

新型双沟槽抗弯曲大模场扇形瓣状光纤研究

王冠利, 宁提纲, 郑晶晶, 李晶, 许建, 魏淮, 裴丽*, 马绍朔

北京交通大学电子信息工程学院全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 提出了一种新型的抗弯曲大模场面积光纤方案——双沟槽辅助型扇形瓣状光纤。与传统的扇形瓣状光纤及单沟槽辅助扇形瓣状光纤相比,该结构具有更大的模场面积和更好的高阶模抑制能力。研究表明:在弯曲半径为 20 cm, 波长为 1.55 μm 时, 光纤的有效模场面积可达 1096 μm^2 , 高阶模与基模损耗比大于 100; 此外, 所提出的光纤对弯曲方向不敏感, 弯曲方向在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围内变化时, 光纤性能保持稳定。

关键词 光纤光学; 光纤设计与制造; 大模场面积; 抗弯曲; 单模运转

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1006008

Novel Bend-Resistant Large-Mode-Area Fan-Segmented Cladding Fiber with Double Trenches

Wang Guanli, Ning Tigang, Zheng Jingjing, Li Jing, Xu Jian, Wei Huai,
Pei Li*, Ma Shaoshuo

*Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network (Ministry of Education),
School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

Abstract A novel double-trench-assisted fan-segmented cladding fiber (SCF) is proposed and researched. Compared with traditional fan-SCF and single-trench-assisted fan-SCF, the proposed fiber structure has a larger mode area and better high-order mode (HOM) suppression. Numerical investigations show that, when the bending radius is 20 cm, the effective mode area of the fundamental mode (FM) reaches up to 1096 μm^2 and the loss ratio between HOM and the FM is greater than 100 at a wavelength of 1.55 μm . In addition, the proposed fiber structure is insensitive to the bending orientation and its properties remain stable with a bending orientation ranging from -180° to 180° .

Key words fiber optics; design and manufacture of fiber; large mode area; bend-resistant; single-mode operation

OCIS codes 060.2280; 060.2430; 060.3510

1 引 言

光纤激光器作为第三代激光器的代表, 由于具有光束质量高、阈值低、转换效率高、散热性好等优点, 已被广泛应用在通信传输、工业制造、国防军事、医疗卫生等领域^[1-2]。近些年来, 光纤激光器的输出功率从最初的几瓦提高到目前的数千瓦量级^[3-6]。然而, 随着理论的进一步研究, 一些因素逐渐成为限制光纤激光器输出功率不断提高的难点所在, 例如: 非线性效应限制了激光功率的进一步提升; 模式不稳定现象降低了激光器的输出光束质量^[7-8]。

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, 增大光纤的有效模场面积可以有效抑制非线性效应, 同时可以降低光纤横截面的光功率密度, 减小热效应带来的不利影响。因此使用具有大模场面积和良好高阶模抑制能力的光纤可以从根本上提高光纤激光器的性能。近些年来, 人们已提出多种具有大模场面积以及单模操作的光纤结构, 主要有: 低数值孔径的阶跃光纤^[9]、光子晶体光纤^[10-12]、布拉格光纤^[13-14]、多层沟壑光纤^[15-16]、多芯光纤^[17]和瓣状光纤^[18-21]等。低数值孔径光纤由于相对折射率差小, 易受弯曲影响; 光子晶体光纤由于其结构复杂, 因而制作难度大且难以保持光纤的均匀性和可重复性; 布拉格光纤具有良好的大模场面

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-06-21; 录用日期: 2019-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(61827817, 61525501)

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

积扩展能力以及抗弯曲特性,但是布拉格光纤中的高折射率环会导致纤芯和高折射率环之间产生不必要的耦合。2013年,南安普顿大学的Jain等^[15]报道了一种多层沟壑光纤,该型光纤在不弯曲的条件下模场面积可达 $10500\ \mu\text{m}^2$,然而在弯曲 $20\ \text{cm}$,保证良好单模操作的条件下,光纤模场面积只能达到 $790\ \mu\text{m}^2$ ^[16]。2001年,Rastogi等^[18]报道了瓣状光纤,光纤的包层由高低折射率交替分布组成;2003年,Rastogi等^[19]分析了瓣状光纤以及扇形瓣状的泄漏损耗特性;2015年,Hooda等^[20]制作了二氧化硅瓣状光纤;2016年,本课题组证明了瓣状光纤的良好弯曲特性和单模操作性能^[21]。

本文提出了一种双沟槽辅助扇形瓣状光纤(DT-FSCF)。与传统扇形瓣状光纤(Fan-SCF)^[19]和单沟槽辅助扇形瓣状光纤(ST-FSCF)^[22]相比,DT-FSCF在纤芯中增加了两个低折射率沟槽。新型光纤可以采用管束堆积法制作,先制作出普通双沟槽光纤预制棒,然后将高折射率材料与低折射率材料在玻璃管中沿方位角方向以周期方式排列,并使其紧密贴合,制成光纤预制棒,控制温度和拉丝速度控制光纤。新型光纤中的低折射率双沟槽使基模更好地限制在纤芯中,减小基模损耗;同时高折射率的双谐振环保证高阶模更好地从纤芯中谐振出去,增大高阶模损耗,从而提升光纤的单模操作特性。在弯曲半径为 $20\ \text{cm}$ 的条件下,光纤能够达到 $1000\ \mu\text{m}^2$ 的模场面积,并保持单模运转;并且光纤在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围内对弯曲方向不敏感,因此不需要控制弯曲方向。

2 光纤结构和理论方法

2.1 光纤结构

本文提出的双沟槽辅助瓣状光纤横截面如图1所示:中间黄色区域为半径等于 a 、折射率等于 n_1 的圆形纤芯,向外依次为折射率等于 n_3 的低折射率沟槽(红色)和折射率等于 n_1 的高折射率谐振环(黄色)。由内向外,沟槽宽度分别为 t_1 、 t_2 ,谐振环厚度分别为 d_1 、 d_2 。第二谐振环外环绕8个角度为 θ 、折射率为 n_1 的扇形瓣,深灰色区域为折射率为 n_2 的包层,光纤半径为 b 。其中:折射率差 $\Delta n_1 = n_1 - n_2$, $\Delta n_2 = n_1 - n_3$;AA'为参考方向; φ 为实际弯曲方向与参考方向之间的夹角。

