

# 大芯径光纤基模功率传输特性与折射率分布形式关系的研究

沙剑波<sup>1</sup> 高侃<sup>1</sup> 董小鹏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国电子科技集团公司第二十三研究所光纤传感器研发中心, 上海 200437)

<sup>2</sup> 厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005

**摘要** 研究和分析了光纤芯区径向折射率分布对大芯径光纤基模的功率传输特性(主要包括最大功率密度和等效模面积这两个参数)的影响。采用一种可适用于多种光纤实际折射率分布的独特数学表达式,研究了折射率分布形状变化时大芯径光纤基模在横截面内功率密度分布与等效模面积的变化,并将结果与阶跃型折射率光纤进行对比。计算结果表明,在传输功率相同、光纤基模与高阶模等效折射率差大于 $10^{-4}$ 的前提下,折射率在芯区中心有一定凹陷的分布可以有效降低横截面内基模功率密度的最大值,增大基模的等效模面积。这一研究为设计和制作可以传输更大功率的大芯径的无源和有源单模光纤提供了理论基础。

**关键词** 光纤光学;大芯径光纤;折射率分布;功率密度;光纤激光器;光纤放大器

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.030601

## Investigation of the Power Transmission Characteristics of Fundamental Mode of Large-Core Fiber and Their Relation with the Type of Refractive Index Profile

Sha Jianbo<sup>1</sup> Gao Kan<sup>1</sup> Dong Xiaopeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Optical Fiber Sensing R&D Center, 23rd Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200437, China

<sup>2</sup> College of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

**Abstract** The influence of various types of index profiles on the characteristics of power transmission, including the effective mode area ( $A_{\text{eff}}$ ) and the maximum power density ( $D_{\text{max}}$ ) in the cross section, is investigated. A unique expression for the index profile, which is appropriate to the most practical index distributions of optical fibers, is employed in the calculation of  $A_{\text{eff}}$  and  $D_{\text{max}}$  with the comparison of the step index profile. The simulation result indicates that under the condition of equal transmission power and the difference of the mode effective index ( $\Delta n_{\text{eff}}$ ) larger than  $10^{-4}$ , the index profile with a center dip will effectively lead to the reduction of  $D_{\text{max}}$  and the increase of  $A_{\text{eff}}$ . This research provides theoretical basis for the design and fabrication of passive large core fiber for large power transmission.

**Key words** fiber optics; large-core fiber; refractive index profile; power density; fiber laser; fiber amplifier

**OCIS codes** 060.3510; 140.3510; 060.2320

## 1 引言

随着大功率光纤激光器的发展,可以承受更大传输功率、具有更高的模式传输质量、能够避免出现非线性效应和激光损伤的大芯径光纤受到人们越来越多的重视,各种在一定条件下可以增大等效模面积和通过模式选择机制提高光束质量的大芯径有源和无源光纤的设计方案不断涌现<sup>[1~12]</sup>。在这些方案中,折射率分布根据设计目标的需要,一般被设计成阶跃型、抛物型、三角形、凹陷型和复合型<sup>[5,7]</sup>等。有源大芯径光纤除了考虑大等效模面积外,还要考虑掺杂分布对基模提取效率的影响;而对于无源大芯径光纤,设计时主要考虑降低光纤中基模的功率密度和增大等效模面积,同时保持基模与高阶模(如 $LP_{11}$ 模)之间有较大的等效折射率差<sup>[7]</sup>。在

收稿日期: 2012-09-18; 收到修改稿日期: 2012-12-01; 网络出版日期: 2013-02-05

作者简介: 沙剑波(1982—),男,硕士,工程师,主要从事光纤光栅方面的研究。E-mail: adampiero@126.com

这些讨论中,目前用来表示光纤折射率分布的函数主要有阶跃函数和单一指数形式的渐变函数,与实际光纤在芯区可能出现的复杂折射率变化(如存在中心凹陷)有较大差异,不便于描述模式传输特性尤其是本文重点讨论的最大功率密度随折射率分布形状的变化规律。为此,本文针对大芯径光纤的设计问题,提出采用一种可灵活描述目前常见的各种折射率分布形式的统一函数和相关参数,并用这种折射率分布函数仿真计算了大芯径光纤的功率传输特性,特别是基模在横截面功率密度分布的最大值、等效模面积、基模与 LP<sub>11</sub> 高阶模的等效折射率差等随折射率形状参数的变化曲线。通过对其传输特性做定量分析,得到优化的折射率分布参数,从而在保持等效折射率差较大的条件下,有效地降低最大功率密度,提升光纤的最大可传输功率。

