

# 高阶模光纤的设计与分析

廖素英 伍美俊

空军空降兵学院, 广西 桂林 541003

**摘要** 高阶模光纤通常是一种多包层结构的大模场光纤。为了获得模场面积较大的包层高阶模以抑制高功率光纤激光器或放大器中的非线性效应和避免光纤损伤,高阶模光纤的结构参数需要满足一些基本条件。利用波动方程理论推导了多包层阶跃折射率分布的高阶模光纤的特征方程,说明了高阶模光纤结构参数选择的依据和方法,并通过数值计算,分析了高阶模光纤包层的半径及折射率大小对纤芯导模的影响。结果表明,当高阶模光纤的包层半径和折射率大小满足一定的条件时,光纤包层结构不会影响纤芯的模场分布,包层高阶模的模场还会出现均匀分布的特点。

**关键词** 光纤光学; 大模场; 高阶模光纤; 多包层; 特征方程

**中图分类号** TN 248.1; TN 253

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.060602

## Design and Analysis of the High-Order-Mode Fiber

Liao Suying Wu Meijun

*Air Force Airborne Academy, Guilin, Guangxi 541003, China*

**Abstract** Usually, the high-order-mode fiber is a kind of large mode area fiber with multi-cladding. In order to obtain a large mode area to suppress the fiber nonlinear effects and avoid optical damage in high power fiber lasers and amplifiers, the structural parameters of a high-order-mode fiber need to meet certain conditions. The characteristic equation of high-order-mode fiber with multi-cladding and step-index distribution is derived with the theory of wave equation. According to this equation, the basis and method of choosing structural parameters for high-order-mode fiber are also described. And through numerical calculation, it analyzes the influence of the fiber cladding radius and refractive index on the core guided mode. The result shows that, under certain conditions, the cladding structure of the fiber does not affect the mode field distribution in the core and the mode field distribution in fiber cladding of certain high-order-mode can appear uniform distribution.

**Key words** fiber optics; large mode area; high-order-mode fiber; multi-cladding; characteristic equation

**OCIS codes** 060.2270; 060.2310; 060.3510; 140.3510

## 1 引言

为了克服高功率光纤激光器或放大器功率增长中面临的非线性效应和光损伤问题,以进一步提升光纤激光的输出功率,采用大模场光纤作为增益光纤被普遍认为是一种有效的解决途径。为此,大模场光纤的研究成为近几年来光纤激光研究领域的热点之一。多种大模场光纤的技术方案先后被提出来,对光纤激光功率的提高起到了重要作用。这些技术方案包括直棒状光子晶体光纤<sup>[1-3]</sup>、反折射率增益导引光纤<sup>[4-5]</sup>、螺旋耦合芯光纤<sup>[6-8]</sup>、泄露通道光纤<sup>[9-10]</sup>、高阶模光纤<sup>[11-12]</sup>、多芯光纤<sup>[13-14]</sup>等。其中,Ramachandran等<sup>[11]</sup>在2006年提出了高阶模光纤技术方案,将长周期光纤光栅和高阶模光纤配合使用来实现光纤的高阶模与低阶模之间的相互转换,使光场主要以模场面积较大的包层高阶模LP<sub>0n</sub>模存在,不但获得了较大的模场面积(达到2100 μm<sup>2</sup>甚至3200 μm<sup>2</sup>),避免了非线性效应的影响,而且使光纤模场比传统的大芯径低数值孔径光纤的大模场具有更高的稳定性和更低的传输损耗。应用这种高阶模光纤,Ramachandran等不但实现了大模场光纤放大器的运转<sup>[15-16]</sup>,而且还对光纤中的受激布里渊散射(SBS)效率及阈值进行了有效测量<sup>[17]</sup>,使高阶模光纤呈现出

收稿日期: 2014-11-20; 收到修改稿日期: 2015-01-12; 网络出版日期: 2015-05-13

基金项目: 广西自然科学基金(2011GXNSFA018148,2013GXNSFAA019021)

作者简介: 廖素英(1972—),女,博士,副教授,主要从事光纤激光方面的技术研究。E-mail: suying-liao@163.com

良好的应用前景。在有关高阶模光纤的文献报道中,虽然多次提到高阶模光纤需要经过特殊的设计,但至今为止,并没有文献对光纤的设计依据及模场分布性能等进行公开的报道。因此,本文从波动方程出发,应用多层圆波导理论说明了高阶模光纤的设计依据,并对光纤的模场特性进行分析。

