

异质螺旋包层大模场光纤模式传输特性研究

沈骁¹, 李婴婴¹, 杨涛^{2*}, 郑加金¹, 张祖兴¹, 韦玮¹¹南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;²南京邮电大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出了一种面向 2.0 μm 的新型异质螺旋包层结构的大模场单模光纤, 基于坐标变换理论, 采用有限元仿真技术, 建立了三维螺旋光纤的二维仿真模型, 分析了光纤的模式传输特性, 得到了优化的光纤参数, 使得基模传输损耗小于 0.1 dB/m, 高阶模传输损耗大于 10.0 dB/m, 单模芯径达 66 μm , 模场面积约为 2360 μm^2 。当光纤弯曲时, 螺旋狭缝宽度值减小到 9 μm 附近。螺距增加到 26 mm、光纤弯曲半径最小为 33 cm 时, 基模传输损耗为 0.10 dB/m, 高阶模传输损耗大于 10.08 dB/m。所提出的螺旋结构大模场光纤的螺距较长, 属于全固态结构, 参数之间可相互协调, 有利于光纤的制备和使用, 模式分辨本领达到大模场单模光纤相关要求, 有望在高功率光纤激光器中获得良好的应用。

关键词 光纤光学; 大模场光纤; 模式传输特性; 弯曲损耗特性

中图分类号 TN252

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2006005

Mode Transmission Characteristics of Heterogeneous Helical Cladding Large Mode Area Fiber

Shen Xiao¹, Li Yingying¹, Yang Tao^{2*}, Zheng Jiajin¹, Zhang Zuxing¹, Wei Wei¹¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;²College of Materials Science & Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract A novel type of large mode area single mode fiber with heterogeneous helical cladding is proposed for 2.0 μm . Based on the coordinate transformation theory and the finite element simulation technology, a two-dimensional simulation model for a three-dimensional helical fiber is established, the mode transmission characteristics of the fiber are analyzed, and the expected conclusions and optimized optical fiber parameters are obtained. The transmission loss of the fundamental mode is less than 0.1 dB/m, the transmission loss of high-order mode is more than 10.0 dB/m, the largest single-mode core diameter is up to 66 μm , and the mode field area is about 2360 μm^2 . When the fiber is bent, the helical slit width is reduced to about 9 μm . When the helix pitch Λ is increased to 26 mm and the minimum bending radius is 33 cm, the transmission loss of fundamental mode is 0.10 dB/m, and the transmission loss of high-order mode is greater than 10.08 dB/m. The proposed fiber has a long helix pitch and all-solid-state structure, parameters can be coordinated with each other, so it is conducive to preparation and use of optical fibers. The mode discrimination ability meets the requirements of large mode area single mode fiber. It is expected to be well applied in high power fiber lasers.

Key words fiber optics; large mode area fibers; mode transmission characteristics; bending loss characteristics

1 引言

光纤激光器由于具有结构简单、光束质量好、散热快、转换效率高、稳定性好等优点, 在医学、军事和工业等领域得到广泛应用^[1-6]。随着光纤激光器功率的不

断提高, 光纤中的非线性效应和光纤端面损伤等问题日趋严重。大模场光纤可以有效降低纤芯功率密度、减弱非线性效应, 从而使光纤的输出功率进一步提高^[7-8]。但光纤模场面积增加后, 会产生更多的高阶模式^[9], 导致光纤输出的光束质量变差, 因此需要通过特

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-05-01; 录用日期: 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62075099, 62074082)、企业横向课题(2021外 305, 2021外 398)

通信作者: iamtyang@njupt.edu.cn

殊设计手段来抑制高阶模的传输,提高光纤的输出光束质量。目前大模场单模光纤主要有如下几种结构:光子晶体光纤^[10-11]、泄漏通道光纤^[12]、手性耦合光纤^[13]、布拉格光纤^[14]、增益引导-反折射率引导光纤^[15]、瓣状包层光纤^[16]、螺旋芯光纤^[17]、光子带隙光纤^[18]等。但部分光纤的结构复杂、制作难度大,一直无法得到广泛应用。本文提出了一种面向 2.0 μm 的异质螺旋包层结构的大模场光纤,其采用全固态结构,螺旋周期较长,制备相对简单,具有良好的模式分辨本领,在高功率光纤激光器领域中有广阔的应用前景。