图2给出了双沟槽辅助扇形瓣状光纤的折射率曲线图。由于瓣状光纤由具有高低折射率的包层交替组成,其有效折射率曲线可以通过径向有效折射

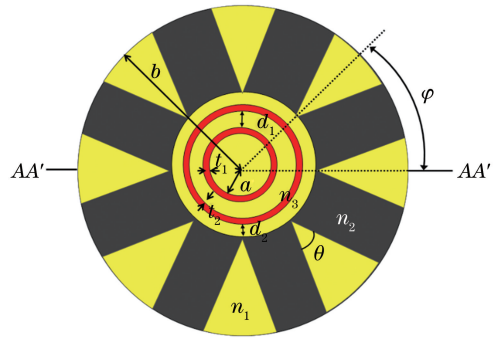


图1 双沟槽辅助瓣状光纤结构示意图

Fig. 1 Structure of double-trench-assisted fan-segmented cladding fiber

率法(REIM)来获得^[20]。使用REIM时,假设相对折射率差 Δn 很小($\Delta n \ll 1$),此时电场的横向分量满足标量的波动方程。用柱坐标表示该方程可得

$$r^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + r \frac{d\phi}{dr} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + k_0^2 r^2 [n^2(r, \theta) - n_{\text{eff}}^2] = 0, \quad (1)$$

式中: ϕ 为相关电场或磁场; k_0 为自由空间波数; $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为波长; $n(r, \theta)$ 为折射率分布; n_{eff} 为模式折射率; r 为径向坐标。模场表达式为

$$\phi(r, \theta) = R(r)\Theta(r, \theta), \quad (2)$$

可得,光纤中的场 $\phi(r, \theta)$ 被分成径向分量 $R(r)$ 和方位角分量 $\Theta(r, \theta)$ 。假设 $\Theta(r, \theta)$ 与 $R(r)$ 相比变化缓慢,该问题可以简化为

$$\frac{1}{r^2} \frac{d^2 \Theta(r, \theta)}{d\theta^2} + k_0^2 [n^2(r, \theta) - n_{\text{eff}}^2(r)] \Theta(r, \theta) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + k_0^2 [n_{\text{eff}}^2(r) - \beta^2] R(r) = 0. \quad (4)$$

通过求解(3)式可得有效折射率分布 $n_{\text{eff}}(r)$,求解(4)式可以计算传播常数 β 和模式的损耗。

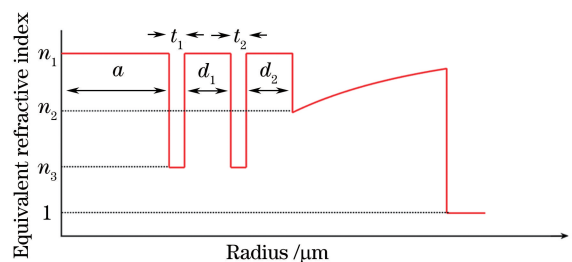


图2 双沟槽辅助扇形瓣状光纤的等效折射率图

Fig. 2 Equivalent refractive index profile of double-trench-assisted fan-segmented cladding fiber

2.2 理论方法

有限元法计算精度高,是分析具有复杂截面结

构最常用的方法。本研究使用全矢量有限元法结合完美匹配层(PML)边界条件进行建模仿真。模场面积作为光纤性能的一个重要指标,各模式的模场面积满足

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

式中: x 为光纤截面的横坐标; y 为光纤截面的纵坐标; E 为在光纤内部传播的横向电场分量 E_x 的大小。小型化、集成化的高功率光纤激光器通常需将增益光纤缠绕在金属热沉上,在满足大模场面积和单模操作要求的同时,光纤也需具备较好的抗弯曲特性。光纤的弯曲性能满足弯曲等效折射率方程^[23],即

$$n_{\text{bent}} = n_{\text{straight}} \left(1 + \frac{x \cos \varphi + y \sin \varphi}{\rho \cdot R} \right), \quad (6)$$

式中: n_{bent} 和 n_{straight} 分别代表了弯曲和直光纤的折射率分布; φ 为弯曲方向角; ρ 为光学弹性系数,文中取值为 1.25; R 为弯曲半径。

弯曲损耗可以通过求解弯曲光纤模式传播常量的虚部来获得^[23],即

$$L_{\text{Loss}} = \frac{20}{\ln(10)} \text{Im}(\beta) = \frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}). \quad (7)$$

本文定义损耗比(LR)为最小高阶模(Lowest-HOMs)和基模(FM)损耗的比值。损耗比是抗弯曲光纤单模操作的评价标准,通常 LR 大于 100,且最小高阶模损耗大于 1 dB/m,基模损耗小于 0.1 dB/m,以确保有效的单模运转。

3 仿真结果分析与对比

首先对 DT-FSCF、ST-FSCF 和 Fan-SCF 进行比较,ST-FSCF 和 Fan-SCF 的结构如图 3(a)和(b)所示,其中,DT-FSCF 的参数如下: $a = 22/23/24/25 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$, $t_1 = t_2 = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 9 \mu\text{m}$, $d_2 = 12 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 20 \text{ cm}$, $\Delta n_1 = 0.002$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^\circ$;ST-FSCF 的参数如下: $a = 22/23/24/25 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$, $t = 2 \mu\text{m}$, $d = 9 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 20 \text{ cm}$, $\Delta n_1 = 0.002$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^\circ$;传统 Fan-SCF 的参数如下: $a = 21/22/23/24 \mu\text{m}$, $b = 62.5 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 20 \text{ cm}$, $\Delta n_1 = 0.002$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^\circ$ 。

三种光纤的性能对比结果如表 1 所示。在纤芯大小相同时,由于低折射率沟槽的存在,DT-FSCF 的基模模场面积小于传统 Fan-SCF。对于 $a =$

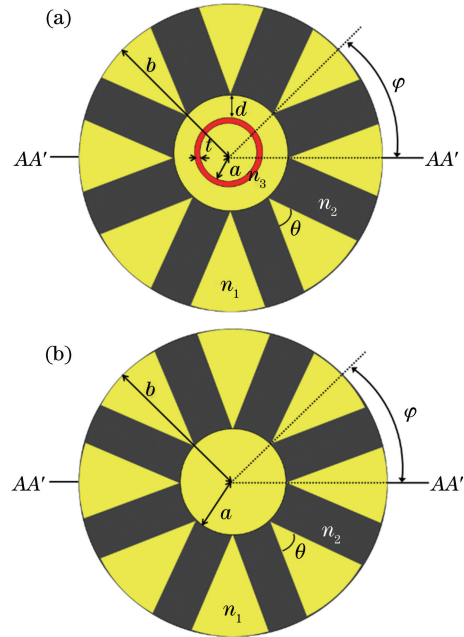


图 3 扇形瓣状光纤结构图。(a) ST-FSCF;(b) FSCF
Fig. 3 Structures of fan-segmented cladding fibers.