## 2 理论基础

在使用高阶模光纤时主要运用其模场面积较大、稳定性相对较好并具有圆对称性、易激发的高阶  $LP_{0N}$  线偏振模等特点进行传导或放大。为了获得高阶  $LP_{0N}$  模,一般采用如图 1 所示的多包层均匀圆波导折射率分布的光纤,光纤的中间纤芯为能支持少数低阶模的圆波导,紧挨着纤芯的第一包层即为形成高阶模的包层区域,其大小和折射率分布根据所需高阶模的阶次确定。假设高阶模光纤为  $N$  层阶跃折射率分布,从纤芯到外包层各层的折射率大小依次为  $n_1, n_2, \dots, n_i (i=1, 2, \dots, N)$ , 各层半径的大小依次为  $a_1, a_2, \dots, a_N$ , 并且相邻两层介质之间的折射率差较小,满足弱导近似条件,则依据波导理论,光纤各层的模场分布满足亥姆霍兹方程。在选取光纤轴向的柱坐标系  $(r, \theta, z)$  中,应用分离变量法可得到高阶  $LP_{0N}$  模的电场分量  $E_y$  或  $E_x$  满足的标量亥姆霍兹方程为

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + [k_0^2 n^2(r, \theta) - \beta^2] \right\} \cdot E_y(r, \theta) = 0. \quad (1)$$

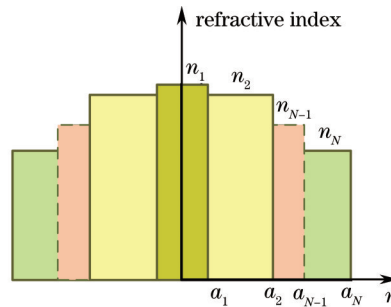


图 1 多包层光纤的横截面折射率分布

Fig.1 Cross-sectional refractive index profile of a multi-cladding fiber

参考波动方程求解的基本方法<sup>[18]</sup>并结合光纤波导的结构特点,可知方程的解在芯层中必须有限、在外包层中必须保持  $r \rightarrow \infty$  时场衰减到零,因此满足(1)式的高阶  $LP_{0N}$  模的特解形式可设为

$$E_y(r, \theta) = \begin{cases} A_1 J_0(u \cdot r) \cdot f(\theta), & r < a_1 \\ [A_i J_0(v_i \cdot r) + \bar{A}_i N_0(v_i \cdot r)] \cdot f(\theta), & a_{i-1} < r < a_i, i = 2, 3, \dots, N-1, \\ \bar{A}_N K_0(v_N \cdot r) \cdot f(\theta), & r > a_{N-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $J_0$ 、 $N_0$  分别为 0 阶的第一类和第二类贝塞尔函数,  $K_0$  为 0 阶的第二类变形贝塞尔函数;  $f(\theta)$  描述模场随方位角的变化,它根据模场的旋转方向,分别按正弦规律和余弦规律变化,相应的模场分布通常称为奇模和偶模;  $A_i$ 、 $\bar{A}_i (i=1, 2, \dots, N)$  为模场的待定系数,由模场的边界条件及传输能量大小确定,表示各分量的相对大小,但不都是独立的,其中只有一个是独立变化的。波导参数  $u$ 、 $v_i$  定义为

$$u = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}, \quad (3)$$

$$v_i = \sqrt{|\beta^2 - n_i^2 k_0^2|}, \quad (4)$$

式中  $\beta$  表示导模沿轴向的传播常数,是区别一个分离模式的基本参量,它与模式场的等效折射率  $n_{\text{eff}}$  及真空中的波数  $k_0$  之间存在关系为  $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ , 即  $\beta$ 、 $n_{\text{eff}}$  描述了导模在轴向上的相位传播速度。