## 2 折射率径向非均匀分布的统一函数表达式

根据光纤实际制作工艺和条件,本文提出采用如下函数表达式描述实际光纤可能出现的各种折射率分布形式:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2d\Delta(1 - r/c)^{q_1}]^{1/2}, & r < c \\ n_1 \{1 - 2\Delta[(r-c)/(a-c)]^{q_2}\}^{1/2}, & c < r < a \\ n_2, & r > a \end{cases} \quad (1)$$

式中  $n_1, n_2$  分别为光纤芯区最大折射率与包层折射率,  $d$  为芯区中心  $r = 0$  处折射率下陷的百分比,  $a$  为纤芯半径,  $c$  为芯区最大折射率  $n_1$  所在位置 ( $c$  取值范围为  $0 \sim a$ ),  $\Delta$  为相对折射率差,定义为

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}. \quad (2)$$

此外,  $q_1$  表示  $0 < r < c$  区域折射率的变化形式;  $q_2$  表示  $c < r < a$  区域折射率的变化形式,例如,  $q_2 = 1$  为线型变化,  $q_2 = 2$  为抛物型变化,  $q_2 = \infty$  表示阶跃型变化。为说明(1)式描述的折射率分布形式,图 1(a) 给出了参数  $d$  和  $q_2$  取不同值时的折射率形状,图 1(b) 是折射率分布参数  $d = 0.5, c = 0.9, q_1 = 0.01 \sim 1.0, q_2 = 10$  时的折射率分布形状。从图 1 可以看出,只要适当选取参数  $d, c, q_1, q_2$ , (1)式可以表示阶跃型、三角形、抛物型、中心凹陷型、复合型等多种折射率分布形状,为使用统一的折射率分布函数和参数来仿真大芯径光纤的传输特性提供了方便。

图 1 采用(1)式统一折射率分布函数表示时,不同参数对应的各种折射率形状。(a)中心凹陷深度  $d$  和芯-包层边界形状参数  $q_2$  变化时的折射率分布;(b)凹陷形状参数  $q_1$  变化时的折射率分布。

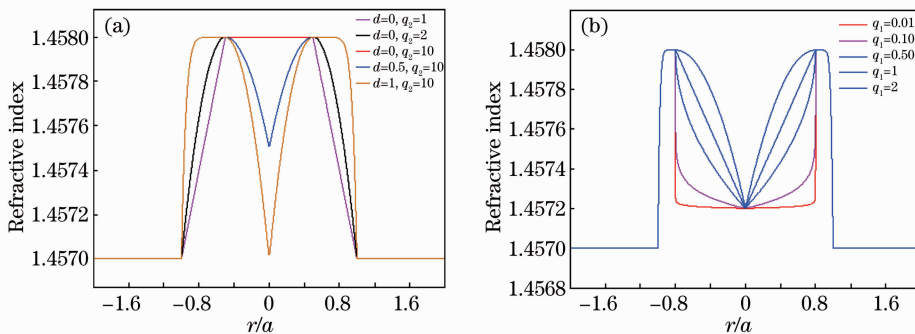


图 1 采用(1)式统一折射率分布函数表示时,不同参数对应的各种折射率形状。

(a)  $d$  和  $q_2$  变化时的折射率分布;(b)  $q_1$  变化时的折射率分布

Fig. 1 Variation of the index profile with the index parameters shown in Eq. (1). (a) Different  $d$  and  $q_2$ ; (b) different  $q_1$