(a) ST-FSCF; (b) FSCF

22 μm 的传统 Fan-SCF,基模损耗为 1.31 dB/m,最小高阶模损耗为 17.4 dB/m,基模模场面积为 949 μm^2 ,相应的损耗比为 13;对于 $a = 22 \mu\text{m}$ 的 DT-FSCF,基模损耗为 0.019 dB/m,最小高阶模损耗为 6.74 dB/m,基模面积为 908 μm^2 ,损耗比为 354。此时损耗比虽然增大,但是基模模场面积减少,DT-FSCF 并未体现出明显优势。然而当 DT-FSCF 的纤芯增大 1 μm ,即 $a = 23 \mu\text{m}$ 时,此时基模损耗为 0.014 dB/m,最低高阶模损耗为 1.53 dB/m,基模模场面积为 970 μm^2 ,损耗比为 109,可以看出此时基模损耗明显减小,损耗比明显提升,同时模场面积也有提升,因此比传统 Fan-SCF,DT-FSCF 具有更大的模场面积,同时也能保持良好的单模操作特性。当纤芯大小相同时,DT-FSCF 与 ST-FSCF 的模场面积基本相同。对于 $a = 22 \mu\text{m}$ 的 ST-FSCF,基模损耗为 0.096 dB/m,最小高阶模损耗为 3.16 dB/m,损耗比为 33;对于 $a = 22 \mu\text{m}$ 的 DT-FSCF,基模损耗为 0.019 dB/m,最小高阶模损耗为 6.74 dB/m,此时损耗比为 354,损耗比显著提升,单模操作性能得到提高。两个低折射率沟槽使基模的损耗变得更小,同时两个谐振环的存在可以保证高阶模能够更好地耦合出来,增大了损耗比,提高了单模操作的性能。通过之前两种光纤的性能对比,能够发现 DT-FSCF 在增大模场面积的同时,还可以保证更好的单模运转特性,优势十分明显。

表 1 本论文的工作(DT-FSCF)和以前工作(FSCF,ST-FSCF)的性能对比

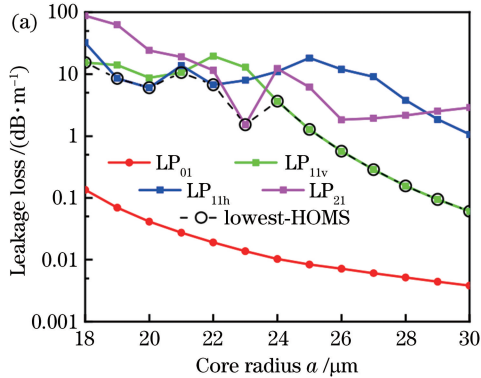
Table 1 Comparison of properties of current work (DT-FSCF) and previous works (FSCF, ST-FSCF)

Property	FSCF	ST-FSCF	DT-FSCF
Core radius $a / \mu\text{m}$	21/22/23/24	22/23/24/25	22/23/24/25
Index difference Δn_1	0.002	0.002	0.002
Index difference Δn_2	0	0.005	0.005
Trench width $t_1 / \mu\text{m}$	0	2	2
Trench width $t_2 / \mu\text{m}$	0	0	2
Resonant ring thickness $d_1 / \mu\text{m}$	0	9	9
Resonant ring thickness $d_2 / \mu\text{m}$	0	0	12
Fan segment angle $\theta / (^{\circ})$	45	45	45
Cladding radius $b / \mu\text{m}$	62.5	125	125
Mode area $/\mu\text{m}^2$	885/948/1011/1074	909/971/1034/1097	908/970/1033/1096
FM $/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	1.68/1.31/1.04/0.86	0.096/0.077/0.061/0.050	0.019/0.014/0.010/0.008
Lowest-HOMS $/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	24.7/17.4/12.3/9.1	3.16/1.93/1.24/0.85	6.74/1.53/3.64/1.27
Loss ratio	14/13/11/10/9	33/25/20/17	354/109//364/158

4 光纤各参数的仿真结果分析

4.1 纤芯参数对光纤性能的影响

DT-FSCF 的基模和高阶模损耗随纤芯尺寸的变化



变化结果如图 4(a) 所示, 参数为 $t_1 = t_2 = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 9 \mu\text{m}$, $d_2 = 12 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$, $\theta = 45^{\circ}$, $R = 20 \text{ cm}$, $\Delta n_1 = 0.002$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^{\circ}$.

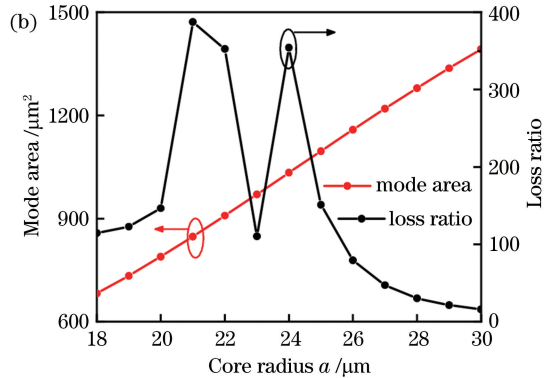


图 4 纤芯半径对光纤性能的影响。(a) 泄漏损耗随纤芯半径变化图; (b) 模场面积和损耗比随纤芯半径变化图

Fig. 4 Effect of core radius on fiber properties. (a) Leakage loss as a function of core radius; (b) mode area and loss ratio as functions of core radius