利用模场分布在边界上连续的条件,即在光纤的纤芯和第 1 包层界面及第  $N-1$  包层和第  $N$  包层的界面上,电磁场分量  $E_y$ 、 $E_z$  连续,因此有

$$\begin{vmatrix} J_0(u \cdot a_1) & -J_0(v_2 \cdot a_1) & -N_0(v_2 \cdot a_1) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & J_0(v_2 \cdot a_2) & N_0(v_2 \cdot a_2) & -J_0(v_3 \cdot a_2) & -N_0(v_3 \cdot a_2) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -K_0(v_N \cdot a_{N-1}) \\ uJ_0'(u \cdot a_1) & -v_2J_0'(v_2 \cdot a_1) & -v_2N_0'(v_2 \cdot a_1) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & v_2J_0'(v_2 \cdot a_2) & v_2N_0'(v_2 \cdot a_2) & -v_3J_0'(v_3 \cdot a_2) & -v_3N_0'(v_3 \cdot a_2) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -v_NK_0'(v_N \cdot a_{N-1}) \end{vmatrix} = 0. \quad (5)$$

(5)式为多包层高阶模光纤的导模传播常数  $\beta$  及光纤结构参数应满足的特征方程,是设计高阶模光纤参数的基本依据。当光纤某些介质层的半径大小或折射率分布确定后,根据(5)式可以确定其他光纤层的折射率分布或半径大小。下面以3层、4层阶跃光纤为例来说明高阶模光纤结构参数的选择。

### 3 高阶模光纤结构参数的设计

对于3层阶跃光纤结构,特征方程(5)可以简化为

$$\begin{aligned} & v_2^2 J_0(u \cdot a_1) \cdot K_0(v_3 \cdot a_2) \cdot J_0'(v_2 \cdot a_1) \cdot N_0'(v_2 \cdot a_2) + v_2 v_3 J_0(u \cdot a_1) \cdot J_0(v_2 \cdot a_2) \cdot N_0'(v_2 \cdot a_1) \cdot K_0'(v_3 \cdot a_2) + \\ & uv_3 J_0(v_2 \cdot a_1) \cdot N_0(v_2 \cdot a_2) \cdot J_0'(u \cdot a_1) \cdot K_0'(v_3 \cdot a_2) + uv_2 N_0(v_2 \cdot a_1) \cdot K_0(v_3 \cdot a_2) \cdot J_0'(u \cdot a_1) \cdot J_0'(v_2 \cdot a_2) = \\ & v_2^2 J_0(u \cdot a_1) \cdot K_0(v_3 \cdot a_2) \cdot N_0'(v_2 \cdot a_1) \cdot J_0'(v_2 \cdot a_2) + v_2 v_3 J_0(u \cdot a_1) \cdot N_0(v_2 \cdot a_2) \cdot J_0'(v_2 \cdot a_1) \cdot K_0'(v_3 \cdot a_2) + \\ & uv_2 J_0(v_2 \cdot a_1) \cdot K_0(v_3 \cdot a_2) \cdot J_0'(u \cdot a_1) \cdot N_0'(v_2 \cdot a_2) + uv_3 J_0(v_2 \cdot a_2) \cdot N_0(v_2 \cdot a_1) \cdot J_0'(u \cdot a_1) \cdot K_0'(v_3 \cdot a_2) \end{aligned}, \quad (6)$$

利用(5)式中各参数的约束关系,并结合实际应用的具体情况,3层阶跃光纤结构参数确定的基本思路为:1)考虑到高阶模光纤在应用于激光增益放大时,一般选择其第  $N$  阶包层模  $LP_{0N}$  进行放大,即这时是在紧挨纤芯的第一包层介质内掺入增益粒子,从而使能量分布大部分集中在包层中的高阶  $LP_{0N}$  模,能够在增益竞争中获得优势而被有效放大,而能量分布主要集中在纤芯的纤芯导模则由于得不到足够的增益而被抑制。利用这一特点,可以把影响输出激光的光束质量较大的  $LP_{11}$  模设计为纤芯导模,这样就可以通过增益竞争把它滤除。根据光纤中  $LP$  模的出现顺序与归一化频率  $V$  的关系<sup>[18]</sup>,只需使光纤的纤芯  $V$  参数值小于 3.83 即可以达到要求。2)考虑到纤芯导模在光纤中主要起导引作用,同时也为了减少高阶模在纤芯中的能量分布,纤芯半径的大小不宜选得太大,因此通常会选择纤芯半径的尺寸与单模光纤的半径大小相当。这样,纤芯的折射率大小、纤芯半径等参数基本能够确定下来。

