

一种大模场沟槽辅助型扇形瓣状光纤的研究

刘诗男¹, 宁提纲^{1*}, 马绍朔¹, 郑晶晶¹, 许建¹, 温晓东²

¹北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044;

²曲阜师范大学物理工程学院, 山东 曲阜 273165

摘要 设计了一种抗弯曲大模场面积单模光纤方案——沟槽辅助型瓣状光纤。纤芯中间加入了低折射率辅助沟槽, 纤芯四周围绕高折射率扇形瓣。利用 COMSOL 软件计算模式损耗、模场面积等性能。研究表明: 在弯曲半径为 15 cm 的情况下, 光纤模场面积可达 $700 \mu\text{m}^2$, 高阶模和基模损耗比大于 100, 能够实现有效单模操作。此外, 当弯曲方向在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围内变化时, 光纤性能保持稳定。这种光纤在紧凑型高功率光纤激光器和放大器领域显示出巨大的潜力。

关键词 光纤光学; 弯曲不敏感; 大模场面积; 少模光纤

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1206001

Trench-Assisted Fan-Segmented Cladding Fiber with Large Mode Area

Liu Shinan¹, Ning Tigang^{1*}, Ma Shaoshuo¹, Zheng Jingjing¹, Xu Jian¹, Wen Xiaodong²

¹Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University,

Beijing 100044, China;

²College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China

Abstract This study proposes a novel large mode area fiber structure with bend-resistant and single-mode operation, known as trench-assisted segmented cladding fiber. In this structure, a low refractive index (RI) trench is added to the fiber core and the core is surrounded periodically with high RI fan-segmented claddings. COMSOL software is used to calculate the mode leakage loss and mode area. Numerical analysis indicates that when the indicates bending radius of the fiber is 15 cm, the mode field area of the fiber can achieve $700 \mu\text{m}^2$. Meanwhile, the loss ratio between the high-order mode (HOM) and fundamental mode (FM) is >100 , which ensures effective single-mode operation. In addition, the fiber performance is stable within the bending orientation from -180° to 180° . Based on the results of this study, the proposed fiber has the potential to play an important role in developing high-power fiber lasers and amplifiers.

Key words fiber optics; bend insensitive; large mode area; few mode fiber

OCIS codes 060.2310; 060.2430; 140.3510

1 引 言

激光器具有光束质量好、亮度高及激光阈值低等优点, 在激光武器、医疗设备、材料加工、遥感技术、光纤通信以及国防科技等方面得到了广泛应用^[1-2]。其中光纤激光器具有转换效率高、稳定性好、相干性好和制造成本低等优点^[3], 成为了激光器领域的热门研究课题。近年来, 单根光纤激光器的输出功率已经突破千瓦量级^[4-7]。然而由于单模有

源纤芯芯径只有几微米, 单纯依靠单根光纤进一步提升激光器的输出功率会受到严重的非线性效应的影响, 以及结构元素、热损伤、光学损伤及衍射极限等物理机制方面的限制, 这些因素成为进一步提升光纤输出光功率的最大障碍。

由于非线性效应产生的阈值功率与光纤的有效模场面积成正比, 因此一种最有效地解决提升光纤功率密度面临的非线性效应、光纤损伤等问题的方法是使用大模场面积光纤。目前, 大模场面积光纤

收稿日期: 2018-05-31; 修回日期: 2018-07-20; 录用日期: 2018-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(61471033, 61525501)、山东省高等学校科技计划项目(J17KA089)

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

主要有布拉格光纤^[8-9]、光子晶体光纤^[10-11]、瓣状光纤^[12]和多芯光纤^[13]等。光子晶体光纤制作复杂且难以保证光纤的均匀性和可重复性。Rastogi 等^[14]报道了瓣状光纤。前期工作表明,瓣状光纤具有优异的弯曲性能,能够在宽带宽下提供低损耗有效的单模操作^[15]。Hooda 等^[16]制备了二氧化硅瓣状光纤。瓣状光纤可以采用管束堆积法制作,将高折射率材料和低折射率材料在玻璃管中周期性排列并紧密贴合,用合适的温度和拉丝速度,从预制棒中拉制出光纤^[17]。另外,瓣状光纤还可以采用复合纺丝法制作,利用双组分纺丝工艺,采用共轭纺丝法制成^[12]。Ma 等^[18]提出了一种扇形瓣状光纤,能够有效提高光纤的单模操作。