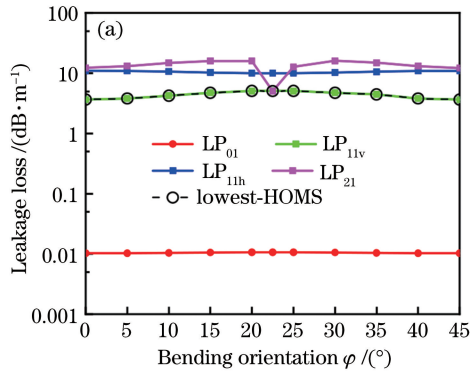
其中: LP_{01} 为基模; LP_{11} 和 LP_{21} 为高阶模; 下角标 v 和 h 分别表示 LP_{11} 模的垂直方向和水平方向。随着纤芯半径增大, 基模损耗不断减小。由于双低折射率沟槽及谐振环的存在, 高阶模损耗在纤芯半径 $18 \sim 30 \mu\text{m}$ 之间变化不稳定。 LP_{11v} 随着纤芯的增大先减小后增大最后不断减小, 在 $a = 22 \mu\text{m}$ 时达到最大, 随后不断减小。在 $a < 25 \mu\text{m}$ 时, LP_{11h} 损耗在 $a = 20 \mu\text{m}$ 处取得极小值, 在 $a > 25 \mu\text{m}$ 后, 损耗随纤芯的增大不断减小。在 $a = 23 \mu\text{m}$ 时, LP_{21} 取

得极小值。图 4(b) 表示模场面积和损耗比随纤芯半径的变化, 模场面积从 $682 \mu\text{m}^2$ 增加到 $1392 \mu\text{m}^2$, 在纤芯半径在 $18 \sim 25 \mu\text{m}$ 之间时, 损耗比大于 100。在 $a = 25 \mu\text{m}$ 时, 光纤模场面积为 $1096 \mu\text{m}^2$, 损耗比为 151, 具有良好的单模操作性能。

4.2 弯曲方向和半径对光纤性能的影响

由于光纤属于非圆对称结构, 因此弯曲方向会对光纤性能产生影响。根据光纤结构, 只需对 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 的光纤弯曲方向进行讨论, 就能完整地表示光纤

性能。图 5(a)和(b)分别表示了光纤的基模和高阶模的损耗以及模场面积和损耗比随弯曲方向的变化,其中:光纤参数为 $a = 24 \mu\text{m}$, $t_1 = t_2 = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 9 \mu\text{m}$, $d_2 = 12 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 20 \text{ cm}$, $\Delta n_1 = 0.002$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。由图 5 可以看出,在弯曲半径为 20 cm,弯曲方向从 0° 变化到 45° 时,光纤基模、 $\text{LP}_{11\text{h}}$ 模的损耗和模场面积保持不变。从图 5(b)可以看出,损耗比在弯曲方向 $20^\circ \sim 25^\circ$ 范围内达到最大。由图 5(a)可以看出,基模的损耗基本保持不变,保持在 0.0105 dB/m 左右。



随着弯曲方向从 0° 变化到 22.5° ,最小高阶模 $\text{LP}_{11\text{v}}$ 的损耗从 3.64 dB/m 增加到 5.12 dB/m ;弯曲方向从 22.5° 变化到 45° 时, $\text{LP}_{11\text{v}}$ 的损耗又从 5.12 dB/m 减小到 3.64 dB/m ,因此损耗比出现了随着弯曲方向先增大后减小的现象。光纤在整个弯曲方向上有良好的单模操作特性,且模场面积可以保持在 $1033 \mu\text{m}^2$ 。

图 6(a)和(b)分别显示了弯曲角度 $\varphi = 0^\circ$ 、 $\varphi = 22.5^\circ$ 时,光纤中 LP_{01} 、 $\text{LP}_{11\text{v}}$ 、 $\text{LP}_{11\text{h}}$ 和 LP_{21} 模式的电场分布图。

弯曲半径对光纤的影响也很重要,光纤其他参

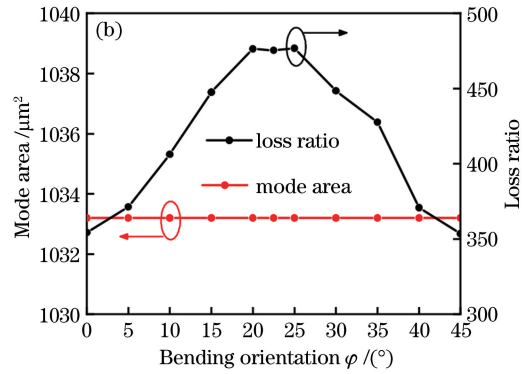


图 5 弯曲方向对光纤性能的影响 (a) 泄漏损耗随弯曲方向变化图; (b) 模场面积和损耗比随弯曲方向变化图
Fig. 5 Effect of bending orientation on fiber properties. (a) Leakage loss as a function of bending orientation;

(b) mode area and loss ratio as functions of bending orientation

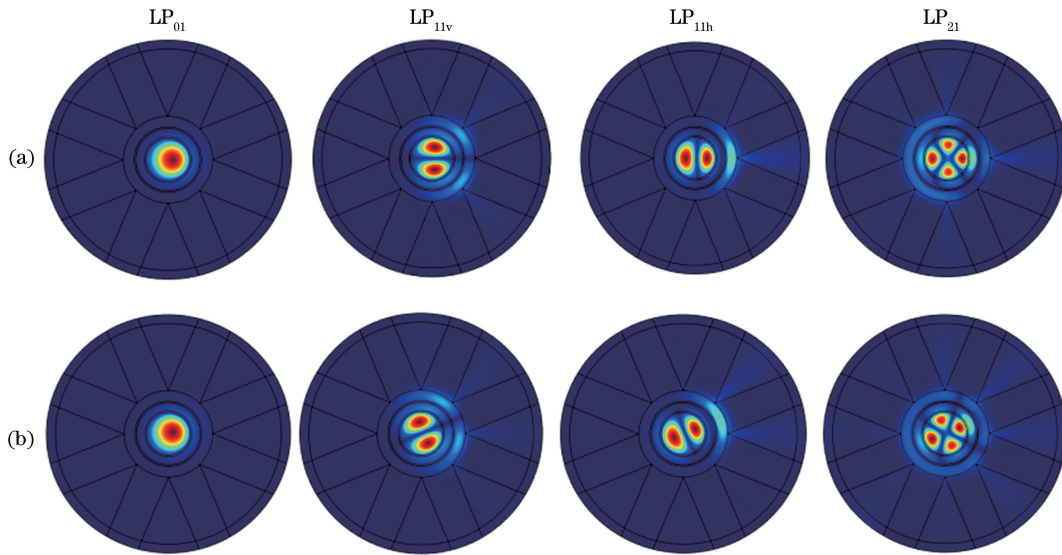


图 6 在不同弯曲方向时 LP_{01} , $\text{LP}_{11\text{v}}$, $\text{LP}_{11\text{h}}$ 和 LP_{21} 模场分布图。 (a) $\varphi = 0^\circ$; (b) $\varphi = 22.5^\circ$

Fig. 6 Mode field distributions of LP_{01} , $\text{LP}_{11\text{v}}$, $\text{LP}_{11\text{h}}$ and LP_{21} modes at different bending orientations.