2 光纤结构设计

异质螺旋包层结构光纤如图 1 所示,图 1(a)、(b)分别为光纤的横截面示意图和三维(3D)透视图。异质螺旋包层结构光纤的纤芯折射率为 n_0 ,半径为 r 。纤

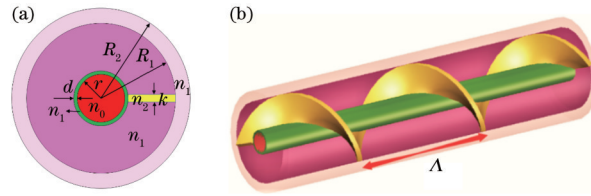


图 1 光纤横截面示意图和光纤三维透视图。(a)光纤横截面示意图;(b)光纤三维透视图

Fig. 1 Cross section of fiber and 3D perspective diagram of fiber. (a) Cross section of fiber; (b) 3D perspective diagram of fiber

3 光纤仿真实论

3.1 坐标变换理论

模拟螺旋的光波导需要建立三维模型,但这需要大量的计算。为了简化数值模型,对螺旋结构光波导进行坐标转换,使其转换为二维模型。构建一个螺旋坐标系 $(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3)$,其与笛卡儿坐标系 (X, Y, Z) 的关系^[19-20]为

$$J_h(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) = \frac{\partial(X, Y, Z)}{\partial(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3)} = \begin{bmatrix} \cos(\beta\zeta_3) & \sin(\beta\zeta_3) & \beta\zeta_2 \cos(\beta\zeta_3) - \beta\zeta_1 \sin(\beta\zeta_3) \\ -\sin(\beta\zeta_3) & \cos(\beta\zeta_3) & -\beta\zeta_1 \cos(\beta\zeta_3) - \beta\zeta_2 \sin(\beta\zeta_3) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

从式(3)可以看出,该坐标系依赖于 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ 三个变量,令变换矩阵 T_h 为

$$T_h(\zeta_1, \zeta_2) = \frac{J_h^T J_h}{\det(J_h)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta\zeta_2 \\ 0 & 1 & \beta\zeta_1 \\ \beta\zeta_2 & -\beta\zeta_1 & 1 + \beta^2(\zeta_1^2 + \zeta_2^2) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $\det(J_h)$ 表示行列式。

等效介电常数 ϵ_h 和磁导率 μ_h 与原始的介电常数 ϵ 和磁导率 μ 的关系为 $\epsilon_h = \epsilon T_h^{-1}$, $\mu_h = \mu T_h^{-1}$ 。据此,可以用二维模型来模拟三维螺旋光纤。

3.2 光纤传输损耗及弯曲损耗

传输损耗是光纤的重要性能指标,本文中 LP_{01} 、

芯外层为一个圆形隔离环,其厚度为 d ,折射率为 n_1 。隔离环的存在避免纤芯与狭缝直接接触,且避免出射光斑变形。环外为内包层,折射率为 n_1 ,半径为 R_1 ;内包层中设置一个折射率为 n_2 的狭缝,狭缝宽度为 k 。最外层为外包层,其折射率为 n_1 ,半径为 R_2 。光纤通过螺旋拉制实现狭缝在纤芯外螺旋环绕,螺距为 Λ 。折射率 n_0, n_1, n_2 的关系为

$$n_1 < n_0 \leq n_2. \quad (1)$$

由于 $n_2 \geq n_0$,纤芯中的光信号将透过隔离环耦合进入狭缝中,在螺旋狭缝的调制下,高阶模的损耗大,基模的损耗小,通过合理设置光纤参数,可以使光纤有效抑制高阶模,从而保持光纤单模运转。本文采用基于 Comsol 软件的有限元仿真技术,网格划分为极细化,边界条件采用完美匹配层结构。

$$\begin{cases} X = \zeta_1 \cos(\beta\zeta_3) + \zeta_2 \sin(\beta\zeta_3) \\ Y = -\zeta_1 \sin(\beta\zeta_3) + \zeta_2 \cos(\beta\zeta_3), \\ Z = \zeta_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 为螺旋光纤的扭率, $\beta = 2\pi/\Lambda > 0$ 是左旋螺旋环绕。式(2)表示了两个坐标系的映射,这个坐标系由变换的雅可比矩阵表征^[21]:

LP_{11} 、 LP_{21} 模式的传输损耗分别用 L_{01} 、 L_{11} 、 L_{21} 表示。传输损耗系数^[22]可以表示为

$$L = \frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (5)$$

式中: n_{eff} 为模式的有效折射率; $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示 n_{eff} 的虚部。 L 的单位为 dB/m。

光纤的弯曲损耗系数可以表示为

$$n' = n(1 + x/\rho R), \quad (6)$$

式中: n 为光纤材料的原始折射率; n' 为弯曲光纤的等效折射率; ρ 为光弹系数,石英材料的光弹系数为 1.25; R 代表弯曲半径; x 表示光纤弯曲方向。

3.3 模场面积

模场面积^[23-24]是大模场光纤的重要指标,模场面

积的计算公式为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (7)$$

式中: $E(x, y)$ 为光的横向电场分量。

4 结果与讨论

4.1 不弯曲光纤的模式传输特性

1) 狭缝宽度对损耗的影响

图 2 为狭缝宽度变化与光纤传输损耗的关系。随着狭缝宽度的增大,基模与高阶模损耗都随之增大,这是由于随着狭缝宽度增加,耦合进狭缝的光信号增强,即损耗增大。同时,模式阶数越高,损耗也越大。本文定义模式分辨本领为高阶模损耗系数与基模损耗系数的比值,比值越高,模式分辨本领越强。学界对大模场单模光纤的要求是 高阶模损耗系数 大于等于 10 dB/m,基模损耗系数 小于等于 0.1 dB/m,从而可以保证光纤处于单模运转状态。图 2 中: $k=13 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模的损耗系数为 0.03 dB/m, LP_{11} 模的损耗系数为 11.16 dB/m, LP_{21} 模的损耗系数为 30.35 dB/m; $k=14 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模的损耗系数为 0.08 dB/m, LP_{11} 模的损耗系数为 15.28 dB/m, LP_{21} 模的损耗系数为 25.20 dB/m。因此,光纤的横模分辨本领达到了大模场单模光纤的相关要求^[25],可以有效地滤除高阶模。当 $k=12 \mu\text{m}$ 时,虽然 LP_{11} 模的损耗系数略小于 10 dB/m,但仍可有效滤除高阶模,因此,本文认为合理的狭缝宽度为 12~14 μm 。

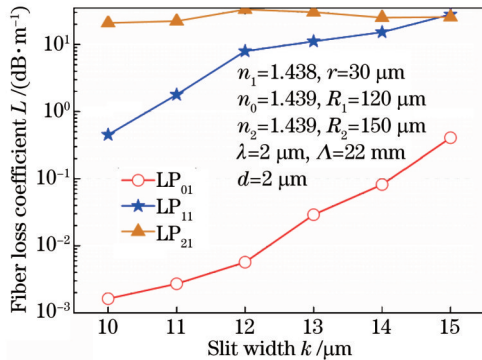


图 2 狭缝宽度变化对损耗的影响
Fig. 2 Effect of slit width on loss

2) 螺距对损耗的影响

螺距变化与光纤损耗的关系如图 3 所示,随着螺距的增大,模式损耗基本呈下降趋势。在 22 mm 处基模损耗小于 0.1 dB/m, LP_{11} 的损耗大于 10.0 dB/m,所以螺距在 22 mm 处最佳,当螺距为 23 mm 时,光纤仍有较好的模式分辨本领。该光纤的螺距相对较长,有利于光纤拉制。