纤芯的折射率、半径大小选定后,可以根据这些参数求解二层均匀光纤的以下特征方程:

$$\frac{uJ_m(u \cdot a_1)}{J_m(u \cdot a_1)} = \frac{v_2 K_m(v_2 \cdot a_1)}{K_m(v_2 \cdot a_1)}, \quad (7)$$

由(7)式解出光纤结构的纤芯基模场分布及其  $\beta$  传播常数(当然也可以求解其他阶次模的传播常数),这一模场分布实际上是把第一包层大小当做无限大时的二层均匀光纤的基模场分布,它与第一包层半径取得较大时的多层高阶模光纤的基模场分布相似。由于基模场分布在包层内的衰减特点,只要选择第一包层半径的大小超出纤芯半径大小的5倍时,纤芯的基模场分布便可认为不再受到外包层半径大小或折射率大小的影响。此时将前面由(7)式计算得到的纤芯基模的  $\beta$  传播常数作为同样芯径大小的多包层光纤的纤芯基模传播常数,将其代入(6)式,然后根据各结构参数之间的约束关系,则可以确定外包层的折射率分布或半径的大小及其对模场的影响。

### 4 结果分析

根据第3部分介绍的思路,对阶跃折射率分布的三层、四层高阶模光纤分别进行了计算。对于三层光纤结构来说,在选定纤芯折射率、半径大小和第一包层折射率大小后(这里选取  $n_1 = 1.465$ ,  $a_1 = 2.5 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 1.4525$ ),对波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  的光波模场的计算结果表明,纤芯能够传播的线偏振模包括  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模、包层高阶模的数量、阶次则随第一包层半径的大小和第二包层介质折射率的变化而变化。图2为第二包层半径大小变化对纤芯导模和包层高阶模的模场传播常数、模场面积和传播损耗的影响。在计算中选择的

参数能够保证  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模始终为纤芯导模、 $LP_{02}$  模~ $LP_{05}$  模始终为包层高阶模。从图 2(a) 结果可看出, 当第一包层半径保持不变时(计算时选为  $27.5 \mu\text{m}$ ), 第二包层半径从  $70 \mu\text{m}$  缩小到  $40 \mu\text{m}$  的过程中, 纤芯导模和包层  $LP_{0N}$  模的传播常数、模场面积都基本不发生变化, 只有在第二包层半径接近第一包层半径大小(小于  $40 \mu\text{m}$  后), 包层高阶模的传播常数、模场面积才开始出现变化; 继续减小第二包层的半径大小到  $35 \mu\text{m}$  时, 纤芯导模的传播常数及模场面积也出现些许变化, 但变化都非常小。在第二包层半径大小变化的整个过程中, 纤芯导模的传播损耗都保持非常小的数量级, 而包层  $LP_{0N}$  模的传播损耗在第二包层半径较大时, 也保持较小的数量级, 只有在第二包层的半径小于  $50 \mu\text{m}$  (第一包层半径的 1.25 倍) 后, 才出现明显增长的趋势, 如图 2(c) 所示。这表明, 第二包层的半径较大时, 其大小变化对包层高阶模的模场特性影响甚微, 更不会影响纤芯导模的模场分布。