(a) $\varphi = 0^\circ$; (b) $\varphi = 22.5^\circ$

数不变,选取弯曲方向为 $\varphi = 0^\circ$,分析弯曲半径对光纤性能的影响。光纤中 LP_{01} 、 $\text{LP}_{11\text{v}}$ 、 $\text{LP}_{11\text{h}}$ 和 LP_{21} 的模式损耗随弯曲半径的变化如图 7(a)所示:当弯曲半径 R 从 16 cm 增加到 30 cm 时, LP_{01} 模式的损耗

从 0.0411 dB/m 迅速减小到 0.0016 dB/m , $\text{LP}_{11\text{v}}$ 模式的泄露损耗从 22.97 dB/m 减小到 0.48 dB/m , LP_{21} 和 $\text{LP}_{11\text{h}}$ 模式损耗变化缓慢。基模的模场面积和损耗比随弯曲半径 R 的变化如图 7(b)所示:模场

面积从 $1014 \mu\text{m}^2$ 增加到 $1056 \mu\text{m}^2$, 当弯曲半径在 $16 \sim 30 \text{ cm}$ 之间时, 损耗比大于 100, 因而光纤具有良好的单模抗弯曲特性。

4.3 沟槽宽度对光纤性能的影响

从制作的角度研究沟槽宽度对光纤性能的影响, 其中: 光纤参数为 $a = 24 \mu\text{m}$, $t_1 = t_2 = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 9 \mu\text{m}$, $d_2 = 12 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 20 \text{ cm}$, $\Delta n_1 = 0.002$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^\circ$ 。LP₀₁、LP_{11v}、LP_{11h} 和 LP₂₁ 模式的泄露损耗和模场面积分别随沟槽 t_1 、 t_2 宽度变化关系如图 8(a) 和 (b) 所示。当沟槽 t_1 的宽度从 $1 \mu\text{m}$ 增加到 $5 \mu\text{m}$ 时, LP₀₁ 模式的损耗逐渐减小。由于谐振环和沟槽 t_2 的存在, LP₂₁ 模式的损耗变化波动较大, LP_{11v} 模

式的损耗一直增大, 直到 $t_1 > 4.5 \mu\text{m}$ 后开始减小, LP_{11h} 模式的损耗在 $t_1 > 1.5 \mu\text{m}$ 后开始一直减小, 基模的模场面积随沟槽 t_1 宽度的增加而不断减小, 从 $1158 \mu\text{m}^2$ 减小到 $977 \mu\text{m}^2$ 。当 $1.5 \mu\text{m} < t_1 < 5.0 \mu\text{m}$ 时, 损耗比大于 100, 光纤在这种情况下具有良好的单模运转特性。由图 8(b) 可以看出, 当沟槽 t_2 的宽度逐渐增大时, LP₀₁ 模式的损耗从 0.057717 dB/m 减小到 0.00055 dB/m ; LP_{11v} 和 LP₂₁ 模式的损耗在 $t_2 > 2 \mu\text{m}$ 后一直减小, LP_{11h} 模式损耗变化缓慢。两图对比可得: 相对于弯曲方向和半径对基模的模场面积和损耗比造成的影响, 沟槽 t_1 的宽度变化对基模的模场面积和损耗比造成的影响更大。

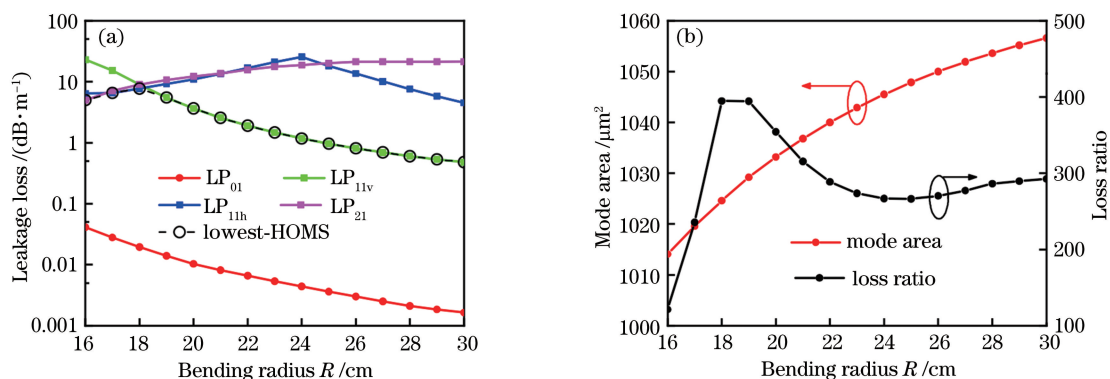


图 7 弯曲半径对光纤性能的影响。(a) 泄露损耗随弯曲半径变化图; (b) 模场面积和损耗比随弯曲半径变化图

Fig. 7 Effect of bending radius on fiber properties. (a) Leakage loss as a function of bending radius; (b) mode area and loss ratio as functions of bending radius