3) 隔离环厚度对损耗的影响

参数设置如图 4 所示,由图可见,基模与高阶模的损耗随着隔离环厚度 d 的增加而减小,因为圆环越厚,

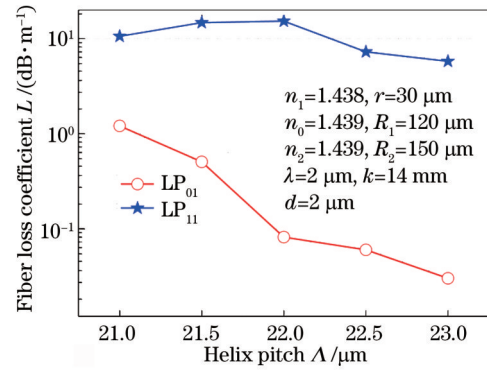


图 3 螺距变化对损耗的影响

Fig. 3 Effect of helix pitch on loss

越能阻止光的辐射,对光的束缚效果越好。在 $d=2 \mu\text{m}$ 条件下: $k=13 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模损耗系数为 0.047 dB/m, LP_{11} 模损耗系数为 11.16 dB/m; $k=14 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模损耗系数为 0.08 dB/m, LP_{11} 模损耗系数为 15.28 dB/m。在 $d=3 \mu\text{m}$ 条件下: $k=13 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模损耗系数为 0.039 dB/m, LP_{11} 模损耗系数为 9.2 dB/m; $k=14 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模损耗系数为 0.07 dB/m, LP_{11} 模损耗系数为 11.64 dB/m。以上数据均达到了最高模式分辨本领。当 $d=6 \mu\text{m}$ 时,光纤仍然具有较好的高阶模抑制能力,只是需要较长的光纤来实现。因此, d 值在 2~6 μm 范围内可变,而不受限于一个固定值,从而相对降低了光纤的制作难度。

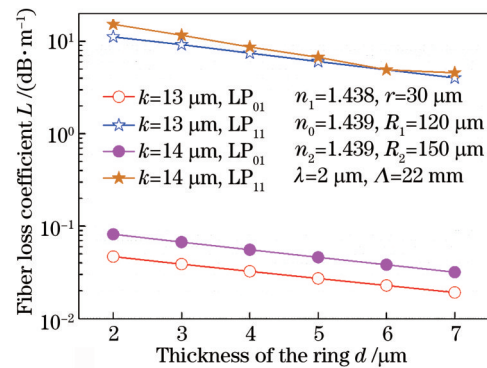


图 4 圆环厚度变化对损耗的影响

Fig. 4 Effect of ring thickness on loss

4) 纤芯半径对损耗的影响

图 5 显示了纤芯半径与光纤损耗、模场面积的关系。纤芯半径在 28~33 μm 范围内时,损耗呈下降趋势。在纤芯半径为 30 μm 时, LP_{01} 模损耗系数为 0.082 dB/m, LP_{11} 模损耗系数为 15.278 dB/m,高阶模被有效滤除,因此单模芯径达到了 60 μm 。但当 $r=33 \mu\text{m}$ 时, LP_{11} 模的损耗系数约为 5 dB/m,光纤仍然具有较强的 高阶模抑制能力,此时的模场面积约为 2360 μm^2 。

5) 纤芯折射率对损耗的影响

对折射率参数进行优化后,发现当 $n_0=n_2$ 时,光纤性能最优。如图 6 所示,随着 $n_0(n_2)$ 的增加,基模损耗

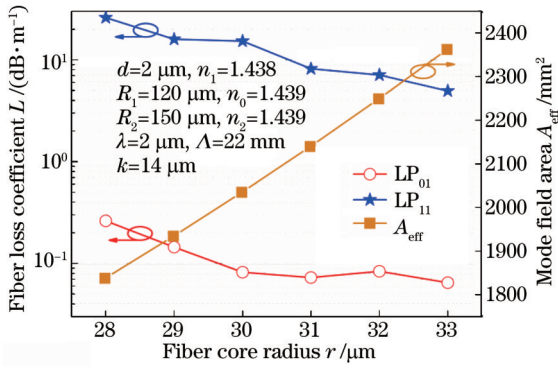


图 5 芯径变化对损耗、模场面积的影响

Fig. 5 Effect of fiber core radius on loss and mode field area

呈单调递减,当 $n_0=n_2=1.439$ 时, LP_{01} 模损耗系数为 0.08 dB/m, LP_{11} 模损耗系数为 15.28 dB/m, 光纤具有最佳性能。