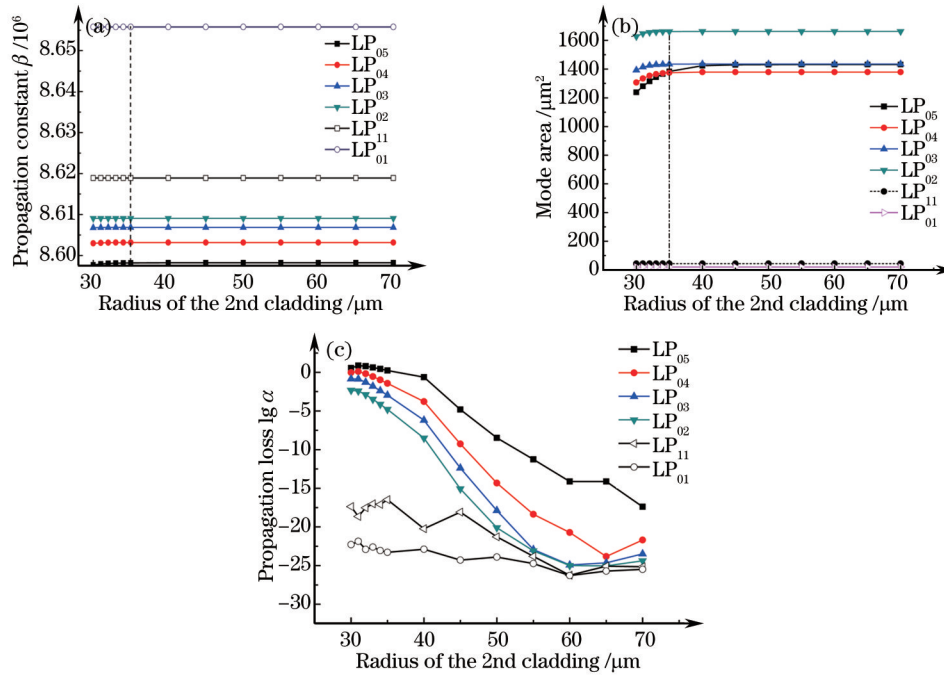


图 2 (a) 模场传播常数、(b) 模场面积和(c) 模场传播损耗随第 2 包层半径的变化

Fig.2 (a) Propagation constants, (b) mode areas and (c) propagation losses vary with the 2nd cladding radius

同样, 保持其他参数不变, 当改变第二包层的折射率大小时, 纤芯导模  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模和包层  $LP_{0N}$  模 ( $N \neq 1$ ) 的模场特性计算结果如图 3 所示。结果表明, 在第二包层的折射率大小从 1.45 增加到 1.455 的过程中, 纤芯导模  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模的传播常数及模场面积基本不发生变化, 而包层高阶模  $LP_{02}$ 、 $LP_{03}$  模的传播常数和模场面积则随着第二包层折射率的增加出现先增后减的变化, 主要原因是第一、二包层之间的折射率差出现了先减后增的变化, 使得第一包层对包层高阶模的模场约束能力呈现先下降而后上升的趋势。在模场约束能力下降时, 原本能够在光纤中传导的  $LP_{04}$ 、 $LP_{05}$  模或更高阶模变成辐射模而消失; 一直能够存在的  $LP_{02}$ 、 $LP_{03}$  模的模场面积在模场约束力下降时增加, 而在模场约束力增加时则减少, 所以出现先增后减的变

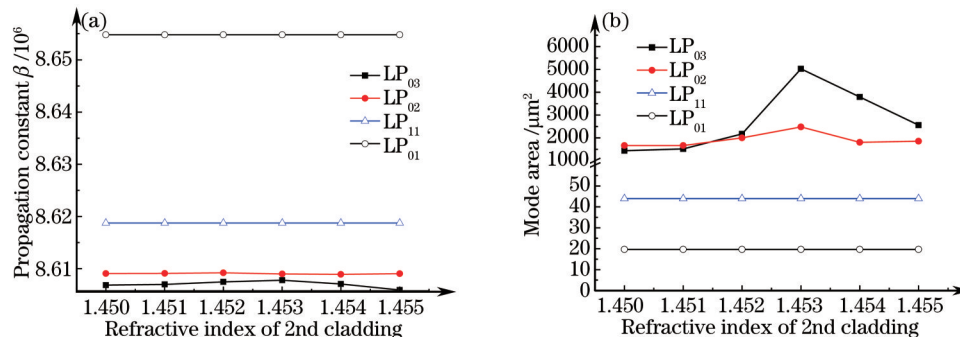


图 3 (a) 模场传播常数和(b) 模场面积随第 2 包层折射率的变化

Fig.3 (a) Propagation constants and (b) mode areas vary with the 2nd cladding refractive index

化。但在整个变化过程中,纤芯导模的传播常数和模场面积基本不受到第二包层折射率变化的影响。

当第一包层的半径大小变化时,纤芯导模和包层  $LP_{0N}$  模 ( $N \neq 1$ ) 的模场传播常数及能量比例的变化规律如图 4 所示,当第一包层半径大小由  $30 \mu\text{m}$  减到  $5 \mu\text{m}$  时,纤芯导模  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模的传播常数及第一包层内的能量比例基本保持不变,只有在第一包层的半径非常接近纤芯半径时,  $LP_{11}$  模的能量比例才发生稍许变化,而包层高阶模的能量比例及传播常数则随着包层半径减少而显著减少。这意味着,只要第一包层的半径明显大于纤芯半径,其尺寸的变化便基本不会影响纤芯导模的分布。