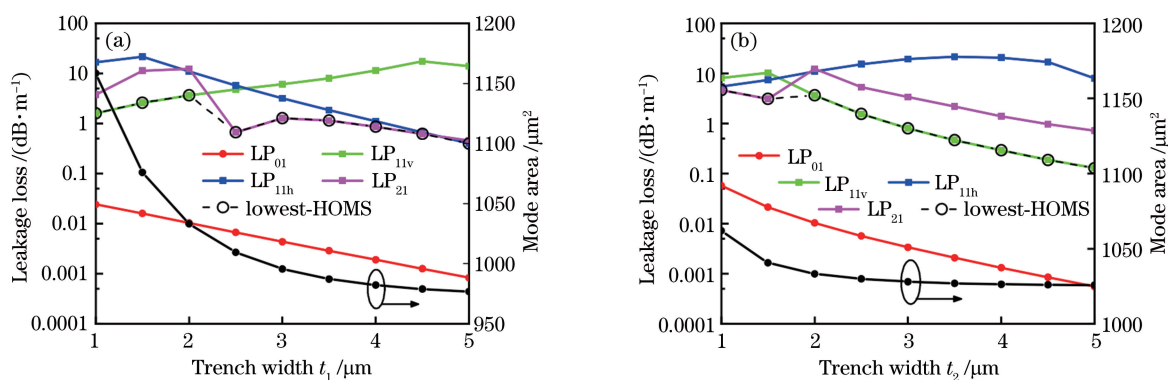


图 8 弯曲损耗和模场面积随沟槽宽度的变化图。(a) t_1 ; (b) t_2

Fig. 8 Bending loss and mode area as functions of trench width. (a) t_1 ; (b) t_2

4.4 谐振环厚度对光纤性能的影响

接下来研究分析谐振环厚度对光纤性能的影响, 其中: 光纤参数为 $a = 24 \mu\text{m}$, $t_1 = t_2 = 2 \mu\text{m}$, $d_1 = 9 \mu\text{m}$, $d_2 = 12 \mu\text{m}$, $b = 125 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $R = 20 \text{ cm}$, $\Delta n_1 = 0.002$, $\Delta n_2 = 0.005$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^\circ$, 且分析 d_1 时, $d_2 = 12 \mu\text{m}$, 分析 d_2 时, $d_1 = 9 \mu\text{m}$ 。光纤中 LP₀₁、LP_{11v}、LP_{11h} 和 LP₂₁ 模式的泄露损耗随

谐振环 d_1 厚度的变化如图 9(a) 所示: 随着谐振环 d_1 厚度的增加, LP₀₁ 模式的损耗变化不大, LP_{11v}、LP₂₁ 模式的损耗逐渐增大; 模场面积从 $1000 \mu\text{m}^2$ 增加到 $1060 \mu\text{m}^2$, 损耗比在 $3 \mu\text{m} < d_1 < 12 \mu\text{m}$ 范围内都大于 100, 并在 $d_1 = 11 \mu\text{m}$ 时取得极大值为 539, 单模操作性能良好。图 9(b) 显示了谐振环 d_2 厚度对光纤性能的影响, LP₀₁、LP_{11h} 和 LP_{11v} 模式的

损耗随 d_2 厚度的增加而不断增加,模场面积变化较小($1027 \sim 1035 \mu\text{m}^2$)。相比于谐振环 d_1, d_2 的厚度越大,高阶模越容易泄露。

4.5 波长对光纤性能的影响

不同波长对光纤性能的影响如图 10 所示,其中:光纤参数为 $a = 24 \mu\text{m}, t_1 = t_2 = 2 \mu\text{m}, d_1 = 9 \mu\text{m}, d_2 = 12 \mu\text{m}, b = 125 \mu\text{m}, \theta = 45^\circ, R = 20 \text{ cm}, \Delta n_1 = 0.002, \Delta n_2 = 0.005, \varphi = 0^\circ$ 。由图 10(a) 可以

看出:随着波长越来越大, LP_{01} 的损耗越来越大,从 0.0059 dB/m 增大到 0.0427 dB/m ,因为双沟槽和双谐振环的存在,高阶模的损耗并非处于单调递增状态,但整体呈增大趋势。各个模式的模场面积和损耗比随波长的变化如图 10(b) 所示。由图 10 可知,基模的模场面积随波长的增大而增大,从 $810 \mu\text{m}^2$ 增加到 $1120 \mu\text{m}^2$;波长在 $1.05 \sim 1.80 \mu\text{m}$ 之间时,损耗比大于 40。

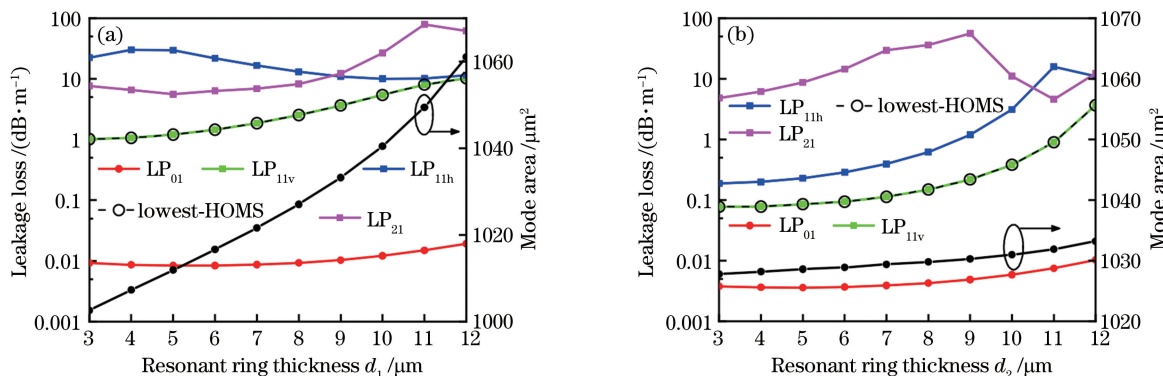


图 9 弯曲损耗和模场面积随谐振环厚度的变化图。(a) d_1 ; (b) d_2

Fig. 9 Bending loss and mode area as functions of resonant ring thickness. (a) d_1 ; (b) d_2