## 3 大功率光纤的主要传输特性及其随折射率分布参数的变化

对用于大功率光纤激光与放大器、大功率传输的大芯径、低数值孔径光纤,其主要传输特性包括等效模面积  $A_{\text{eff}}$ , 模式功率密度在光纤横截面分布的最大值  $D_{\text{max}}$  以及基模与高阶模的等效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$ 。为避免大功率激光对光纤的损伤和 nonlinear 效应,我们认为降低  $D_{\text{max}}$  十分关键。这 3 个参数的定义和计算公式如下。

等效模面积<sup>[1]</sup>

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left[ \int_0^{\infty} |E_{01}(r)|^2 r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} |E_{01}(r)|^4 r dr}, \quad (3)$$

式中  $E_{01}(r)$  为  $LP_{01}$  模的横向电场分布。

最大功率密度  $D_{\text{max}}$ , 定义归一化的模式功率密度为

$$D(r) = \frac{|E_{01}(r)|^2}{\int_0^{\infty} |E_{01}(r)|^2 2\pi r dr}, \quad (4)$$

$D(r)$  在光纤横截面的最大值用  $D_{\text{max}}$  表示。

模式等效折射率差

$$\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}2}, \quad n_{\text{eff}i} = \beta_i/k, \quad k = 2\pi/\lambda, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

式中  $\beta_i$  为模式  $i$  的传输常数,  $i = 1, 2$  分别对应基模和  $LP_{11}$  高阶模。

下面分别计算和讨论这些传输特性随(1)式所示的光纤折射率分布参数的变化, 研究通过折射率分布参数的优化设计, 降低光纤中基模的最大功率密度, 增大基模的等效面积, 提高光纤的大功率承受能力。

根据文献[1]中设计大芯径光纤所选择的参数, 为方便比对, 本文仿真计算时统一取光纤的主要参数如下: 纤芯半径  $a = 25 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.458$ ,  $n_2 = 1.457$ , 光纤包层半径设为无限大, 工作波长  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 。

### 3.1 基模功率密度分布随折射率形状的变化

从图 2(a)~(d) 可以看到当折射率参数  $q_1, q_2, d, c$  分别变化时, 归一化功率密度分布曲线  $D(r)$  随之变化的情况。可见折射率形状参数对功率密度在光纤横截面上的分布有很大影响, 在折射率分布中引入凹陷 ( $d > 0$ ) 可以有效降低功率密度的最大值。增大凹陷区宽度 ( $c$  变大) 和  $q_2$  以及减小  $q_1$  (增大凹陷面积) 也可以达到降低功率密度最大值、提高光纤大功率承受能力的目的。

