

文章编号: 0258-7025(2008)09-1355-05

大模面积光纤中折射率和掺杂分布的设计和分析

袁艳阳 巩马理

(清华大学精密系光子与电子技术研究中心, 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 从无源光纤的模场理论和有源光纤的速率方程理论出发, 给出了任意折射率分布和掺杂分布光纤的有效模面积和基模提取效率的计算方法, 并且通过数值计算对几种典型折射率分布和掺杂分布的光纤性能进行了分析和比较, 说明复合折射率光纤与其他传统光纤相比, 在百微米量级的大模面积光纤中更具有实用性。

关键词 激光器; 光纤激光器; 大模面积光纤; 折射率分布; 掺杂分布

中图分类号 TN 248.1; TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1355

Analysis and Design of Refractive-Index and Dopant Distributions for Large-Mode-Area Fibers

Yuan Yanyang Gong Mali

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Based on the mode field theory of passive fiber and rate equation of active fiber, the calculative method of effective mode area and extraction efficiency of fundamental mode for large mode area fibers with arbitrary refractive-index profile and dopant distribution of is presented. The performance of various designs for the core refractive-index and dopant distributions of large-mode-area fibers are numerically simulated and compared. The analysis shows that the hybrid profile fiber exhibits better overall performance than other traditional fibers in the design of large-mode-area fibers with core diameter of hundreds of microns.

Key words lasers; fiber lasers; large-mode-area fiber; refractive-index profile; dopant distribution

1 引 言

光纤激光器与传统固体激光器相比, 具有转换效率高、光束质量好、热控管理方便、结构紧凑灵活等多方面的优势, 在光通信、光传感、激光医疗、工业加工、航空航天等领域得到了广泛的应用。近年来, 随着光纤设计和工艺的改进、抽运源功率的提高和新的抽运耦合技术的出现, 双包层光纤激光器的输出功率已经突破 1000 W 大关^[1~4]。

然而, 单根光纤输出的光纤激光器的功率进一步提高主要受制于光纤中的受激拉曼散射、受激布里渊散射和自相位调制等非线性效应。由于这些非线性效应的阈值功率与光纤有效模面积和有效长度

的比值成正比, 因此采用大模面积光纤是解决这个问题的有效途径。但是, 随着光纤芯径的增加, 光纤输出模式也随之增多, 输出光束质量变差。虽然减小光纤的数值孔径可以一定程度上改善输出光束质量, 但是当光纤数值孔径小于 0.05 时, 光纤对弯曲非常敏感, 这给光纤封装和实际应用带来困难。

为了改善传统光纤中高功率和高光束质量的矛盾, 国内外研究人员采用各种选模方法来提高大模面积光纤中基模的提取效率。这些选模方法包括弯曲选模^[5,6]、光锥选模^[7,8]、增益控制选模^[9,10]和腔镜选模^[11,12]等, 其基本思想都是在腔内引入对高阶模更高的损耗或者对基模更高的增益从而尽可能提高

收稿日期: 2007-12-29; 收到修改稿日期: 2008-02-29

作者简介: 袁艳阳(1978—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。

E-mail: yyy01@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 巩马理(1959—), 男, 四川人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术与光电子信息工程方面的研究。

E-mail: gongml@mail. tsinghua. edu. cn

基模的输出效率。对于光纤自身,有两个重要的方面在设计中值得考虑:光纤的折射率分布和掺杂分布。一般来说,光纤芯径和折射率分布决定了有效模面积,而光纤折射率分布和掺杂分布两者共同影响基模提取效率。因此,研究光纤中折射率分布和掺杂分布对设计大模面积光纤有着重要的意义。

2 设计目标和理论

2.1 设计目标

限制光纤功率的主要参数是光纤有效模面积,一般来说,大多数应用关心的是基模输出,所以将基

$$\pm \frac{dP_i^\pm(z)}{dz} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^a [\sigma_{ei} N_2(r, \varphi, z) - \sigma_{ai} N_1(r, \varphi, z)] \Gamma_i(r, \varphi) r dr d\varphi - \alpha_i \right\} P_i^\pm(z), \quad (2)$$

$$\frac{N_2(r, \varphi, z)}{N_1(r, \varphi, z)} = \sum_i \frac{[P_i^+(z) + P_i^-(z)] \sigma_{ai} \Gamma_i(r, \varphi)}{h\nu_i} \left/ \left[\frac{1}{\tau} + \sum_i \frac{[P_i^+(z) + P_i^-(z)] \sigma_{ei} \Gamma_i(r, \varphi)}{h\nu_i} \right] \right., \quad (3)$$