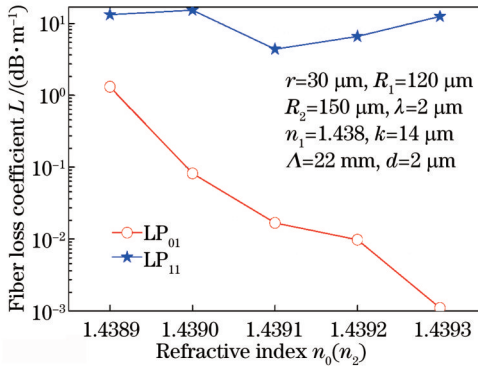


图 6 折射率 n_0 和 n_2 变化对损耗的影响

Fig. 6 Effects of refractive indexes n_0 and n_2 on loss

6) 波长对损耗的影响

图 7 为波长在 2 μm 附近变化时对光纤损耗的影响,由图可见,波长在 2.00~2.04 μm 范围内,基模损耗随波长的增加缓慢增大, LP_{01} 模损耗都稳定在 0.1 dB/m 附近, LP_{11} 模损耗均大于 10.0 dB/m, 因此光纤在 2.0 μm 波段处可以保持单模运转。

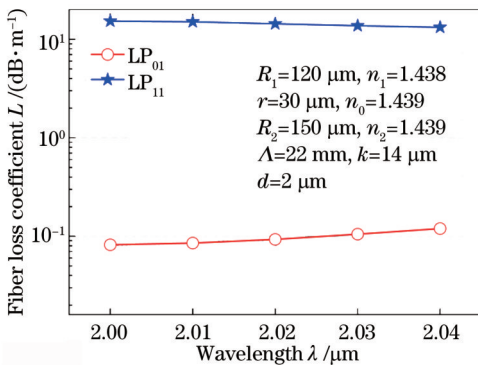


图 7 波长变化对损耗的影响

Fig. 7 Effect of wavelength variation on loss

4.2 光纤的弯曲特性

1) 狭缝宽度对弯曲损耗的影响

图 8 所示为弯曲损耗随狭缝宽度的变化关系。损

耗随着狭缝宽度 k 的增加而增加,相对于上述的不弯曲光纤,狭缝宽度需要减小,否则损耗太大,无法工作,同时螺距 Λ 需增加到 25.7 mm。当狭缝宽度为 9 μm、弯曲半径为 0.33 m 时, LP_{01} 模损耗系数为 0.10 dB/m, LP_{11} 模损耗系数为 10.08 dB/m, 光纤性能达到最优。如果在实际制备光纤时, k 值偏离 9 μm, 则可以通过改变弯曲半径来使性能达到要求。因此, 光纤对此参数也具有一定的适应性。

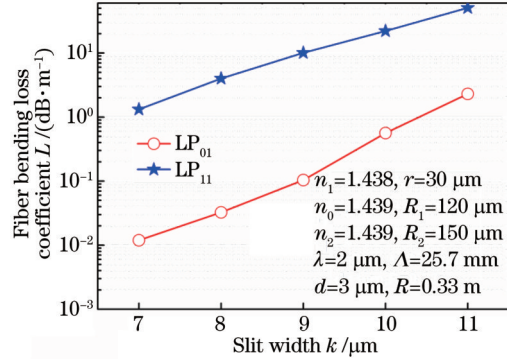


图 8 狭缝宽度对光纤弯曲损耗的影响

Fig. 8 Effect of slit width on bending loss

2) 螺距对弯曲损耗的影响

图 9 所示为螺距对光纤弯曲损耗的影响,随着螺距的增大, LP_{01} 模和 LP_{11} 模的损耗都随之减小, LP_{01} 模损耗系数约为 0.1 dB/m, LP_{11} 模损耗系数最小约为 7.75 dB/m, 可以保持光纤处于单模运转状态。在弯曲状态下,螺距可以增加至 26 mm。

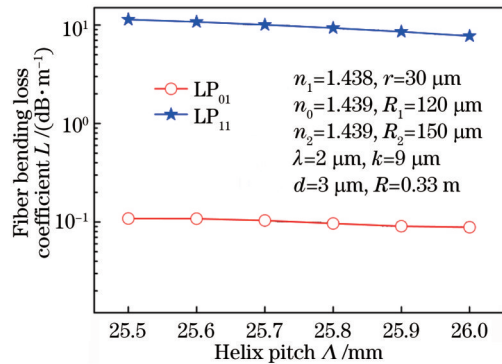


图 9 螺距对弯曲损耗的影响

Fig. 9 Effect of helix pitch on bending loss

3) 弯曲半径对弯曲损耗的影响

图 10 所示为光纤的弯曲半径与弯曲损耗的关系。随着光纤弯曲半径的增加,损耗减小,因为光纤的弯曲损耗系数与弯曲半径呈负相关。当弯曲半径在 0.31~0.35 m 范围内,光纤可以有效工作,弯曲半径为 0.33 m 时光纤性能最佳。

