

文章编号: 1001-3806(2018)05-0638-08

大模场掺铥光纤增益特性研究

李远¹, 延凤平^{1*}, 刘硕², 白卓娅¹

(1. 北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 河北工业大学 电子信息工程学院, 天津 300401)

摘要: 为了进一步提升光纤激光器的输出功率, 采用大模场面积掺铥光纤来抑制非线性效应, 利用非均匀布喇格掺铥光纤结构, 通过优化参量, 在满足单模传输条件下获得模场面积为 $719\mu\text{m}^2$ 的大模场面积光纤。基于此光纤建立了 793nm 波长抽运下大模场掺铥光纤放大器理论模型。由于大模场面积光纤能降低光功率密度, 抑制 Stokes 光功率, 因此这种光纤放大器在高抽运功率下相比普通单模光纤放大器能够得到更大的输出功率。结果表明, 当抽运光功率为 100W 时, 所设计大模场面积光纤与普通单模光纤相比, 转换效率提高 5%, 达到 40%, 输出功率达到 41.01W。以上研究对于实际掺铥光纤放大器的设计有重要应用价值。

关键词: 光纤光学; 大模场光纤; 掺铥光纤放大器; 非线性光学

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.05.011

Study on gain characteristics for large-mode-area thulium-doped fibers

LI Yuan¹, YAN Fengping¹, LIU Shuo², BAI Zhuoya¹

(1. Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Communication Networks, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Electronic Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to enhance output power of a fiber laser, thulium doped fiber with large mode area was used to suppress the nonlinear effect. Optimizing parameters of a thulium-doped fiber in an inhomogeneous Bragg structure, a fiber with mode area of $719\mu\text{m}^2$ was obtained under the condition of single-mode transmission. Based on this fiber, a theoretical model for large mode area thulium-doped fiber amplifiers pumped by 793nm wavelength was established. Because large mode area fiber can reduce optical power density and suppress Stokes light power, compared with the ordinary single-mode fiber amplifier, this kind of fiber amplifiers under high pump power can get higher output power. The results show that, when pump power is 100W, compared with the conventional single-mode fiber, the conversion efficiency increases 5% and reaches 40%, and the output power reaches 41.01W. The research is of great value for design of actual thulium-doped fiber amplifiers.

Key words: fiber optics; large-mode-area fiber; thulium-doped fiber amplifier; nonlinear optics

引言

2 μm 掺铥光纤激光器在医疗、塑料材料的切割焊接有着很大的优势, 在医疗方面, 由于水分子在 2 μm 附近有一个较强的红外吸收峰, 用此波段的激光进行手术, 能够加快血液凝结, 从而减少手术创伤^[1-2], 由于 2 μm 波段激光能够减轻工艺复杂性, 其在塑料材料激

光切割、焊接等领域也充当着重要角色^[3], 具有高功率、窄线宽输出的掺铥光纤激光器因此成为一个重要研究方向, 但 2 μm 掺铥光纤激光器的损耗较大, 抽运光耦合效率不高, 导致目前的掺铥光纤激光器输出功率仍然不令人满意, 同时光纤中功率密度也不宜过大, 否则会造成不可逆的光学损伤; 而光纤的非线性效应与光纤的模场面积成反比, 模场面积越大, 非线性效应越弱^[4], 较大的模场面积能够有效地抑制非线性效应, 从而得到较高的增益。

目前, 通过使用主振荡功率放大器 (master oscillator power amplifier, MOPA) 结构, 利用较高的抽运功率得到较高的效率。在 2016 年, 北京工业大学激光技术中心的 LIU 等人设计了一个 MOPA 结构的窄线宽连

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61327006; 61620106014)

作者简介: 李远 (1993-), 男, 硕士研究生, 现主要从事掺铥光纤放大器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2017-10-16; 收到修改稿日期: 2017-11-16

续掺铥光纤激光器,放大器抽运功率为 620W,平均输出功率为 342W,掺铥光纤功率放大器的斜率效率为 56%^[5],只是其对于抽运功率本身也要求较高。而在 2007 年,上海高功率激光物理联合实验室的 CHANG 等人发现在抽运功率较大时,大模场面积能够得到更高的转换效率^[6],因此利用大模场面积光纤实现高功率的掺铥光纤放大器是可行的。在 2014 年,ZHOU 等人利用自行设计的微结构光纤,在纤芯数值孔径为 0.05 情况下得到了 530 μm^2 的掺铥微结构光纤激光器,其斜率效率为 55.2%,光束质量因子 $M^2 < 1.01$ ^[7]。