本文提出了一种新的大模场面积光纤结构。与传统的瓣状光纤相比,光纤纤芯中增加了低折射率沟槽,并且包层中为扇形瓣状纤芯。其基本制作流程为:先制作普通沟槽光纤预制棒,然后将预制棒切割,再与折射率不同的包层套管切块组合,制成光纤预制棒。这种沟槽辅助扇形瓣状光纤结构能够有效提高光纤的单模操作特性,具有大模场面积、强抗弯曲性能以及良好单模操作性能等优点。在 15 cm 弯曲半径下,可以保证光纤在模区(700 μm^2)内单模工作。由于该结构在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围内对弯曲取向不敏感,因此不需要控制弯曲取向。

2 大模场面积沟槽辅助型瓣状光纤

2.1 光纤结构及弯曲模型

大模场面积沟槽辅助型瓣状光纤,其横截面的结构如图1所示。中间黄色部分是半径为 a 、折

率为 n_1 的圆形纤芯,向外依次为宽度为 t 、折射率为 n_3 的低折射率沟槽(红色),厚度为 d 、折射率为 n_1 的高折射率谐振环。包层内环绕8个瓣角度为 θ 、折射率为 n_1 的扇形瓣,灰色部分是折射率为 n_2 的包层,光纤半径为 b 。 $\Delta n_1 = n_1 - n_2$, $\Delta n_2 = n_1 - n_3$, AA' 为参考的弯曲方向, φ 为实际弯曲方向与参考弯曲方向之间的夹角。

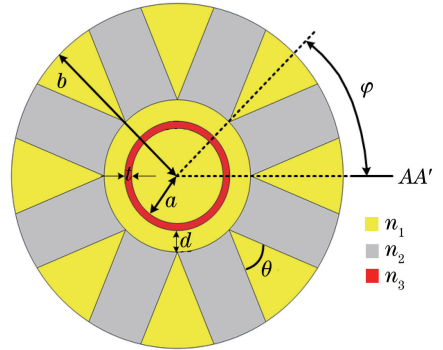


图1 沟槽辅助型瓣状光纤结构图
Fig. 1 Cross section of trench-assisted fan-segmented cladding fiber

由于光纤具有非圆对称结构,不同方向的弯曲对光纤的影响很大。光纤弯曲的立体示意图如图2所示,其中 R 为弯曲半径, BO 为实际弯曲方向,图中给出了实际弯曲方向 BO 与参考弯曲方向 AA' 之间的夹角 φ 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ 时的光纤截面。

2.2 基本原理

采用数值仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行建模和仿真,边界条件设置为完美匹配层(PML)吸收边界条件,求解域采用默认的任意三角形网格进行划分。

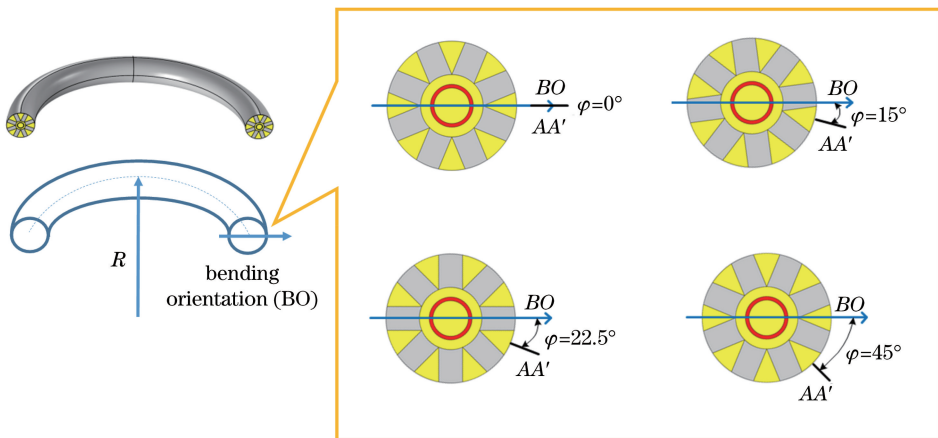


图2 光纤弯曲的立体示意图以及 $\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ 时的光纤截面

Fig. 2 Schematic of the bent fiber and the fiber cross sections corresponding to $\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$, respectively

2.2.1 模场直径

模场直径主要是由基模 LP₀₁ 的模场分布决定,是电磁场强度在光纤横截面上分布的一种度量。光纤的模场直径一般并不等于纤芯直径,因为光纤中并不是全部的光都由纤芯承载并局限于纤芯内传导,也有一部分光分布在包层中。模场直径的定义为在光纤中光场分布衰减到其最大值点 1/e 时对应的光斑直径^[19]。