式中 $P_i^\pm(z)$ 为光纤模式 i (当 $i=0$ 时表示抽运光,下同) 沿光纤正向和反向的功率分布; $N_2(r, \varphi, z)$ 和 $N_1(r, \varphi, z)$ 表示稳态时激光上能级和下能级粒子数; $\sigma_{ai}, \sigma_{ei}, \alpha_i$ 和 ν_i 分别为光纤模式 i 的吸收截面、发射截面、损耗系数和频率; a 为纤芯半径, τ 为激光上能级寿命, h 为普朗克常数; $\Gamma_i(r, \varphi)$ 为功率重叠因子分布函数,其定义为

$$\Gamma_i(r, \varphi) = \begin{cases} 1/A_{\text{clad}} & (i=0) \\ \frac{\psi_i(r, \varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty r \psi_i(r, \varphi) dr d\varphi} & (i=1, 2, \dots, M) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 A_{clad} 为内包层面积, $\psi_i(r, \varphi)$ 为光纤模式 i 的功率分布函数。基模提取效率可以表示为

$$\eta = P_1(L) / \sum_{i=1}^N P_i(L), \quad (5)$$

式中 L 为光纤长度。为了求解(2)和(3)式,必须给定各个模式的初始功率,然后利用四阶龙格库塔方法进行迭代求解^[13]。

2.3 任意折射率分布的光纤模场

在弱导近似条件下,圆对称光纤的 $LP_{m\mu}$ 模式的模场满足的标量波动方程为

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} + \left[k_0^2 n^2(\rho) - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right] \psi = 0, \quad (6)$$

式中 $\rho = r/a$ 为归一化半径, $n(\rho)$ 为折射率线型函数。设 $n_1 = n(\rho=0)$, $n_2 = n_{\text{clad}}$, 定义归一化折射率分布函数 $h(\rho) = [n^2(\rho) - n_2^2]/(n_1^2 - n_2^2)$, 归一化频率 $V^2 = k_0^2 a^2 (n_1^2 - n_2^2)$ 以及归一化传播常数 $b =$

模有效模面积作为评价光纤输出功率能力的指标。光纤的光束质量可以用基模提取效率来评价,这里所说的基模提取效率定义为输出中基模所占功率与总输出功率的比值。因此,设计目标就是通过对光纤折射率分布和掺杂分布的设计和优化,尽可能提高基模有效模面积和基模提取效率。

2.2 基模有效模面积和提取效率

基模有效模面积可以表示为

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \left[\int_0^\infty \psi_{01}^2(r) r dr \right]^2 / \int_0^\infty \psi_{01}^4(r) r dr, \quad (1)$$

式中 ψ_{01} 为基模 LP_{01} 的功率分布函数。

掺杂光纤在稳态时的速率方程可描述为^[12]

$[(\beta/k_0)^2 - n_2^2]/(n_1^2 - n_2^2)$, 并令 $x = \sigma\rho^2$, σ 为任意正数,则(6)式变为

$$x \frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{d\psi}{dx} + \frac{1}{4} \left[\frac{V^2}{\sigma} h \sqrt{x/\sigma} - \frac{V^2}{\sigma} b - \frac{m^2}{x} \right] \psi = 0, \quad (7)$$

对 $\psi(x)$, 用 N 项 m 阶正交的连带高斯-拉盖尔(Gauss-Laguerre)基函数进行展开,即令

$$\psi(x) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i \varphi_i(x), \quad (8)$$

其中 $\varphi_i(x) = \sqrt{\frac{i!}{(i+m)!}} e^{-x/2} x^{m/2} \sum_{k=0}^i (-x)^k C_{i+m}^{i-k} \frac{1}{k!}$,

代入(7)式可得

$$\frac{\sigma}{V^2} \sum_{i=0}^{N-1} a_i [x - 2(1 + 2i + m)] \varphi_i(x) + \sum_{i=0}^{N-1} a_i h(\sqrt{x/\sigma}) \varphi_i(x) = b \sum_{i=0}^{N-1} a_i \varphi_i(x), \quad (9)$$