Bragg 光纤是一类可以实现大模场面积的光纤结构,其原理是光纤中 TE_{01} 模的损耗较其余更低,这样经过一段长度的传输后,光纤中仅有基模存在,而其余的模式则被消耗,因此其单模工作波长很宽,同时,通过对相关参量的调整可以实现大模场面积的光纤,考虑到布喇格光纤对于精确厚度的要求过高,在 2011 年,ZHENG 提出使用非均匀布喇格光纤结构,改进现有的光纤工艺,制作得到模场直径约为 18 μm 的单模光纤^[8]。本文中参照这种结构,首先对 6 种结构的模场面积进行对比,选出模场面积最优的一种光纤结构。在此结构的基础上对参量进行优化,最后在传输光波长为 2 μm 时实现模场面积为 719 μm^2 大模场单模光纤。

作者基于铥离子的四能级模型来建立放大器的速率方程和传输方程,对掺铥光纤放大器中各参量进行

分析,从光纤长度和抽运功率两方面探讨所设计大模场掺铥光纤的特性,研究传输光波长为 2 μm 情况下,模场面积对于掺铥光纤放大器效率的影响,由于大模场光纤降低了光纤功率密度,并且能够增大光纤非线性阈值,从而提高输出功率及放大器转换效率,即在抽运光功率较大时大模场光纤能够有效提高放大器效率,得到更大的增益。研究表明,在 100W 抽运光功率作用下,获得 41.01W 的激光输出,转换效率达 40%。

1 大模场光纤设计

非均匀布喇格光纤 (irregular Bragg fiber, IBF) 采用类似 Bragg 光纤的高低交错折射率结构,放宽了对于各层之间精确厚度的要求,结构灵活,通过纤芯高低交错的折射率结构,使得在相同的折射率水平下,能够通过参量的调节来达到较大的模场面积并且满足单模传输条件。因此采用这类结构设计大模场面积光纤。

1.1 光纤结构设计

IBF 结构自由,有灵活多变的设计,可以偏重不同的要求。为了便于分析,假设光纤结构共有 i 层,定义各层折射率相对于包层折射率之差从内到外分为 Δn_{1-i} ,并且按照最内层折射率与相邻层关系可以分为两大类,如图 1 所示。

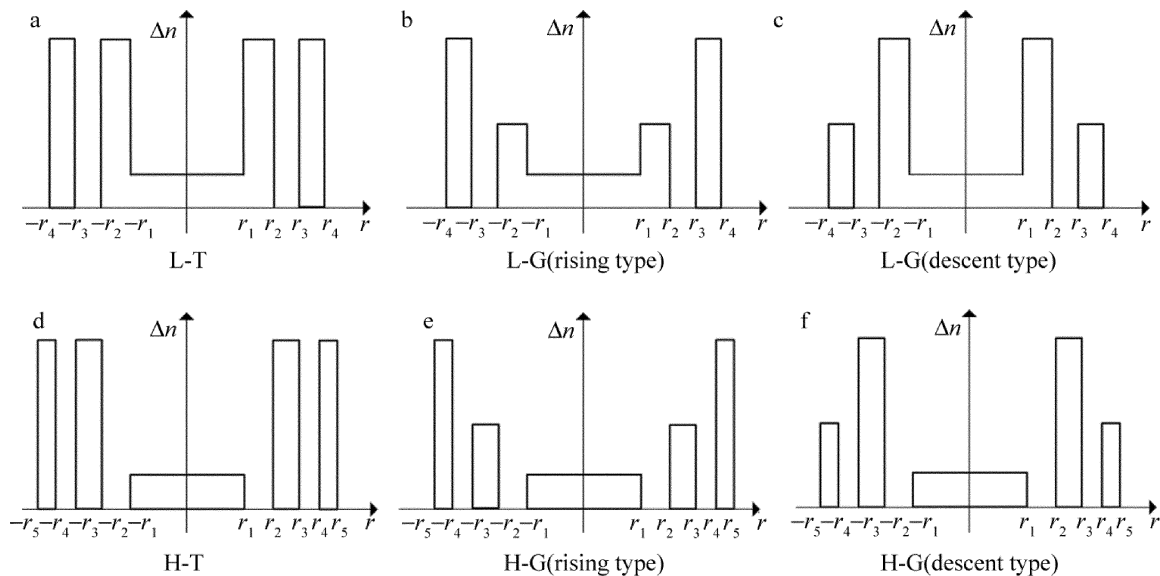


Fig. 1 Radial refractive index distribution of fiber core in six structures

(1)最内层折射率低于相邻层,记为 L 类模型,外层折射率分布不同又分为 3 种:外层折射率不变的 L-T (双折射)模型、外层折射率为上升趋势的 L-G (上升型)、外层折射率为下降趋势的 L-G (下降型),如图 1a ~