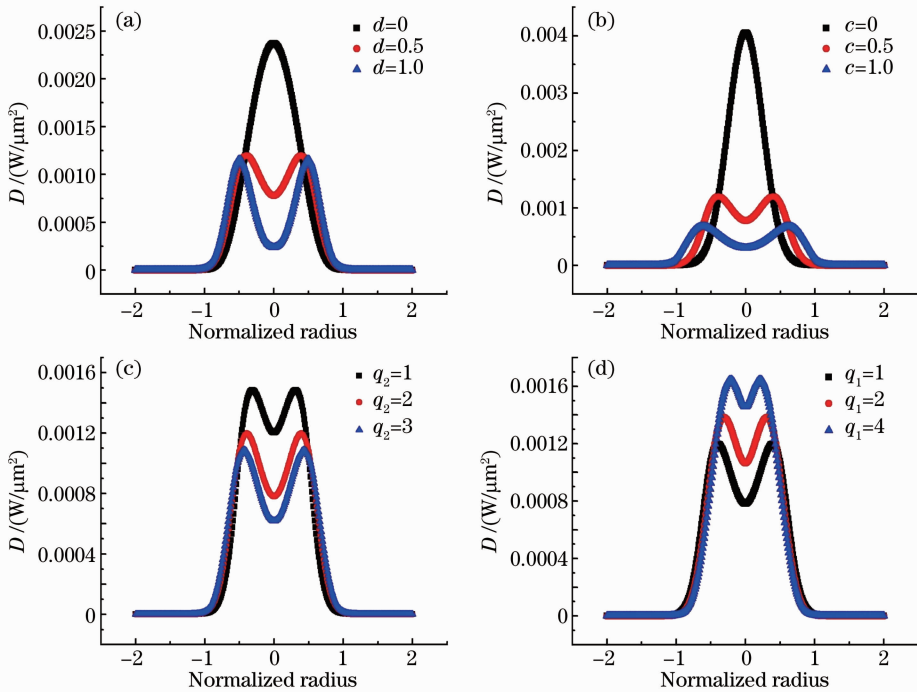


图 2 基模归一化功率密度分布随折射率分布形状变化的典型曲线。(a)  $q_1 = 1, q_2 = 2, c = 0.5, d = 0, 0.5, 1.0$ ; (b)  $q_1 = 1, q_2 = 2, d = 0.5, c = 0, 0.5, 1.0$ ; (c)  $q_1 = 1, d = c = 0.5, q_2 = 1, 2, 3$ ; (d)  $q_2 = 2, d = c = 0.5, q_1 = 1, 2, 4$   
Fig. 2 Change of the distribution of the normalized power density of the fundamental mode with the index profile. (a)  $q_1 = 1, q_2 = 2, c = 0.5, d = 0, 0.5, 1.0$ ; (b)  $q_1 = 1, q_2 = 2, d = 0.5, c = 0, 0.5, 1.0$ ; (c)  $q_1 = 1, d = c = 0.5, q_2 = 1, 2, 3$ ; (d)  $q_2 = 2, d = c = 0.5, q_1 = 1, 2, 4$

### 3.2 $D_{\max}$ , $A_{\text{eff}}$ 与 $\Delta n_{\text{eff}}$ 随折射率分布参数的变化

为了更清楚、定量地说明折射率形状对最大功率密度和等效模面积的影响,从图 2 和定义式(3)~(5)式可以计算  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$  与  $\Delta n_{\text{eff}}$  随各折射率形状参数的变化曲线,如图 3~6 所示。为了对比传输特性相对于阶跃型光纤的改善程度,阶跃型光纤对应的  $D_{\max}$  值也在图中给出。

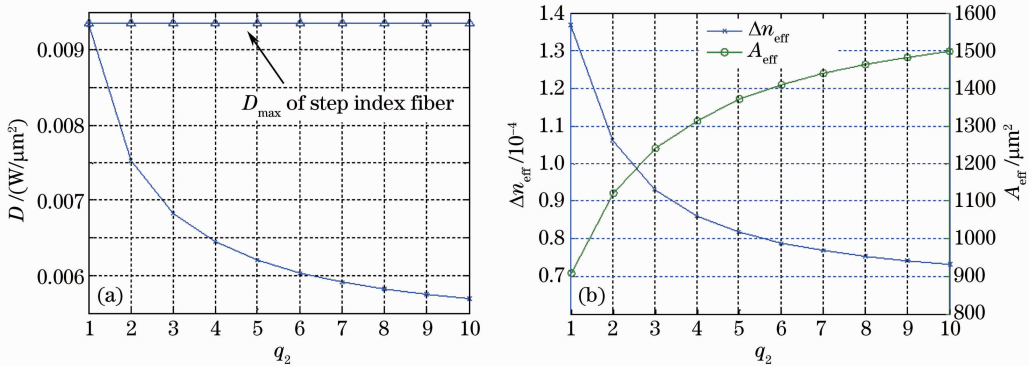


图 3  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$  与  $\Delta n_{\text{eff}}$  随折射率分布参数  $q_2$  的变化。计算所用参数:  $d=c=0.5$ ,  $q_1=1$ 。(a)最大功率密度;  
(b)基模等效面积与等效折射率差

Fig. 3 Variation of  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  with the parameter of the index profile  $q_2$ . The other parameters used in the calculation:  $d=c=0.5$ ,  $q_1=1$ . (a)  $D_{\max}$  versus  $q_2$ ; (b)  $A_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  versus  $q_2$