在(8)式两边乘上 $\varphi_j(x)$ ($j=0, 1, \dots, N-1$), 然后在整个平面上积分,并利用 $\varphi_i(x)$ 的正交性,(8)式可以转换成特征值求解问题

$$[\mathbf{M}]\mathbf{A} = b\mathbf{A}, \quad (10)$$

式中 $\mathbf{A} = [a_0, a_1, \dots, a_{N-1}]^T$ 为系数向量, $[\mathbf{M}] = -(\sigma/V^2)[\mathbf{P}] + [\mathbf{Q}]$ 为一个 $N \times N$ 的对称矩阵,其中 $[\mathbf{P}]$ 和 $[\mathbf{Q}]$ 都是对称矩阵,表示为

$$\begin{cases} P(i, i) = 2i + m + 1 \\ P(i+1, i) = \sqrt{[(i+1)(i+m+1)]}, \\ P(i-1, i) = \sqrt{[i(i+m)]} \end{cases}, \quad (11)$$

$$Q(i, j) = \int_0^\sigma h(\sqrt{x/\sigma}) \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx, \quad (12)$$

至此,只需计算(11)式的积分,就可以得到矩阵 $[M]$, $[M]$ 的特征向量就是将 $\psi(x)$ 展开的系数向量, $[M]$ 的特征值就是归一化传播常数。根据(8)式可以得到任意折射率分布光纤的场分布函数,然后通过(1)和(5)式可以计算任意折射率分布和掺杂分布光纤的基模有效模面积 A_{eff} 和基模提取效率 η 。

3 设计实例和分析

3.1 折射率分布对基模有效模面积和提取效率的影响

为了比较不同折射率分布光纤在模面积和基模提取效率上的性能,重点考虑图1中五种具有代表性的不同折射率分布的光纤。其中,前三种是单层光纤,即折射率分布分别对应 $p = \infty, 2, 1$ 的情况;后两种是双层光纤,图1(d)是凹形光纤,定义凹陷区域的直径与纤芯直径比为凹陷比;图1(e)所描述的复合折射率光纤是由中间为阶跃折射率分布而边缘是平方折射率分布(或者三角分布)的一种光纤,定义为阶跃折射率分布区域的直径与纤芯直径比为复合比。计算中所用到的参数如下,光纤数值孔径(NA)均为0.054 ($n_{\text{core}} = 1.4580, n_{\text{clad}} = 1.4570$)。光纤内包层直径均为400 μm ,波长为1064 nm,各个模式的功率初始值均为100 mW,凹形光纤的凹陷比为0.9,复合折射率光纤的复合比为0.5,计算中用到的其他物理常数或者数值请参考文献[13]。

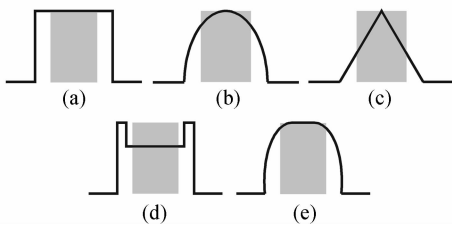


图1 几种不同折射率分布的光纤。(a) 阶跃折射率光纤;(b) 平方折射率光纤;(c) 三角形光纤;(d) 凹形光纤;(e) 复合折射率光纤

Fig.1 Refractive-index and dopant profile for selected fiber designs. (a) step-index; (b) square-law; (c) triangular; (d) central-dip; (e) hybrid profile

图2为各种光纤在不同纤芯直径下的基模有效模面积。从图2可以看出,在纤芯直径和数值孔径相同的条件下,不同折射率分布的光纤基模面积相差较大,其中凹形光纤的基模有效面积最大,阶跃折射率次之,三角形光纤和平方折射率光纤差不多都比较小,而复合折射率则位居中游。可以这样分析,

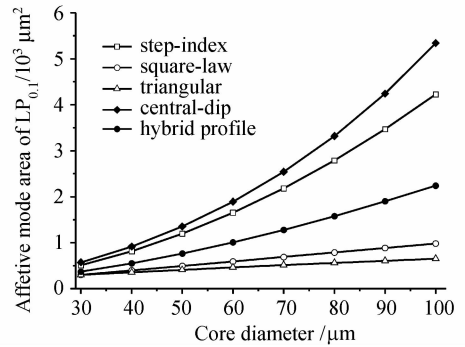


图2 基模有效模面积随光纤直径的变化
Fig.2 Effective area of LP_{01} mode for various core diameters

从有效模面积的公式(1)可以看出,对于一定芯径的光纤,当光场的能量越向芯径中间集中时,模面积越小。由于光波导的能量主要被约束在折射率高的区域,而三角形光纤和平方折射率光纤中间折射率高,因此模面积小;凹形光纤由于芯径边缘的折射率“台阶”将光场的能量从中间转移一部分到两边,因此模面积较大。从图2还可以看出,在相同芯径条件下有效模面积越小的光纤,其有效模面积随芯径增加而增长的速度也越慢。当纤芯直径 D 为100 μm 时,三角形光纤和平方折射率光纤的基模有效模面积都不超过1000 μm^2 (相当于模场直径为35 μm)。