图 1c 所示。

(2)最内层折射率高于相邻层,记为 H 类模型,外层折射率分布不同也分为 3 种:外层折射率不变的 H-T (双折射)模型、外层折射率为上升趋势的 H-G (上升

型)、外层折射率为下降趋势的 H-G(下降型),如图 1d ~ 图 1f 所示。从图 1 中可以看出,为了对比最内层与相邻层折射率关系对光纤模场面积的影响,令两种结构最内层折射率相同。

对于理想的 IBF,是纵向横向均匀分布的圆对称光波导。传输的场可作如下表示^[9]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix}(x, y, z, t) = \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix}(r) \exp(jm\varphi) \exp(j\beta z) \exp(-j\omega t) \quad (1)$$

式中, β 为波导传输常数; m 对应贝塞尔方程的阶数; ω 为真空中角频率; φ 为初相角; \mathbf{E}, \mathbf{H} 分别为电场强度及磁场强度; \mathbf{e}, \mathbf{h} 分别为单位电场强度及单位磁场强度; r 为纤芯的整体半径。

通过形式简洁的标量近似来求解光纤模式分布,取横向一个场分量为 $e_y(r, \varphi)$,在极坐标系下,IBF 每层中都满足该层上的贝塞尔方程:

$$\frac{d^2 e_y(r, \varphi)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{de_y(r, \varphi)}{dr} + \left(k_0^2 n_i^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) e_y(r, \varphi) = 0 \quad (2)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda$,表示某个波长 λ 在真空中传播的波数。则 LP_{mn} 模式的横向场分布 $e_y(r, \varphi)$ 可以表示为:

$$e_y(r, \varphi) = \begin{cases} [a_i J_m(u_i r) + b_i N_m(u_i r)] \times \exp(jm\varphi), & (k_0 n_i > \beta_{mn}) \\ [a_i J_m(w_i r) + b_i N_m(w_i r)] \times \exp(jm\varphi), & (k_0 n_i < \beta_{mn}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, β_{mn} 为该模式下的传播系数, J_m 为 m 阶的贝塞尔函数, N_m 为 m 阶的诺依曼函数,对于 u_i 和 w_i ,分别有 $u_i^2 = k_0^2 n_i^2 - \beta_{mn}^2$, $w_i^2 = \beta_{mn}^2 - k_0^2 n_i^2$,并且 a_i, b_i 是相应的贝塞尔函数的系数。如此,根据标量近似下场之间的各个分量关系,即可得出所有场分量。考虑到 IBF 的边界条件,传播的光场在无穷远处为 0,在光纤中心处有界,那么最内层的 $b_1 = 0$ 、最外层的 $a_c = 0$ 。而且场在光纤各层是连续的,第 i 层和第 $i+1$ 层的结果应该相同,如此可以确定表达式的系数之间的关系。

1.1.1 6种结构基模场 在传输光波长 $2\mu\text{m}$ 情况下,取纤芯整体半径 $r = 10\mu\text{m}$,考虑到改良的化学气相沉积法(modified chemical vapor deposition, MCVD)工艺限制,各种结构下光纤参量如表 1 所示,同时此参量下仿真得到的基模场如图 2 所示。

图 2 表示了在 $2\mu\text{m}$ 波长下,6种 IBF 结构的基模场示意图。其中图 2a ~ 图 2c 为 L 类的 3 种结构,图 2d ~ 图 2f 为 H 类 3 种结构。可以看出,L 类结构在同等条件下其模场面积较小,为了对光纤结构进行优化