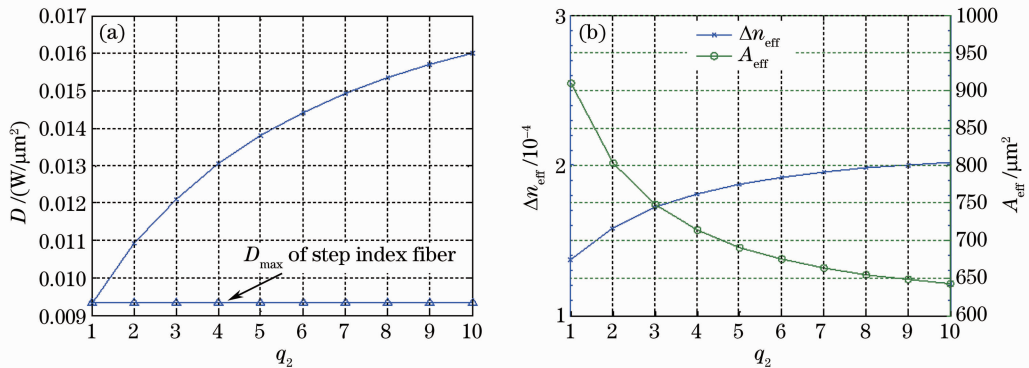


图 4  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$  与  $\Delta n_{\text{eff}}$  随折射率分布参数  $q_1$  的变化。计算所用参数:  $d=c=0.5$ ,  $q_2=1$ 。(a)最大功率密度;  
(b)基模等效面积与等效折射率差

Fig. 4 Variation of  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  with the parameter of the index profile  $q_1$ . The other parameters used in the calculation:  $d=c=0.5$ ,  $q_2=1$ . (a)  $D_{\max}$  versus  $q_1$ ; (b)  $A_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  versus  $q_1$

从图 3(a)可以看出,当  $d, c, q_1$  固定时,  $q_2$  的增大(折射率接近阶跃型分布)会使芯区最大功率密度  $D_{\max}$  下降;而从图 4(a)可以看出,当  $d, c, q_2$  固定时,  $q_1$  的增大(对照图 1 可知这时折射率在中心的凹陷面积减小)又会导致芯区最大功率密度  $D_{\max}$  上升。和阶跃型光纤的  $D_{\max}$  相比,在折射率分布中心引入凹陷可以有效降低芯区的  $D_{\max}$ , 达到提升光纤最大可承受功率的目的。

### 3.3 折射率分布参数优化对光纤功率传输能力的改善

从上一节的仿真曲线可知,光纤折射率形状对基模场在横截面最大功率密度的数值有很大影响,通过合理设计光纤折射率分布参数,可以有效降低模式功率密度的最大值,避免光纤材料的激光损伤和非线性效应,提升光纤功率传输的能力。但通过折射率参数的改变降低最大功率密度又受限于基模与高阶模的等效折射率差,因为等效折射率差的下降会使模式之间更易发生随机耦合,影响输出光的光束质量。因此,以阶跃型光纤为参考,通过仿真计算,在  $\text{LP}_{01}$  与  $\text{LP}_{11}$  模等效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  分别为  $1.0 \times 10^{-4}$ ,  $7.5 \times 10^{-5}$ ,  $5.0 \times 10^{-5}$  的条件下,得到  $D_{\max}$  最小对应的折射率分布参数以及当  $D_{\max}$  与阶跃型光纤的数值相同时光纤最大传输功率的提升幅度。

当阶跃型光纤芯径  $2a=50 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.458$ ,  $n_2=1.457$ ,  $\lambda=1064 \text{ nm}$  时,在传输功率归一化(1 W)条件