采用 Petermann I 法^[20] 作为大模场面积单模瓣状光纤模场直径的计算公式。Petermann 提出,光纤模场直径可以用光纤中实际模场分布函数 $\varphi(x)$ 的二阶矩来定义

$$d_n = 2\sqrt{2} \left(\frac{\int_0^\infty \varphi(x)^3 r^3 dr}{\int_0^\infty \varphi(x)^2 r dr} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

由于实际研究中,用数值方法计算模场直径一般为二维平面,因此转换为直角坐标系下的计算公式为

$$d_n = 2\sqrt{2} \left(\frac{\iint_{\Omega} \varphi(x)^2 (x^2 + y^2) dx dy}{\iint_{\Omega} \varphi(x)^2 dx dy} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中: Ω 为光纤横截面积分区。

2.2.2 弯曲等效折射率

当光纤弯曲时,密度的变化使折射率发生改变,通过适当的数学变换,可以将弯曲光纤的折射率等效为

$$n' = n_{\text{material}} \exp\left(\frac{x}{R}\right) \approx n_{\text{material}} \left(1 + \frac{x}{R}\right). \quad (3)$$

式中: n_{material} 为直光纤的折射率, n' 为弯曲光纤的等效折射率。

2.2.3 弯曲损耗

弯曲损耗是评价信号劣化的主要手段之一,可将求解模式的弯曲损耗转化为求解弯曲光纤模式传播常量的虚部^[21],即

$$L = -\frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}). \quad (4)$$

定义损耗比(LR)为最小高阶模(HOM)损耗和基模(FM)损耗的比值。

3 仿真结果与分析

3.1 与普通扇形瓣状光纤对比

首先对比沟槽辅助扇形瓣状光纤和普通扇形瓣状光纤的性能。由于低折射率沟槽限制了基模的模

场区域,因此增大沟槽辅助扇形瓣状光纤的纤芯半径,同时比较两者的单模特性和模场面积。普通扇形瓣状光纤的参数为 $a = 18, 19, 20 \mu\text{m}$ 、 $b = 62.5 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $R = 0.15 \text{ m}$ 、 $n_2 = 1.444$ 、 $\Delta n_1 = 0.003$ 、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $\varphi = 0^\circ$ 。沟槽辅助扇形瓣状光纤的参数为 $a = 19, 20, 21 \mu\text{m}$ 、 $t = 4 \mu\text{m}$ 、 $d = 11 \mu\text{m}$ 、 $b = 62.5 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $R = 0.15 \text{ m}$ 、 $n_2 = 1.444$ 、 $\Delta n_1 = 0.003$ 、 $\Delta n_2 = 0.005$ 、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $\varphi = 0^\circ$ 。

表 1 给出了两种光纤的性能对比,对于 $a = 19 \mu\text{m}$ 的普通扇形瓣状光纤,基模损耗为 $0.82 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,最小高阶模损耗为 $14 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,此时的损耗比为 17,模场面积为 $701 \mu\text{m}^2$ 。对于 $a = 19 \mu\text{m}$ 的沟槽辅助扇形瓣状光纤,基模损耗为 $0.017 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,最小高阶模损耗为 $9.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,此时的损耗比为 526,模场面积为 $665 \mu\text{m}^2$ 。可以看出,当低折射率沟槽被添加到纤芯后,虽然损耗比增大,但是模场面积相应减小,沟槽辅助扇形瓣状光纤没有完全体现出优势。而当沟槽辅助扇形瓣状光纤的半径 $a = 20 \mu\text{m}$ 时,基模损耗为 $0.012 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,最小高阶模损耗为 $2.7 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,此时的损耗比为 217,模场面积为 $722 \mu\text{m}^2$ 。可以看出,在纤芯半径增大 $1 \mu\text{m}$ 时,沟槽辅助扇形瓣状光纤的模场面积大于普通扇形瓣状光纤的模场面积。此时,沟槽辅助扇形瓣状光纤的基模损耗明显减小,损耗比显著提高,优势明显。因此,沟槽辅助扇形瓣状光纤在模场面积增大的情况下,单模特性也得到显著改善。当模场面积相似时,沟槽辅助扇形瓣状光纤比传统扇形瓣状光纤具有更优秀的单模操作特性。