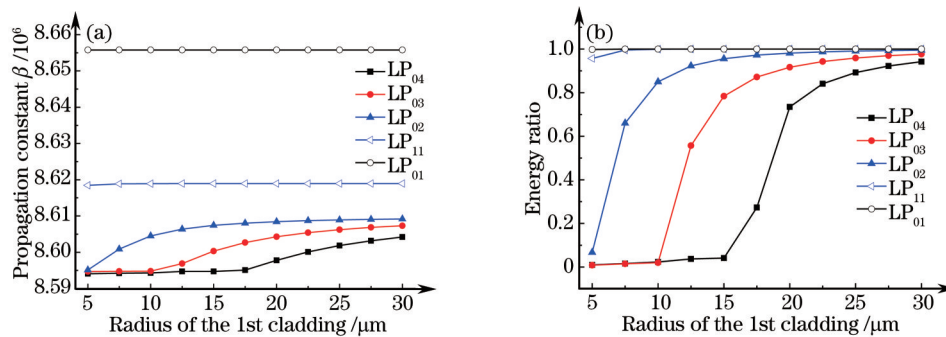


图 4 (a) 模场传播常数和(b)模场能量比例随第 1 包层半径的变化

Fig.4 (a) Propagation constants and (b) mode energy ratios vary with the 1st cladding radius

前面的计算反映了一个共同特点,即在第一包层的半径明显大于纤芯半径的情况下,纤芯导模的分布基本不会受到其他包层半径大小或折射率大小变化的影响。这一特点可以从光纤中模场分布(2)式的特点得到解释。根据贝塞尔函数的变化规律,纤芯导模在包层中的分布是迅速衰减的,并且能够渗入到包层的距离有限,所以当包层半径大小大于模场的衰减距离后,纤芯导模的分布就不会再受到包层的影响。对于多包层的光纤结构,经过类似的计算也得到了相同的结论。这就是为什么在前面能够用单包层光纤的纤芯导模传播常数代替同样纤芯结构的多包层高阶模光纤的纤芯导模传播常数的原因。

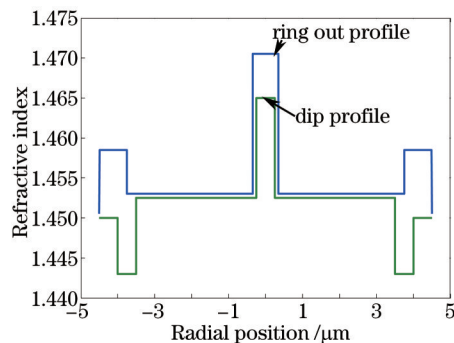
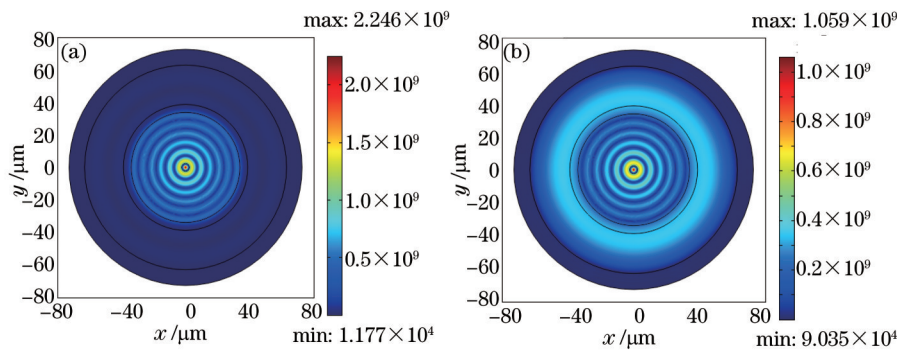