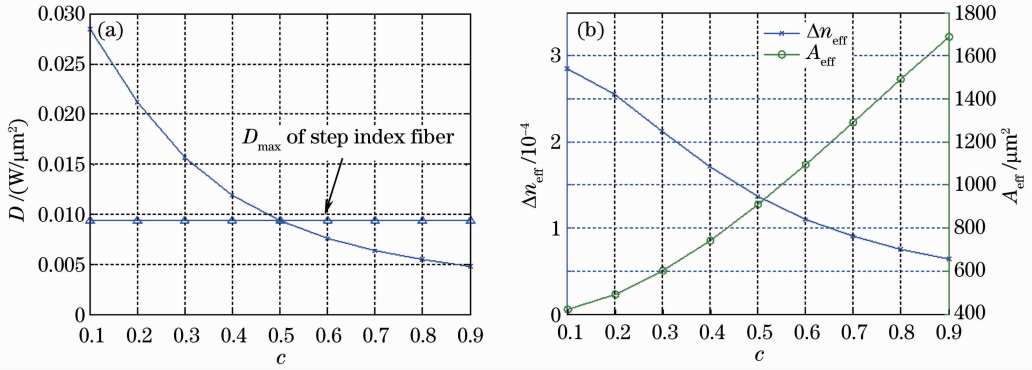


图5  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$ 与  $\Delta n_{\text{eff}}$ 随折射率分布参数  $c$  的变化。计算所用参数:  $q_1=1$ ,  $q_2=2$ ,  $d=0.5$ 。(a)最大功率密度; (b)基模等效面积与等效折射率差

Fig. 5 Variation of  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  with the parameter of the index profile  $c$ . The other parameters used in the calculation:  $q_1=1$ ,  $q_2=2$ ,  $d=0.5$ . (a)  $D_{\max}$  versus  $c$ ; (b)  $A_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  versus  $c$

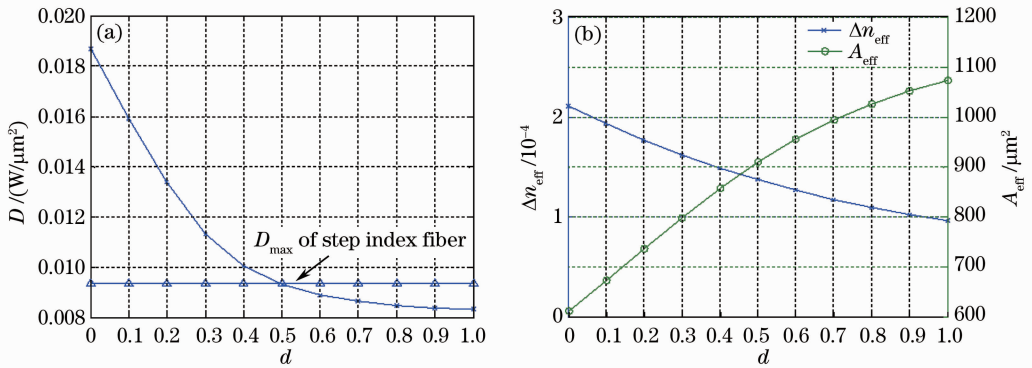


图6  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$ 与  $\Delta n_{\text{eff}}$ 随折射率分布参数  $d$  的变化。计算所用参数:  $q_1=1$ ,  $q_2=2$ ,  $c=0.5$ 。(a)最大功率密度; (b)基模等效面积与等效折射率差

Fig. 6 Variation of  $D_{\max}$ ,  $A_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  with the parameter of the index profile  $d$ . The other parameters used in the calculation:  $q_1=1$ ,  $q_2=2$ ,  $c=0.5$ . (a)  $D_{\max}$  versus  $d$ ; (b)  $A_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  versus  $d$

下,通过计算可得其基模场分布对应的最大功率密度和等效模面积分别为  $D_{\max}=1.488 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ ,  $A_{\text{eff}}=1192.369 \mu\text{m}^2$ 。根据改变折射率参数后  $\Delta n_{\text{eff}}$  的不同取值,分别计算  $D_{\max}$  和最大传输功率  $P_{\max}$  的改善程度,结果如表1所示。