3.2 模式特性及弯曲半径对光纤特性的影响

假设 $a = 20 \mu\text{m}$ 、 $t = 4 \mu\text{m}$ 、 $d = 11 \mu\text{m}$ 、 $b = 62.5 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $R = 0.15 \text{ m}$ 、 $n_2 = 1.444$ 、 $\Delta n_1 = 0.003$ 、 $\Delta n_2 = 0.005$ 、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $\varphi = 0^\circ$,得到光纤中基模的模场特性,其模式分布如图 3 所示。光纤内包含 LP₀₁、LP_{11v}、LP_{11h}、LP₀₂、LP₂₁、LP₃₁ 模,其中下角标 v 和 h 分别表示垂直方向和水平方向。各个模式的弯曲损耗随弯曲半径 R 的变化如图 4 所示,可以看出,高阶模式里 LP₁₁ 模的损耗较低。当弯曲半径 $R = 15 \text{ cm}$ 时,基模损耗 LP₀₁ 为 $0.01 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。高阶模损耗为 $2.7 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,光纤具有良好的单模特性。模场面积和损耗比随弯曲半径 R 的变化如图 5 所示。当 $10 \text{ cm} < R < 80 \text{ cm}$ 时,光纤的模场面积大于 $700 \mu\text{m}^2$,损耗比大于 100,光纤具有良好的抗弯曲单模特性。

表 1 沟槽辅助扇形瓣状光纤和普通扇形瓣状光纤的性能对比^[18]

Table 1 Comparison between the trench-assisted fan-segmented cladding fiber and the general fan-segmented cladding fiber^[18]

Parameter	Value	
	Fan-segmented cladding fiber	Trench-assisted fan-segmented cladding fiber
Core radius $a / \mu\text{m}$	18,19,20	19,20,21
Index difference Δn_1	0.003	0.003
Index difference Δn_2	0	0.005
Trench width $t / \mu\text{m}$	0	4
Resonant ring thickness $d / \mu\text{m}$	0	11
Fan segment angle $\theta / (^\circ)$	45	45
Fiber radius $b / \mu\text{m}$	62.5	62.5
Mode area $/ \mu\text{m}^2$	645,701,758	665,722,780
FM loss $/ (\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	1.1,0.82,0.65	0.017,0.012,0.01
Lowest-HOMs loss $/ (\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	22,14,9.5	9.1,2.7,1.0
Loss ratio	20,17,14	526,217,100

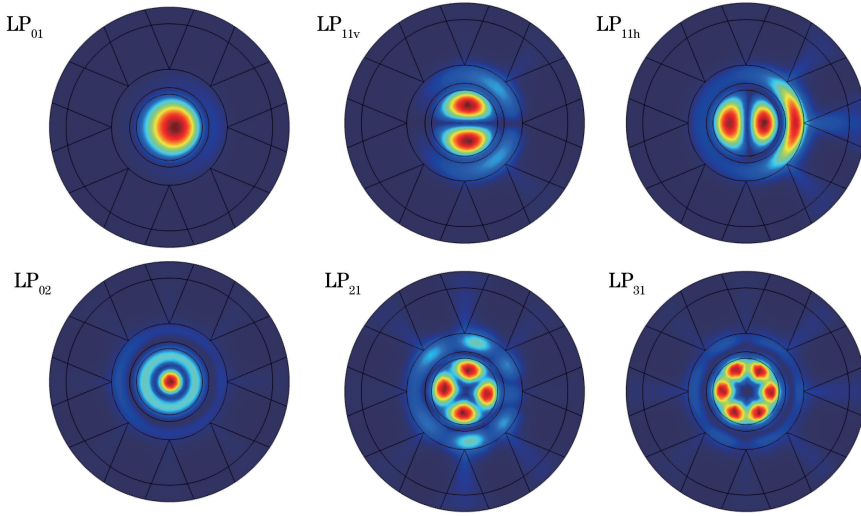


图 3 LP_{01} 、 LP_{11v} 、 LP_{11h} 、 LP_{02} 、 LP_{21} 和 LP_{31} 模的模场分布图

Fig. 3 Mode field distributions of LP_{01} , LP_{11v} , LP_{11h} , LP_{02} , LP_{21} and LP_{31} modes

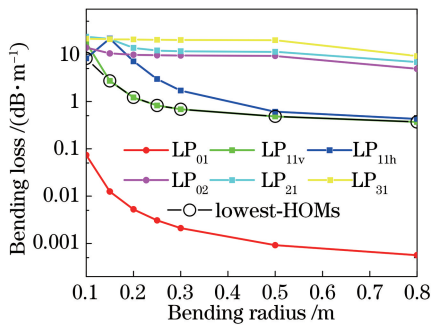


图 4 弯曲损耗随弯曲半径变化图

Fig. 4 Variation of the bending losses of LP_{01} , LP_{11v} , LP_{11h} , LP_{21} , LP_{31} and LP_{02} modes with the bending radius