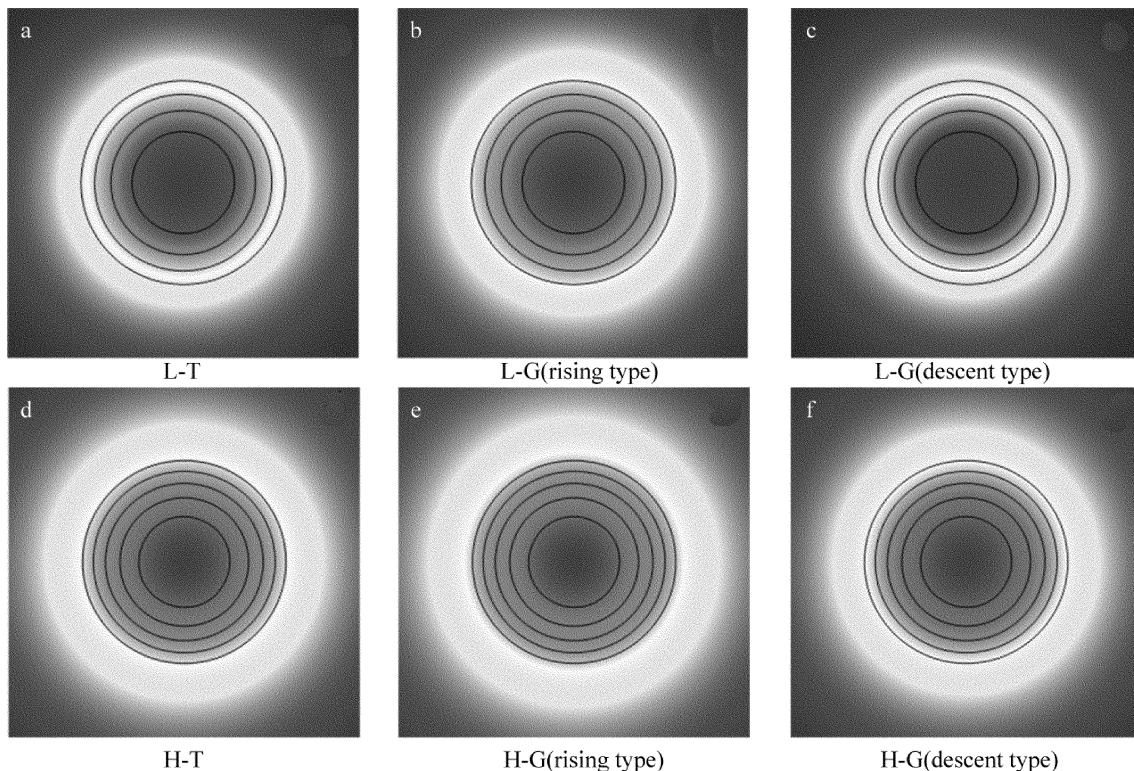


Fig. 2 Fundamental mode field of six kinds of IBF structures

Table 1 Parameters used in structure simulation with r of $10\mu\text{m}$

model structure	$r_i/\mu\text{m}$	Δn_i
L-T	(5,7.07,8.66,9.995)	(0.001,0.003,0,0.003)
L-G(rising type)	(5,7.07,8.66,9.995)	(0.001,0.002,0,0.004)
L-G(descent type)	(5,7.07,8.66,9.995)	(0.001,0.004,0,0.002)
H-T	(4.5,6.36,7.79,8.99,10.0)	(0.001,0,0.003,0,0.003)
H-G(rising type)	(4.5,6.36,7.79,8.99,10.0)	(0.001,0,0.002,0,0.004)
H-G(descent type)	(4.5,6.36,7.79,8.99,10.0)	(0.001,0,0.004,0,0.002)

以达到更大的模场面积,在以上 6 种结构的基础上,通过改变纤芯半径、纤芯折射率,利用有限元方法仿真进行对比分析,研究模场面积与结构的关系,从 6 种结构中选出较优的结构并进一步进行参量上的优化。由于结构上的差异,在考虑参量时,为了避免参量之间的相互影响,选取特定的各层纤芯半径使得 L, H 两类结构整体纤芯半径相同。

1.1.2 6 种结构模场面积分析 从光纤半径及光纤折射率两方面的变化来考虑,在传输光波长为 $2\mu\text{m}$ 时,图 3 中展示了模场面积与光纤半径的关系。图 4 中展示了模场面积与光纤折射率的关系。

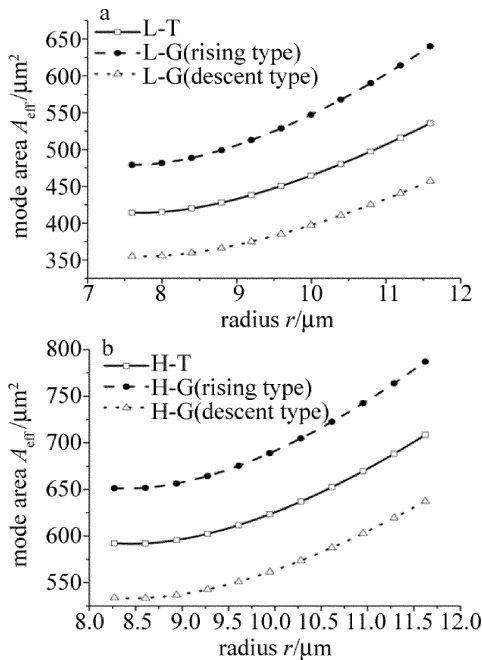


Fig. 3 Relation between the mode field area and its structure
a—L type mode b—H type mode