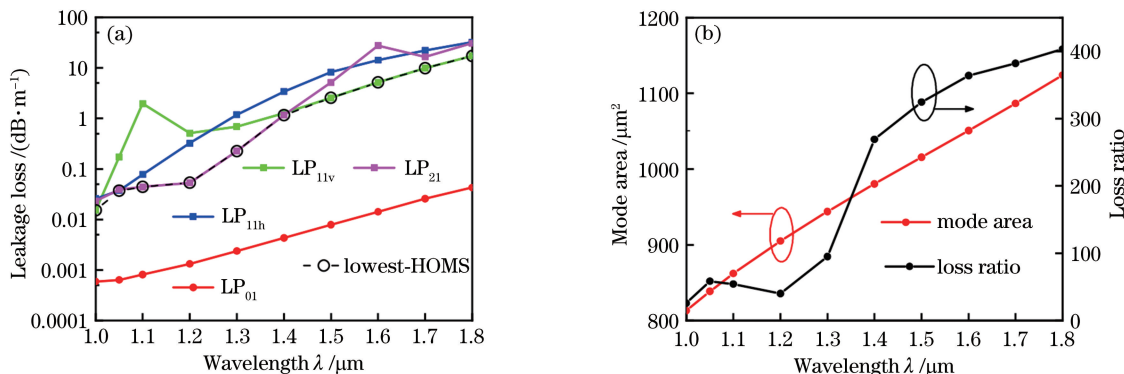


图 10 波长对光纤性能的影响 (a) 泄漏损耗随波长变化图; (b) 模场面积和损耗比随波长变化图

Fig. 10 Effect of wavelength on fiber properties. (a) Leakage loss as a function of wavelength; (b) mode area and loss ratio as functions of wavelength

4.6 折射率差对光纤性能的影响

光纤中 $\text{LP}_{01}, \text{LP}_{11v}, \text{LP}_{11h}$ 和 LP_{21} 模式的泄露损耗和模场面积随 Δn_1 变化如图 11(a) 所示,其中:参数为 $a = 24 \mu\text{m}, t_1 = t_2 = 2 \mu\text{m}, d_1 = 9 \mu\text{m}, d_2 = 12 \mu\text{m}, b = 125 \mu\text{m}, \theta = 45^\circ, R = 20 \text{ cm}, \varphi = 0^\circ, \lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。当 $\Delta n_2 = 0.005$ 时,随着 Δn_1 的增加, $\text{LP}_{01}, \text{LP}_{11v}, \text{LP}_{11h}$ 和 LP_{21} 模式的损耗不断减小,模场面积保持在 $1030 \mu\text{m}^2$ 附近。当 $\Delta n_1 = 0.002$ 时,由图 11(b) 可以看出, $\text{LP}_{01}, \text{LP}_{11v}, \text{LP}_{21}$ 模式的损耗随 Δn_2 的增加不断减小, LP_{11h} 模式损耗变化不明显,模场面积从 $1556 \mu\text{m}^2$ 减小到 $982 \mu\text{m}^2$ 。

4.7 两个谐振环联合作用下对光纤性能的影响

为了详细研究两个谐振环厚度对 DT-FSCF 性能的综合影响,两个参量联合作用下光纤的基模损耗和损耗比如图 12(a) 和 (b) 所示,光纤参数为 $a = 24 \mu\text{m}, t_1 = t_2 = 2 \mu\text{m}, b = 125 \mu\text{m}, \theta = 45^\circ, R = 20 \text{ cm}, \Delta n_1 = 0.002, \Delta n_2 = 0.005, \varphi = 0^\circ, \lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。由图 12(a) 可以看出,基模损耗随 d_1 和 d_2 增加而增大,当 d_1 和 d_2 在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 范围内时,基模损耗始终小于 0.02 dB/m 。由图 12(b) 可以看出,最小高阶模损耗遵循和基模损耗同样的规律,在 $d_2 > 11.5 \mu\text{m}$ 时,最小高阶模损耗保持在 1 dB/m

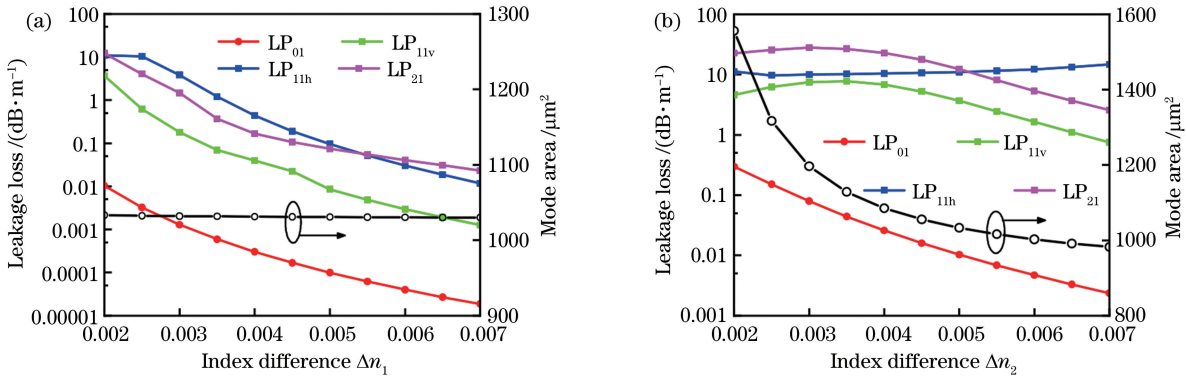


图 11 弯曲损耗和模场面积随折射率的变化图。(a) Δn_1 ; (b) Δn_2

Fig. 11 Bending loss and mode area as functions of index difference. (a) Δn_1 ; (b) Δn_2