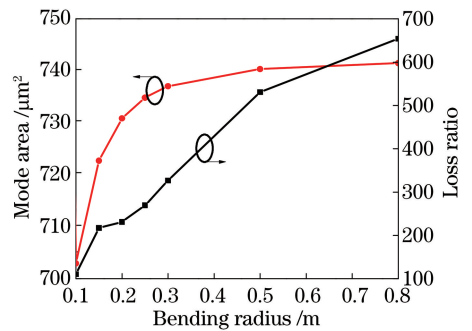


图 5 基模模场面积和损耗比随弯曲半径变化图
Fig. 5 Variation of the mode area of FM and loss ratio with the bending radius

3.3 纤芯半径对光纤特性的影响

假设 $t = 4 \mu\text{m}$ 、 $d = 11 \mu\text{m}$ 、 $b = 62.5 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $R = 0.15 \text{ m}$ 、 $n_2 = 1.444$ 、 $\Delta n_1 = 0.003$ 、 $\Delta n_2 = 0.005$ 、

$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $\varphi = 0^\circ$ ，光纤的基模和高阶模损耗随纤芯半径的变化如图 6(a) 所示。随着纤芯半径的增加，基模损耗减小。由于沟槽以及共振环存在，高阶模损耗在纤芯半径在 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间变化时不稳

定。光纤的模场面积和损耗比如图 6(b) 所示。随着纤芯半径的增大, 模场面积从 $400 \mu\text{m}^2$ 增加到

$1200 \mu\text{m}^2$ 。纤芯半径在 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间时, 损耗比大于 100, 光纤具有良好的单模特性。

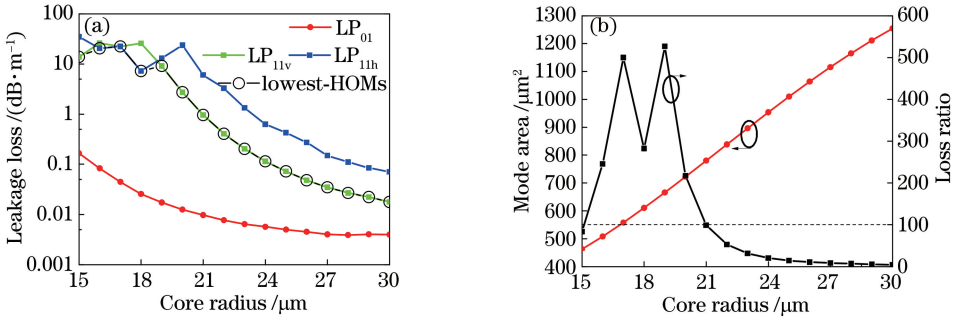


图 6 纤芯半径对光纤特性的影响。(a) 泄露损耗随纤芯半径变化图; (b) 模场面积和损耗比随纤芯半径变化图
Fig. 6 Effect of core radius on fiber properties. (a) Variation of the leakage losses of LP_{01} , LP_{11v} and LP_{11h} modes as a function of the core radius; (b) mode area of FM and loss ratio as a function of the core radius

3.4 沟槽宽度对光纤特性的影响

当 $a = 20 \mu\text{m}$, $d = 11 \mu\text{m}$, $b = 62.5 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 0.15 \text{ m}$, $n_2 = 1.444$, $\Delta n_1 = 0.003$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^\circ$ 时, 光纤的基模和高阶模损耗随沟槽宽度的变化如图 7(a) 所示。随着沟槽宽度的增大, 光纤基模损耗越来越小。而由于共振环的存在, LP_{11} 模的损耗先增加, 随后减小。当沟槽宽度为

$1 \mu\text{m} < t < 5 \mu\text{m}$ 时, 基模损耗小于 $0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$, 高阶模损耗大于 $1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。光纤的模场面积和损耗比如图 7(b) 所示。随着沟槽宽度的增加, 光纤的模场面积从 $980 \mu\text{m}^2$ 减小到 $700 \mu\text{m}^2$ 。当沟槽宽度大于 $3 \mu\text{m}$ 时, 损耗比大于 100, 光纤在这种情况下具有良好的单模特性。