4) 纤芯半径对弯曲损耗的影响

纤芯半径对弯曲损耗的影响如图 11 所示,随着纤芯半径的增加, LP_{01} 模和 LP_{11} 模的损耗都随之减小。纤芯半径在 30 μm 处时, LP_{01} 模损耗系数约为

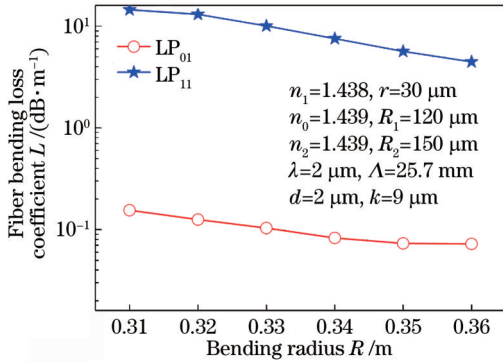


图 10 弯曲半径对弯曲损耗的影响

Fig. 10 Effect of bending radius on bending loss

0.10 dB/m, LP₁₁模损耗系数约为 10.08 dB/m,其可以有效地滤除高阶模,实现单模输出。

5) 圆环厚度对弯曲损耗的影响

图 12 所示为圆环厚度对弯曲损耗的影响。随着

圆环厚度 d 的增加, LP₀₁、LP₁₁ 和 LP₂₁ 三个模式的损耗均减小, 模式阶数越高, 损耗越大。 $d=3 \mu\text{m}$ 时, LP₀₁ 模损耗系数为 0.10 dB/m, LP₁₁ 模损耗系数为 10.07 dB/m, LP₂₁ 模损耗系数约为 74.5 dB/m。当 $d=7 \mu\text{m}$ 时, LP₀₁ 模损耗系数小于 0.1 dB/m, LP₁₁ 模的损耗系数仍有 6.7 dB/m, 此时光纤仍具有较好的高阶模抑制效果。

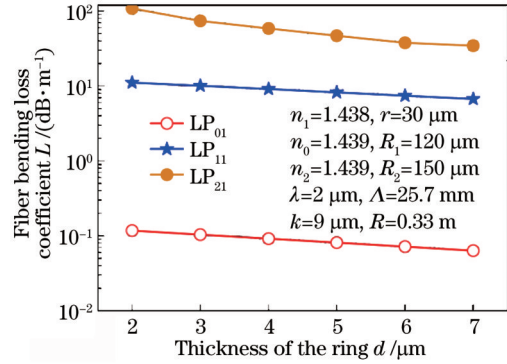


图 12 圆环厚度对光纤弯曲损耗的影响

Fig. 12 Effect of ring thickness on bending loss

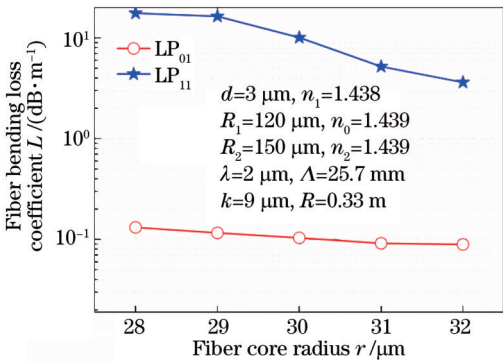


图 11 纤芯半径对弯曲损耗的影响

Fig. 11 Effect of fiber core radius on bending loss

4.3 光纤的输出电场图

图 13 为光纤输出电场图, 第一行为不弯曲光纤输出的 LP₀₁ 模、LP₁₁ 模、LP₂₁ 模以及其他高阶模电场图, LP₀₁ 模基本被束缚于纤芯中, 其他模式均有不同程度的光场耦合至包层中, 从而产生不同程度的损耗。第二行为输出光斑随光纤弯曲半径 R 的变化关系对比图, 弯曲半径越小, 光斑在纤芯里的侧移越明显, 变形越严重。