图 5 光纤横截面的沟槽形和环凸形折射率分布

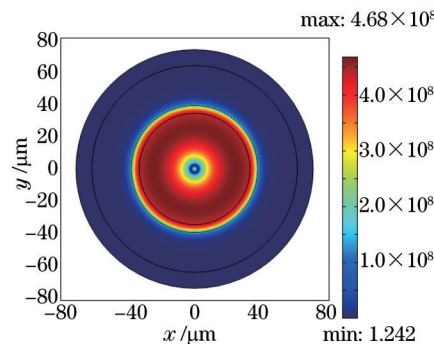
Fig.5 Dip and ring out refractive index profile in fiber cross section

考虑到三层光纤结构参数可以调整的自由度有限,要想获得类似于图 3(b)中所示的较大模场面积的光纤结构(图中当  $a_1=2.5 \mu\text{m}$ ,  $a_2=27.5 \mu\text{m}$ ,  $a_3=65 \mu\text{m}$ ;  $n_1=1.465$ ,  $n_2=1.4525$ ,  $n_3=1.453$  时,  $LP_{03}$  模的模场面积达到  $5029 \mu\text{m}^2$ )比较困难,因此在设计较大模场面积的高阶模光纤结构时,通常会采用四层或更多层的光纤结构。图 5 是四层光纤结构,光纤横截面上的折射率分布可以是沟槽形分布,也可以是环凸形分布,这两种光纤的高阶模模场分布有着明显区别。如图 6 所示,与同样阶次的  $LP_{07}$  模相比,在条件尽可能相同的条件下,沟槽形光纤的模场分布能量较多地集中在第一包层以内,模场相对较稳定;而环凸形光纤的模场分布面积大,能量有一部分扩散到了外包层中,易造成损耗。实际设计光纤时,往往需要在模场面积和模场稳定性两者之间权衡利弊,以获得模场面积既大又稳定的光纤结构。

对于四层高阶模的光纤结构,可以通过改变第二层、第三层或第四层介质的尺寸大小、折射率分布等因素,以获得不同需求的高阶模光纤。根据(5)式计算得到,当光纤的结构参数选择为  $a_1=2.5 \mu\text{m}$ ,  $a_2=35 \mu\text{m}$ ,  $a_3=40 \mu\text{m}$ ,  $a_4=65 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.465$ ,  $n_2=1.4525$ ,  $n_3=1.453$ ,  $n_4=1.45$  或  $a_1=2.5 \mu\text{m}$ ,  $a_2=40 \mu\text{m}$ ,  $a_3=45 \mu\text{m}$ ,  $a_4=65 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.465$ ,  $n_2=1.4525$ ,  $n_3=1.458$ ,  $n_4=1.45$  时,包层  $LP_{02}$  模在第一包层中的模场分布都表现为图 7 所示的均匀分

图6 (a) 沟槽形光纤和(b)环凸形光纤的 $LP_{07}$ 模场分布Fig.6 Mode field distributions of  $LP_{07}$  in (a) dip profile fiber and (b) ring out profile fiber

布,仅第一包层以内的等效模场面积分别达到 $3651.6 \mu\text{m}^2$ 和 $3614.5 \mu\text{m}^2$ ,具备了较大的模场面积。其他高阶模如 $LP_{03}$ 模、 $LP_{04}$ 模也具有较大的模场面积,分别达到 $1906.8 \mu\text{m}^2$ 和 $1720.6 \mu\text{m}^2$ 。当把这样的光纤用于光纤放大器或激光器,并配合光栅使用,选择性地激励某一高阶 $LP_{0N}$ 模( $N \neq 1$ ),则有利于抑制非线性效应和光纤损伤,提升激光功率。因此,对光纤放大器或激光器来说,具有重要作用。

图7 均匀分布的 $LP_{02}$ 模场Fig.7 Uniform mode field distribution of  $LP_{02}$ 

## 5 结 论

高阶模光纤在光纤放大器或激光器中配合长周期光栅使用,可以利用其模场面积较大、稳定性好并且具有圆对称性、易激发的高阶 $LP_{0N}$ 线偏振模( $N \neq 1$ )等特点进行传导或放大,对于提高光纤放大器或激光器的功率极其有利。这种光纤通常采用多包层阶跃折射率分布的结构,其实质是一种多包层光纤结构。为了获得模场面积较大的高阶 $LP_{0N}$ 模( $N \neq 1$ ),光纤的纤芯通常设计为能够传导少量阶次模(一般是 $LP_{01}$ 、 $LP_{11}$ 模)的细小纤芯,半径大小接近于单模光纤的纤芯半径,这样,第一包层半径大小只要大于5倍以上的纤芯半径大小,纤芯的模场分布将基本不受到第一包层大小变化的影响,其他包层的折射率、尺寸大小变化也不会影响纤芯导模的模场分布。这一特点及多包层光纤模场分布满足的特征方程成为高阶模光纤结构参数确定的依据。通过调整某些包层的折射率大小或半径大小,可以改变光纤包层高阶模的分布,确保所需阶次的包层高阶模能够在光纤中传导。当这些结构参数满足一定条件时,可以使包层 $LP_{0N}$ 模呈现出均匀的模场分布,从而获得较大的模场面积,以满足实际应用的需要。