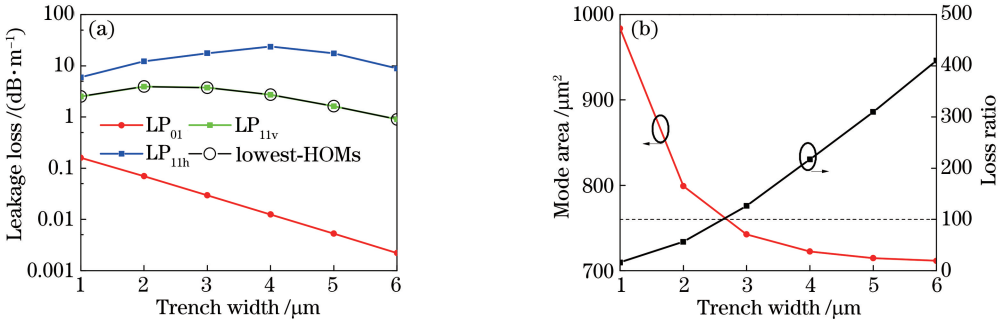


图 7 沟槽宽度对光纤特性的影响。(a) 泄露损耗随沟槽宽度变化图; (b) 模场面积和损耗比随沟槽宽度变化图
Fig. 7 Effect of trench width on fiber characteristics. (a) Variation of the leakage losses of LP_{01} , LP_{11v} and LP_{11h} modes as a function of the trench width; (b) mode area of FM and loss ratio as a function of the trench width

3.5 共振环厚度对光纤特性的影响

当 $a = 20 \mu\text{m}$, $t = 4 \mu\text{m}$, $b = 62.5 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 0.15 \text{ m}$, $n_2 = 1.444$, $\Delta n_1 = 0.003$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^\circ$ 时, 光纤的基模和高阶模损耗随共振环厚度的变化如图 8(a) 所示。基模损耗对共振环厚度增加不敏感。高阶模的损耗随共振环厚度的增加而增大。光纤的模场面积和损耗比如图 8(b) 所示。随着共振环厚度的增加, 光纤的模场面积从 $710 \mu\text{m}^2$ 增加到 $730 \mu\text{m}^2$ 。当共振环厚度为 $10 \mu\text{m} < d < 13 \mu\text{m}$ 时, 损耗比大于 100, 光纤在这种情况下具有良好的单模特性。

3.6 波长对光纤特性的影响

波长对光纤特性的影响如图 8 所示。当 $a = 20 \mu\text{m}$, $t = 4 \mu\text{m}$, $d = 11 \mu\text{m}$, $b = 62.5 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 0.15 \text{ m}$, $n_2 = 1.444$, $\Delta n_1 = 0.003$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\varphi = 0^\circ$ 时, 光纤的基模和高阶模损耗随波长的变化如图 9(a) 所示。基模和高阶模损耗随波长的增加而增大。光纤的模场面积和损耗比如图 9(b) 所示。模场面积和损耗比也随波长的增加而增大。模场面积从 $600 \mu\text{m}^2$ 增加到 $670 \mu\text{m}^2$, 损耗比在 $1.05 \mu\text{m}$ 到 $1.8 \mu\text{m}$ 范围内大于 100, 光纤具有良好的单模特性。

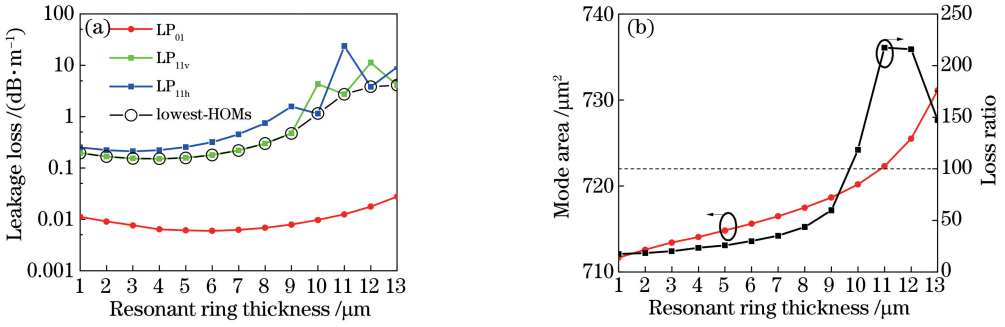


图 8 共振环厚度对光纤特性的影响。(a)泄露损耗随共振环厚度变化图；(b)模场面积和损耗比随共振环厚度变化图
Fig. 8 Effect of resonant ring thickness on fiber characteristics. (a) Variation of the leakage losses of LP₀₁, LP_{11v} and LP_{11h} modes as a function of the resonant ring thickness; (b) mode area of FM and loss ratio as a function of the resonant ring thickness