图3为各种光纤在均匀满掺杂(掺杂半径等于纤芯半径)的情况下,基模提取效率随纤芯直径的变化。同时,图3中的表格给出了各种光纤具有不同芯径时的导波模式数。从图3可以看出,随着纤芯直径的增大,模数随之增多,基模提取效率下降。在同一芯径下,各种光纤基模提取效率大小排序正好与图2计算的有效模面积相反。当芯径比较大时(比如100 μm),各种光纤的基模提取效率之间的差距并不大,基模提取效率最高的三角形光纤也不超

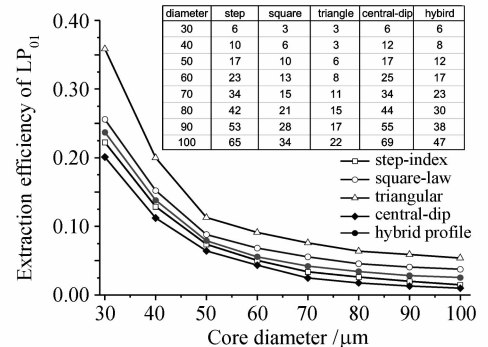


图3 基模提取效率随光纤直径的变化
Fig.3 Extraction efficiency of LP_{01} mode for various core diameters

过 10%，这难以满足实际应用对光束质量的要求。

3.2 掺杂分布对基模提取效率的影响

通过改变掺杂半径或者采取非均匀掺杂可以提高基模提取效率^[10]。由于在均匀满掺杂条件下,各种光纤的基模提取效率差距并不是很明显。为了进一步比较各种光纤在光束质量方面的性能,计算了在芯径为50 μm 时,对掺杂半径进行优化后的各种光纤的基模提取效率,如图4所示。图4中归一化掺杂半径 ρ 定义为掺杂半径与纤芯半径的比值。从

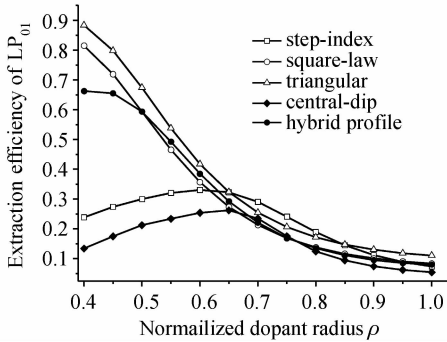


图4 基模提取效率随归一化掺杂半径 ρ 的变化

Fig. 4 Extraction efficiency of LP₀₁ mode versus core diameter for various normalized dopant radius

表1 各种光纤的性能比较 ($D = 50 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.054$)

Table 1 Performance metrics for selected fiber designs ($D = 50 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.054$)

Fiber type	$A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	$A_{\text{eff}} / A_{\text{core}}$	$\eta(\rho = 1) / \%$	$\eta_{\text{opt}} / \%$	$\eta_{\text{opt}} - \eta / \%$
a) Step-index	1194	0.61	7.4	33	25.6
b) Square-law	491	0.25	8.4	81	72.6
c) Triangular	409	0.21	11	88	77
d) Central-dip	1394	0.71	6.4	26	19.4
e) Hybrid profile	743	0.38	8.0	67	59

复合折射率光纤的这种平衡可以给设计百微米大模场光纤带来更多的灵活性。因为不仅可以通过提高芯径来提高它的有效模面积,而且可以通过优化掺杂半径或者采用非均匀掺杂分布得到比较满意的基模提取效率。另外,还可以通过改变复合方式(比如阶跃折射率光纤和三角形光纤组合)或者复合比来调节基模有效模面积和提取效率之间的平衡。为了说明这一点,给出了图5所示的另一种复合折射率光纤,它由阶跃折射率光纤和三角形光纤组合而成。其参数为: $n_1 = 1.480, n_2 = 1.475, n_3 = 1.465, n_4 = 1.470, r_1 = 28 \mu\text{m}, r_2 = 45 \mu\text{m}, r_3 = 50 \mu\text{m}$ 。这种光纤的有效模面积为2168 μm^2 (相当于模场直径为52 μm)。采用均匀掺杂时,通过优化掺杂半径其基模效率可以达到51%(如图5(a), 归一