## 参 考 文 献

- 1 J Limpert, O Schmidt, J Rothhardt, *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. Opt Express, 2006, 14 (7): 2715-2720.
- 2 O Hans-Jürgen, S Fabian, M Norbert, *et al.*. 2 kW average power from a pulsed Yb-doped rod-type fiber amplifier[J]. Opt Lett, 2014, 39(22): 6446-6449.
- 3 Li Pingxue, Zhao Ziqiang, Zhang Guangju, *et al.*. Large-mode-area double-cladding Yb-doped photonic crystal fiber Q-switched mode-locked laser with graphene-based saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402001.

- 李平雪, 赵自强, 张光举, 等. 大模场双包层光子晶体光纤反射式石墨烯被动调Q锁模激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402001.
- 4 C Ying, M Timothy, S Vikas, *et al.*. Very large-core, single-mode, gain-guided, index-antiguide fiber lasers[J]. Opt Lett, 2007, 32(17): 2505-2507.
- 5 H William, C Ying, W Xiangru, *et al.*. Scalable side-pumped, gain-guided index-antiguide fiber laser[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(12): 2451-2459.
- 6 M C Swan, C H Liu, D Guertin, *et al.*. 33  $\mu\text{m}$  core effectively single-mode chirally-coupled-core fiber laser at 1064-nm [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2008: OWU2.
- 7 Zhao Nan, Li Jinyan. Introduction and progress of chirally coupled core fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040003.
- 赵楠, 李进延. 手性耦合纤芯光纤简介及研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040003.
- 8 Zhu C, Hu I, Ma X, *et al.*. Single-frequency and single-transverse mode Yb doped CCC fiber MOPA with robust polarization SBS-free 511 W output[C]. J Advanced Solid-State Photonics, 2011: AMC5.
- 9 L Dong, J Li, X Peng. Bend-resistant fundamental mode operation in ytterbium-doped leakage channel fibers with effective areas up to 3160  $\mu\text{m}^2$ [J]. Opt Express, 2006, 14(24): 11512-11519.
- 10 L Dong, X Peng, J Li. Leakage channel optical fibers with large effective area[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(8): 1689-1697.
- 11 S Ramachandran, J W Nicholson, S Ghalmi, *et al.*. Light propagation with ultra-large modal areas in optical fibers[J]. Opt Lett, 2006, 31(12): 1797-1799.
- 12 J M Fini, S Ramachandran. Natural bend-distortion immunity of higher-order-mode large-mode-area fibers[J]. Opt Lett, 2007, 32(7): 748-750.
- 13 L Michaille, D M Taylor, C R Bennett, *et al.*. Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area[J]. Opt Lett, 2008, 33(1): 71-73.
- 14 Yang Fang, Tang Ming, Li Borui, *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.
- 15 J W Nicholson, J M Fini, A M DeSanto, *et al.*. A higher-order-mode erbium-doped-fiber amplifier[J]. Opt Express, 2010, 18(17): 17651-17657.
- 16 R S Quimby, T F Morse, R L Shubochkin, *et al.*. Yb<sup>3+</sup> ring doping in high-order-mode fiber for high-power 977-nm lasers and amplifiers[J]. J Sel Top in Quantum Electron, 2009, 15(1): 12-19.
- 17 M D Mermelstern, S Ramachandran, J M Nicholson, *et al.*. SBS gain efficiency measurements and modeling in a 1714  $\mu\text{m}^2$  effective area LP<sub>08</sub> higher-order mode optical fiber[J]. Opt Express, 2007, 15(24): 15952-15963.
- 18 Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

栏目编辑: 王晓球