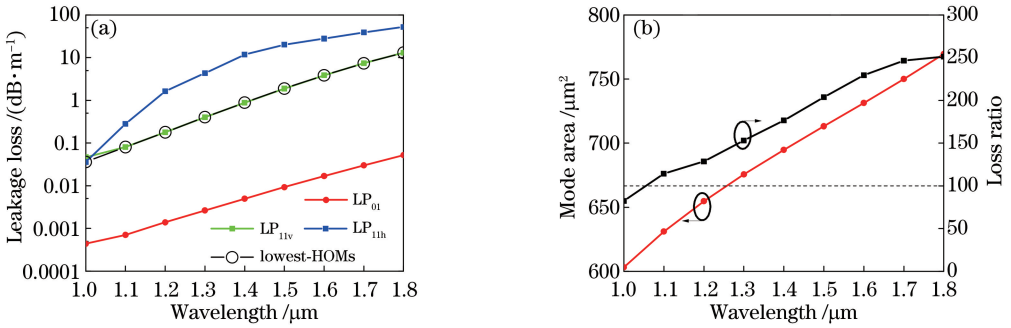


图 9 波长对光纤特性的影响。(a)泄露损耗随波长变化图；(b)模场面积和损耗比随波长变化图
Fig. 9 Effect of wavelength on fiber characteristics. (a) Variation of the leakage losses of LP₀₁, LP_{11v} and LP_{11h} modes as a function of the wavelength; (b) mode area of FM and loss ratio as a function of the wavelength

3.7 弯曲方向对光纤特性的影响

由于光纤不是圆形对称结构,弯曲方向是需要重点考虑的因素。光纤弯曲方向 BO 和参考方向 AA' 之间的夹角 φ 为不同值的情况,已经由图 2 给出。光纤是 1/8 对称结构,弯曲方向 BO 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 内的变化可以表示光纤在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 整个弯曲方向上的变化。图 10(a)表示了光纤的基模和高阶模损耗随弯曲方向的变化。光纤参数为 $a = 20 \mu\text{m}$, $t = 4 \mu\text{m}$, $d = 11 \mu\text{m}$, $b = 62.5 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$,

$R = 0.15 \text{ m}$, $n_2 = 1.444$, $\Delta n_1 = 0.003$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。可以看出,当光纤弯曲半径为 15 cm,弯曲方向在 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 之间变化时,基模损耗和高阶模损耗保持不变,基模损耗为 $0.012 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$,高阶模损耗为 $2.7 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。光纤的模场面积和损耗比如图 10(b)所示。模场面积保持 $720 \mu\text{m}^2$,损耗比为 220。光纤特性不随弯曲方向变化,这是此光纤的一个重要特性。

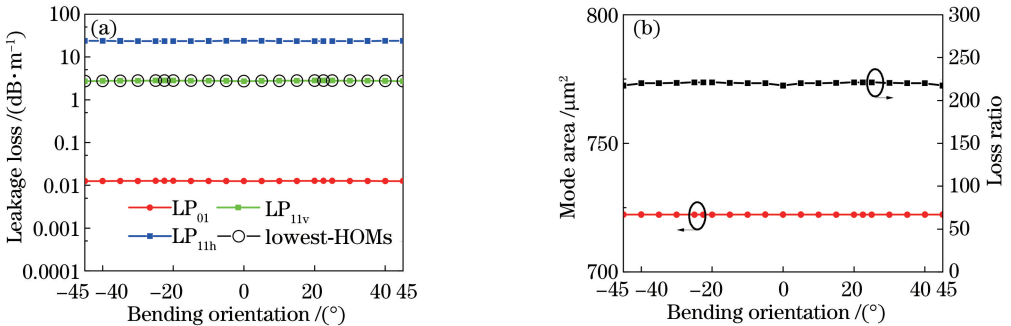


图 10 弯曲方向对光纤特性的影响。(a)泄露损耗随弯曲方向变化图；(b)模场面积和损耗比随弯曲方向变化图
Fig. 10 Effect of bending orientation on fiber characteristics. (a) Variation of the leakage losses of LP₀₁, LP_{11v} and LP_{11h} modes as a function of the bending orientation; (b) mode area of FM and loss ratio as a function of the bending orientation