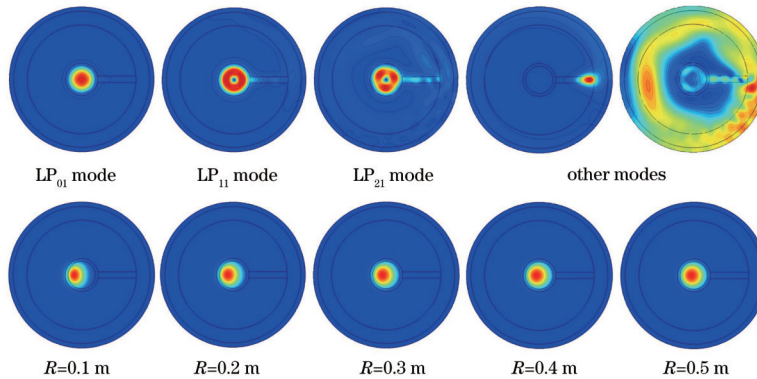


图 13 光纤输出电场图

Fig. 13 Output electric field diagrams of optical fiber

5 光纤的制备方法

光纤主要由纤芯(n_0)、包层(n_1)和狭缝(n_2)三部分组成, 制备光纤需要三种不同折射率的光纤玻璃材料。隔离环、内包层和外包层的折射率均为 n_1 , 可选取纯石英玻璃材料制备, 其在 $2.0 \mu\text{m}$ 处的折射率为 1.438。纤芯可采用掺铊石英玻璃材料制备, 铊离子发射波长约为 $2.0 \mu\text{m}$ 波段, 通过组分调节使得纤芯玻璃材料在

$2.0 \mu\text{m}$ 处的折射率 n_0 比包层的折射率 n_1 高 0.001; 狭缝通过掺锗石英玻璃材料制备, 通过玻璃材料组分调节使得其折射率与纤芯相等。采用管棒法制备光纤预制棒, 通过对玻璃材料进行精密机械加工, 得到光纤预制棒各组成模块, 组合成光纤预制棒后再进行螺旋拉丝, 通过调整拉丝速度控制光纤直径, 通过调整预制棒旋转速度控制光纤螺距。

6 结 论

本文提出了一种异质螺旋包层结构的大模场光纤,基于坐标变换理论,用二维仿真方法对三维螺旋光纤进行传输特性研究。当光纤不弯曲, $n_0=n_2=1.439$ 、 $n_1=1.438$ 、 r 为 $30\sim 33\ \mu\text{m}$ 、 $R_1=120\ \mu\text{m}$ 、 $R_2=150\ \mu\text{m}$ 、 d 为 $2\sim 6\ \mu\text{m}$ 、 k 为 $12\sim 14\ \mu\text{m}$ 、 Δ 为 $22\sim 23\ \text{mm}$ 、 λ 为 $2.00\sim 2.04\ \mu\text{m}$ 时,光纤具备较强的模式分辨本领,可以保持单模运转,单模芯径最高可达 $66\ \mu\text{m}$ 。当考虑光纤弯曲时,相关参数需要进一步优化,狭缝宽度 k 将减小到 $9\ \mu\text{m}$ 附近,螺距 Δ 可延长到 $26\ \text{mm}$,弯曲半径 R 最小为 $0.31\ \text{m}$,隔离环厚度 d 最大可达 $7\ \mu\text{m}$ 。该光纤可供调节参数众多,相互之间互相协调,使得光纤参数具备一定的适应范围,从而降低了光纤的精确制备要求。该光纤采用全固态结构,便于实际使用,有望在高功率光纤激光器中获得良好的应用。

