单沟槽十九芯单模异质光纤[J]. *物理学报*, 2022, 71: 104206. (Ma Liling, Li Shuguang, Li Jianshe, et al. A kind of single trench 19-core single-mode heterogeneous fiber with low crosstalk and anti-bending performance[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71: 104206)
- [24] 郑斯文, 刘亚卓, 罗晓玲, 等. 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[J]. *物理学报*, 2021, 70: 224214. (Zheng Siwen, Liu Yazhuo, Luo Xiaoling, et al. Application and analysis of three-layer-core structure in single-mode large-mode-area fiber with low bending loss[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 224214)