表1 折射率参数优化下最大功率密度和最大传输功率的改善情况

Table 1 Improvement of  $D_{\max}$  and the maximum transmission power  $P_{\max}$  in the case of the optimized index parameters

| $\Delta n_{\text{eff}}$ | The optimized index parameters |       |     |     | $D_{\max}/(\text{mW}/\mu\text{m}^2)$ | Relative reduction<br>of $D_{\max}/\%$ | Relative increase<br>of $P_{\max}/\%$ |
|-------------------------|--------------------------------|-------|-----|-----|--------------------------------------|--|---------------------------------------|
|                         | $q_1$                          | $q_2$ | $d$ | $c$ |                                      |  |                                       |
| $1.0 \times 10^{-4}$    | 0.1                            | 2.0   | 0.3 | 0.5 | 1.039                                | 30.17                                  | 43.21                                 |
| $7.5 \times 10^{-5}$    | 0.1                            | 2.0   | 0.4 | 0.7 | 0.752                                | 49.45                                  | 97.82                                 |
| $5.0 \times 10^{-5}$    | 0.01                           | 2.0   | 0.8 | 0.9 | 0.499                                | 66.43                                  | 197.88                                |

由表1可见,基模与  $\text{LP}_{11}$  高阶模的等效折射率差取值越小,  $D_{\max}$  与  $P_{\max}$  的改善量就越大。在  $\Delta n_{\text{eff}}$  取  $1.0 \times 10^{-4}$  这一通常数值时,通过优化折射率分布参数,与阶跃型光纤相比,光纤最大传输功率可提升43.21%;若容许  $\Delta n_{\text{eff}}$  取值下降一半,采用新的折射率优化参数,光纤最大传输功率提升量可达2倍。

## 4 结 论

采用一种统一的折射率分布函数和相关参数,可以模拟实际光纤折射率分布的各种形状,定量、系统地分析和讨论折射率分布形状变化对大芯径功率传输光纤基模的功率密度以及等效模面积和等效折射率差的

影响。在保持一定的等效折射率差的条件下,可以得到优化的折射率分布设计参数,与阶跃型折射率光纤相比,可有效降低基模的最大功率密度,实现不同程度的传输功率提升。

### 参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium doped large core fiber laser with 1.36 kW continuous wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 2 Mali Gong, Yanyang Yuan, Chen Li *et al.*. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3236~3246
- 3 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Mode selection of a tapered large-mode-area fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1625~1628  
李立波, 楼祺洪, 周 军 等. 大模场面积光纤激光器拉锥法模式选择[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1625~1628
- 4 M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, M. Albersen *et al.*. Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1775~1779
- 5 Yuan Yanyang, Gong Mali. Analysis and design of refractive-index and dopant distributions for lager-mode-area fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1355~1359  
袁艳阳, 巩马理. 大模面积光纤中折射率和掺杂分布的设计和分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1355~1359
- 6 Li Jing, Wang Jianjun, Deng Ying *et al.*. Effect of fiber coiling mode on modes excitation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100204  
李 晶, 王建军, 邓 颖 等. 光纤弯曲缠绕方式对模式激发的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(s1): s100204
- 7 Liao Suying. Analysis of mode scalability in lager-mode-area fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(12): 120602  
廖素英. 大模场光纤模场大小提升能力分析[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(12): 120602
- 8 Liao Suying, Gong Mali. New progress of large-mode-area fibers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 455~462  
廖素英, 巩马理. 大模场光纤研究的新进展[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(3): 455~462
- 9 Xu Tuanwei, Li Fang, Liu Yuliang. Spectral characteristics of fiber Bragg gratings in large-mode-area double-clad fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0523006  
徐团伟, 李 芳, 刘育梁. 大模场双包层光纤光栅的光谱特性[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0523006
- 10 Liu Gang, Yang Fei, Ye Qing *et al.*. Study of mode characteristics for large-mode-area double-clad fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605002  
刘 刚, 杨 飞, 叶 青 等. 大模场面积双包层光纤光栅模式特性研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(6): 0605002
- 11 Chen Ming, Li Jianfeng, Wang Yishan *et al.*. Progress of high-order mode-suppression technology in high-power large mode field fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(8): 080002  
陈 明, 李剑峰, 王屹山 等. 高功率大模场光纤激光器高阶模抑制技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(8): 080002
- 12 Yi Changshen, Zhang Peiqing, Dai Shixun *et al.*. Research progress of large-mode area photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(10): 100001  
易昌申, 张培晴, 戴世勋 等. 大模场光子晶体光纤研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(10): 100001