参 考 文 献

- [1] 周朴,冷进勇,肖虎,等.高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J].中国激光,2021,48(20):2000001.
Zhou P, Leng J Y, Xiao H, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2000001.
- [2] 刘一州,乔文超,高空,等.高功率超快光纤激光技术发展研究[J].中国激光,2021,48(12):1201003.
Liu Y Z, Qiao W C, Gao K, et al. Development of high-power ultrafast fiber laser technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201003.
- [3] 陆瑶,姜宗福,刘文广,等. 3×1 光子灯笼实现 $30\ \mu\text{m}$ 纤芯光纤激光模式控制[J].光学学报,2021,41(17):1736001.
Lu Y, Jiang Z F, Liu W G, et al. Laser mode control in fiber with core diameter of $30\ \mu\text{m}$ based on 3×1 photonic lantern[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1736001.
- [4] 王世杰,蔡一鸣,张志伦,等.自研 $100\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 光纤实现 $1000\ \text{W}$ 纳秒脉冲激光输出[J].中国激光,2021,48(1):0115001.
Wang S J, Cai Y M, Zhang Z L, et al. $1000\ \text{W}$ nanosecond pulsed laser output based on homemade $100\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0115001.
- [5] 韩文国,延凤平,冯亭,等.高功率掺铥光纤激光器及其在生物组织切割中的应用[J].发光学报,2021,42(5):708-716.
Han W G, Yan F P, Feng T, et al. High-power thulium-doped fiber laser and its application in biological tissue cutting[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(5): 708-716.
- [6] 杨昌盛,岑旭,徐善辉,等.单频光纤激光器研究进展[J].光学学报,2021,41(1):0114002.
Yang C S, Cen X, Xu S H, et al. Research progress of single-frequency fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114002.
- [7] 李远,延凤平,刘硕,等.大模场掺铥光纤增益特性研究[J].激光技术,2018,42(5):638-645.
Li Y, Yan F P, Liu S, et al. Study on gain characteristics for large-mode-area thulium-doped fibers[J]. Laser Technology, 2018, 42(5): 638-645.
- [8] Pal M, Saitoh K, Paul M C, et al. Design and fabrication of large-mode area air-clad leakage channel fiber with superior bending characteristics[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(18): 1650-1652.
- [9] 赵楠,李进延.大模场面积光纤单模运转实现方法的研究进展[J].激光与光电子学进展,2015,52(3):0300002.
Zhao N, Li J Y. Progress of single mode propagation technology in large mode area fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 0300002.
- [10] Coscelli E, Molardi C, Cucinotta A, et al. Symmetry-free Tm-doped photonic crystal fiber with enhanced mode area[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 544-550.
- [11] Lu D K, Fang X H, Li X H, et al. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers with uniformly sized air holes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(2): 620-626.
- [12] Dong L, Peng X, Li J. Leakage channel optical fibers with large effective area[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(8): 1689-1697.
- [13] Ma X Q, Zhu C, Hu I N, et al. Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than $50\ \mu\text{m}$ diameter cores[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9206-9219.
- [14] Guo S P, Albin S, Rogowski R S. Comparative analysis of Bragg fibers[J]. Optics Express, 2004, 12(1): 198-207.
- [15] Siegman A E. Propagating modes in gain-guided optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, 2003, 20(8): 1617-1628.
- [16] Ma S S, Ning T G, Li J, et al. Detailed study of bending effects in large mode area segmented cladding fibers[J]. Applied Optics, 2016, 55(35): 9954-9960.
- [17] Wang P, Cooper L J, Williams R B, et al. Helical-core ytterbium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 2004, 40(21): 1325-1326.
- [18] Kuhlmeier B T, Eggleton B J, Wu D K C. Fluid-filled solid-core photonic bandgap fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(11): 1617-1630.
- [19] Napiorkowski M, Urbanczyk W. Rigorous simulations of a helical core fiber by the use of transformation optics formalism[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23108-23120.
- [20] Nicolet A, Zolla F, Guenneau S. Modelling of twisted optical waveguides with edge elements[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2004, 28(2): 153-157.
- [21] Nicolet A, Movchan A B, Guenneau S, et al. Asymptotic modelling of weakly twisted electrostatic problems[J]. Comptes Rendus Mécanique, 2006, 334(2): 91-97.
- [22] 吕欢祝,余明芯,钟文博,等.大模场低损耗光子晶体光纤的研究与设计[J].激光技术,2021,45(2):196-201.
Lü H Z, Yu M X, Zhong W B, et al. Research and design of large-mode area low loss photonic crystal fiber[J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 196-201.

- [23] 苗效方, 吴鹏, 赵保银. 梳状大模场光纤结构的优化设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 0918005.
Miao X F, Wu P, Zhao B Y. Optimum design for comb-index core fiber with large mode area[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(9): 0918005.
- [24] 陈瑰, 蒋作文, 彭景刚, 等. 空气包层大模场面积掺镱光子晶体光纤研究[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 144206.
Chen G, Jiang Z W, Peng J G, et al. Study of air-clad large-mode-area ytterbium doped photonic crystal fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(14): 144206.
- [25] Jain D, Sahu J K. Large mode area single trench fiber for 2 μm operation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3412-3417.