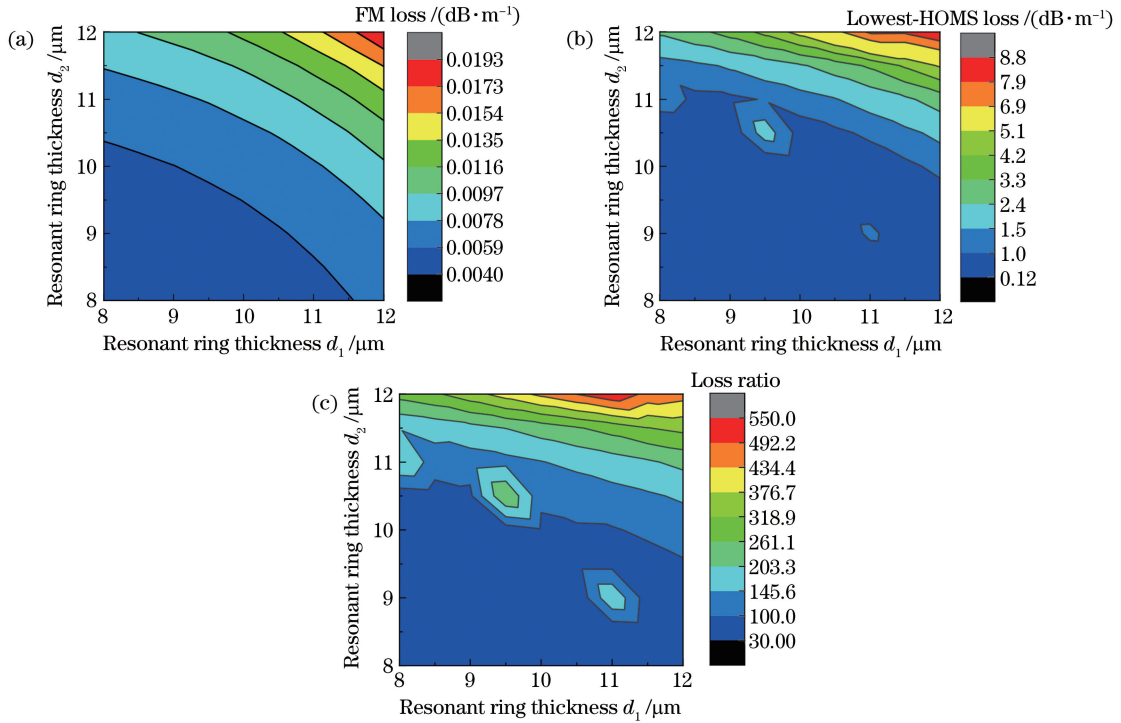


图 12 谐振环 d_1 和 d_2 对光纤性能的综合影响。(a) 基模损耗; (b) 最小高阶模损耗; (c) 损耗比

Fig. 12 Combined effect of resonant ring thicknesses d_1 and d_2 on fiber properties.

(a) Loss of FM; (b) minimal loss of HOM; (c) loss ratio

以上;在 $d_2 > 11 \mu\text{m}$ 时,损耗比始终大于 100,因此可得光纤能够在较大的参数范围内实现单模运转。

5 结 论

提出了一种新型的双沟槽辅助扇形瓣状光纤设计方案,数值结果表明:双沟槽辅助扇形瓣状光纤与单沟槽辅助以及传统扇形瓣状光纤相比,具有更优秀的单模特性。在弯曲半径为 20 cm,纤芯半径为 $25 \mu\text{m}$ 时,其有效模场面积可达 $1000 \mu\text{m}^2$,并且高阶模与基模损耗比大于 100。因此,所提出新型光纤在光纤激光器应用中具有很大的优势。

参 考 文 献

[1] Zeng H F, Xiao F H. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 438-441, 444.
曾惠芳, 肖芳惠. 高功率光纤激光器及其应用 [J]. 激光技术, 2006, 30(4): 438-441, 444.

[2] Zhang J, Pan Y Z, Hu G J, *et al.* Application and forecast of high power fiber lasers [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(4): 222-226.
张军, 潘玉寨, 胡贵军, 等. 高功率光纤激光器的应用与展望 [J]. 半导体光电, 2003, 24(4): 222-226.

[3] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1 kW of continuous-

- wave output power[J]. Electronics Letters, 2004, 40 (8): 470.
- [4] Stutzki F, Gaida C, Gebhardt M, *et al.* Tm-based fiber-laser system with more than 200 MW peak power[J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 9-12.
- [5] 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.
孙殷宏, 柯伟伟, 冯昱骏, 等. 1030 nm 千瓦级掺镱光纤窄线宽激光放大器[J]. 中国激光, 2016, 43 (6): 0601003.
- [6] Moulton P F, Rines G A, Slobodtchikov E V, *et al.* Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 85-92.
- [7] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19 (11): 10180-10192.
- [8] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [9] Xu W B, Lin Z Q, Wang M, *et al.* 50 μm core diameter $\text{Yb}^{3+}/\text{Al}^{3+}/\text{F}^{-}$ codoped silica fiber with $M^2 < 1.1$ beam quality [J]. Optics Letters, 2016, 41 (3): 504-507.
- [10] Reena, Saini T S, Kumar A, *et al.* Rectangular-core large-mode-area photonic crystal fiber for high power applications: design and analysis[J]. Applied Optics, 2016, 55(15): 4095-4100.
- [11] Saini T S, Kumar A, Sinha R K. Triangular-core large-mode-area photonic crystal fiber with low bending loss for high power applications[J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7246-7251.
- [12] Wang L F, Liu H, He D B, *et al.* Phosphate single mode large mode area all-solid photonic crystal fiber with multi-watt output power [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(13): 131111.
- [13] Baskiotis C, Molin D, Bouwmans G, *et al.* Bending behaviors of all-solid silica large mode area Bragg fibers [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 719520.
- [14] Horikis T P, Kath W L. Modal analysis of circular Bragg fibers with arbitrary index profiles[J]. Optics Letters, 2006, 31(23): 3417-3419.
- [15] Jain D, Baskiotis C, Sahu J K. Mode area scaling with multi-trench rod-type fibers [J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1448-1455.
- [16] Jain D, Baskiotis C, Sahu J K. Bending performance of large mode area multi-trench fibers [J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26663-26670.
- [17] Yang F, Tang M, Li B R, *et al.* Design and optimization of multi-core fibers with low crosstalk and large effective area [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0106005.
杨芳, 唐明, 李博睿, 等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化 [J]. 光学学报, 2014, 34 (1): 0106005.
- [18] Rastogi V, Chiang K S. Propagation characteristics of a segmented cladding fiber [J]. Optics Letters, 2001, 26(8): 491-493.
- [19] Rastogi V, Chiang K. Leakage losses in segmented cladding fibers [C]//OFC 2003 Optical Fiber Communications Conference, 2003., March 28, 2003, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE, 2003: 697-699.
- [20] Hooda B, Pal A, Rastogi V, *et al.* Segmented cladding fiber fabricated in silica-based glass [J]. Optical Engineering, 2015, 54(7): 075103.
- [21] 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.
- [22] Liu S N, Ning T G, Ma S S, *et al.* Trench-assisted fan-segmented cladding fiber with large mode area [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (12): 1206001.
刘诗男, 宁提纲, 马绍朔, 等. 一种大模场沟槽辅助型扇形瓣状光纤的研究 [J]. 中国激光, 2018, 45 (12): 1206001.
- [23] Ma S S, Ning T G, Pei L, *et al.* Design and analysis of a modified segmented cladding fiber with parabolic-profile core [J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(3): 035104.