4 结 论

提出了一种结构新颖的大模场面积光纤。采用有限元方法,对光纤的弯曲特性和模场面积进行了理论研究,证明了大模场面积和抗弯曲的特性。这种光纤是一种泄漏结构,通过抑制高阶模可以达到单模操作的目的。结果表明,沟槽辅助扇形瓣状光纤与传统扇形瓣状光纤相比,具有更优秀的单模操作特性。在弯曲半径为 15 cm 的条件下,有效模面积可达到 $700 \mu\text{m}^2$,而且光纤性能与弯曲方向无关。这种光纤在紧凑型高功率光纤激光器和放大器领域显示出巨大的潜力。

参 考 文 献

- [1] Lou Q H, Zhu J Q, Zhou J, *et al.* Double cladding fiber laser and its application in military[J]. Journal of Institute of Command & Technology, 2003, 14(5): 28-32.
楼祺洪, 朱健强, 周军, 等. 双包层光纤激光器及其在军事中的应用[J]. 装备指挥技术学院学报, 2003, 14(5): 28-32.
- [2] Fang Z H, Hui X F. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application[J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 438-444.
- [3] Zhang D P, Hu M L, Xie C, *et al.* A high power photonic crystal fiber laser oscillator based on nonlinear polarization rotation mode-locking[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(4): 044206.
张大鹏, 胡明列, 谢辰, 等. 基于非线性偏振旋转锁模的高功率光子晶体光纤飞秒激光振荡器[J]. 物理学报, 2012, 61(4): 044206.
- [4] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW of continuous-wave output power[J]. Electronics Letters, 2004, 40(8): 470-471.
- [5] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW of continuous-wave output power[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [6] Li W, Wu Z C, Chen X, *et al.* High power fiber laser output power breakthrough 1 kW [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(6): 890.
李伟, 武子淳, 陈曦, 等. 大功率光纤激光器输出功率突破 1 kW [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 890.
- [7] Sun Y H, Ke W W, Feng Y J, *et al.* 1030 nm kilowatt-level ytterbium-doped narrow linewidth fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0601003.
- [8] Chen D R, Yang T J, Wu J J, *et al.* Band-rejection fiber filter and fiber sensor based on a Bragg fiber of transversal resonant structure [J]. Optics Express, 2008, 16(21): 16489-16495.
- [9] Horikis T P, Kath W L. Modal analysis of circular Bragg fibers with arbitrary index profiles[J]. Optics Letters, 2006, 31(23): 3417-3419.
- [10] Liu M N, Li M X, Jiang C Y, *et al.* Research progress on high birefringence terahertz photonic crystal fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090006.
刘梦楠, 李梦雪, 姜溢澄, 等. 高双折射太赫兹光子晶体光纤的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090006.
- [11] Zhang F, Zhang H K, Chen T, *et al.* Nd-doped double-clad large-mode-area polarization-maintaining photonic crystal fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201020.
张峰, 张海鹏, 陈涛, 等. 掺钕双包层大模场保偏光子晶体光纤激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201020.
- [12] Duan J, Teng C, Han K, *et al.* Fabrication of segmented cladding fiber by bicomponent spinning [J]. Polymer Engineering & Science, 2009, 49(9): 1865-1870.
- [13] 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.
- [14] Rastogi V, Chiang K S. Propagation characteristics of a segmented cladding fiber [J]. Optics Letters, 2001, 26(8): 491-493.
- [15] 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.
- [16] Hooda B, Pal A, Rastogi V, *et al.* Segmented cladding fiber fabricated in silica-based glass [J]. Optical Engineering, 2015, 54(7): 075103.
- [17] Yeung A, Chu P L, Gang D P, *et al.* Design and fabrication of polymer cross fiber for large-core single-mode operation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(2): 101-107.
- [18] Ma S S, Ning T G, Pei L, *et al.* Bend-resistant large mode area fiber with novel segmented cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 113-120.
- [19] Cheng G X. The basic of light-wave technology[M]. Beijing: Chinese Railway Press, 2000: 239-243.

- 陈根祥. 光波技术基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000: 239-243.
- [20] Song N, Yin Z M, Ge W P. Theoretical calculation of the propagation characters of optical fibers [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(5): 566-569.
宋宁, 殷宗敏, 葛文萍. 光纤传输特性的理论计算 [J]. 光子学报, 2002, 31(5): 566-569.
- [21] Jiang H, Zhang J. Analysis on bending loss of single-mode fiber [J]. Communications Technology, 2010, 43(4): 67-69.
江华, 张静. 单模光纤的弯曲损耗分析[J]. 通信技术, 2010, 43(4): 67-69.