图4可以看出,经过对掺杂半径进行优化后,各种光纤的基模效率有了不同程度的提高。对比图3可以看出,原来基模提取效率越高的光纤经过优化后的基模提取效率提高的幅度也越大。凹形光纤经过优化后的基模提取效率只有26%,阶跃折射率光纤为33%,其他三种则都超过了60%。

3.3 分析和比较

为了便于比较各种光纤的性能,将计算结果列在表1中。表1中 A_{core} 表示纤芯面积, η 和 η_{opt} 分别表示在均匀掺杂时满掺杂和掺杂半径优化过的基模提取效率。 $A_{\text{eff}} / A_{\text{core}}$ 反映了这种光纤有效模面积被优化的能力,而 $\eta_{\text{opt}} - \eta$ 反映了基模提取效率被优化的能力。从表1可以看出,对于同等芯径同等数值孔径的光纤,想同时提高模面积和基模提取效率是比较困难的。三角形光纤和平方折射率光纤基模提取效率比较高,但是有效模面积却较小,并且通过提高芯径来提高有效模面积的方法受到了限制。凹形光纤和阶跃折射率光纤的有效模面积虽然较大,但是由于基模提取效率低也限制了这两种光纤在芯径更大时的实用性。而复合折射率光纤则在有效模面积和基模提取效率两方面上有着比较好的平衡。

化掺杂半径 $\rho = 0.45$),与表1中的阶跃折射率光纤相比,其有效模面积和基模提取效率都提高了近一倍。如果采用梯形掺杂优化(如图5(b), 归一化掺杂半径 $\rho_1 = 0.2, \rho_2 = 0.75$),可以将基模提取效率提高到62%。

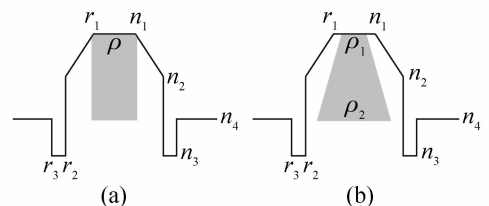


图5 另一种复合折射率光纤。(a) 均匀掺杂;
(b) 梯形掺杂

Fig. 5 Another hybrid profile fiber. (a) flat dopant profile; (b) trapezoidal dopant profile

4 结 论

从无源光纤的模场理论和有源光纤的速率方程理论出发,给出了任意折射率分布和掺杂分布的大模面积光纤基模有效模面积和基模提取效率的计算方法,通过数值模拟对几种典型折射率分布和掺杂分布的光纤的性能进行了分析和比较。计算结果表明,基模有效模面积和基模提取效率是一对矛盾,复合折射率光纤与传统的光纤相比,在有效模面积和基模提取效率两方面上有着比较好的平衡和更多的设计空间。另外,模拟结果还表明,通过减小掺杂半径或者采用非均匀掺杂可以进一步提高基模提取效率。基于这种设计方法,给出了一种新的大模面积光纤结构,模场面积达到 $2168 \mu\text{m}^2$,并且基模提取效率达到60%。

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 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [C]. Late Breaking Developments. San Jose: Photonics West, 2005; Session 5709-2a
- 3 Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen *et al.*. High power fiber lasers with 1.2 kW output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1359
赵 鸿,周寿桓,朱 辰等. 大功率光纤激光器输出功率超过1.2 kW[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1359
- 4 Li Wei, Wu Zichun, Chen Xi *et al.*. High power fiber lasers with 1 kW output [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
- 5 M. E. Fermann. Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(1):52~54
- 6 J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, L. Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**:442~444
- 7 J. A. Alvarez-Chavez, B. J. Grudinin, J. Nilsson *et al.*. Mode selection in high power cladding pumped fibre lasers with tapered section [C]. CLEO'99, 1999. 247~248
- 8 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
- 9 J. Limpert, H. Zellmer, A. Tünnermann. Suppression of high order modes in a multimode fiber amplifier using efficient gain-loss-management (GLM) [C]. Advanced Solid-State Lasers. Paper MB20. Québec City, Canada, 2002. 112~114
- 10 M. Hotoleanu, M. Söderlund, D. Kliner *et al.*. High order modes suppression in large mode area active fibers by controlling the radial distribution of the rare earth dopant [C]. *SPIE*, 2006, **6102**:61021T
- 11 U. Griebner, R. Koch, H. Schönagel *et al.*. Efficient laser operation with nearly diffraction-limited output from a diode-pumped heavily Nd-doped multimode fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(4):266~268
- 12 U. Griebner, H. Schönagel. Laser operation with nearly diffraction-limited output from a Yb:YAG multimode channel waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11):750~752
- 13 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