从图 3 中可以很直观地看到,在相同的光纤半径下,折射率变化趋势相同时,对于模场面积都有 H 型模型 > L 型模型,并且对于同一类结构,模场面积有上升型模型 > 双折射模型 > 下降型模型。

图 4 展示模场面积随 Δn_i 变化的关系,考虑到半径的增大会导致截止波长向长波长方向移动,取纤芯整体半径约为 $10\mu\text{m}$,而 Δn_1 仍为 0.001,由于不同结

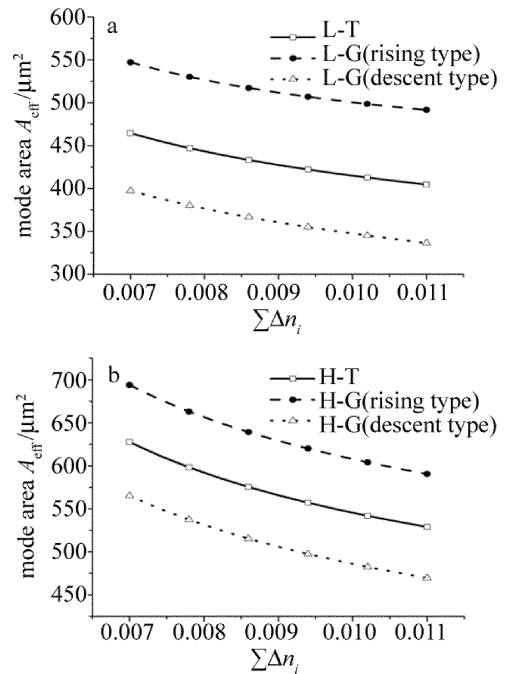


Fig. 4 Relationship between mode field area and Δn_i
a—L type mode b—H type mode

构下,各层折射率不同,通过控制其与表 1 中 Δn_i 有相同的比例关系,同样可以得到在传输光波长为 $2\mu\text{m}$ 时,6 种结构中 H-G(上升型)模型具有最大的模场面积。

所以,综合考虑选择对于结构而言,选择 H-G(上升型)结构能够得到较大的模场面积。

1.2 H-G(上升型)光纤参量优化

在光纤参量中,纤芯厚度以及外层折射率变化趋势更为容易控制并且影响较大,对于结构参量的优化主要从这 2 个方面来考虑。

1.2.1 纤芯各层厚度比的影响 考虑到光纤模场面积随着纤芯整体半径增大而同步上升,固定纤芯半径为 $10\mu\text{m}$,同时 Δn_i 分别为 0.001,0,0.002,0,0.004。取两种不同的纤芯各层厚度比 A ,分别为各层厚度逐渐减小与厚度相同两种情况,即: $A_1 = 1:0.414:0.318:0.267:0.236$; $A_2 = 1:1:1:1:1$ 。

如图 5 所示,在两种纤芯各层厚度比 A_j 情况下,

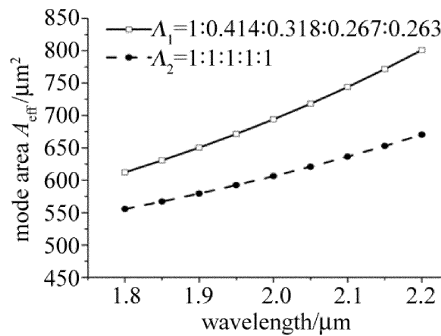


Fig. 5 Model area with different ratios of thickness

模场面积都随着波长同步增大。在相同波长处,纤芯整体半径一定时,光纤模场面积与 Λ_j 正相关。当传输波长为 $2\mu\text{m}$ 时, Λ_1 这种厚度比下模场面积达到 $694\mu\text{m}^2$,与 Λ_2 这种厚度比下的 $606\mu\text{m}^2$ 相比明显增大。这是由于在这种情况下, Λ_j 越大,外层的横截面积也逐渐增大,芯区平均掺杂浓度提高导致的。

1.2.2 外层折射率变化趋势的影响 在前面的分析中可以看到,对于外层相对包层折射率 Δn_i ,应该越小越好,但是也受到工艺的限制,这里固定 $\sum \Delta n_i$ 不变,从 Δn_i 的变化趋势来分析,对于外层折射率增长函数,按照斜率分为两种情况,其中两种变化趋势如图 6a 所示。

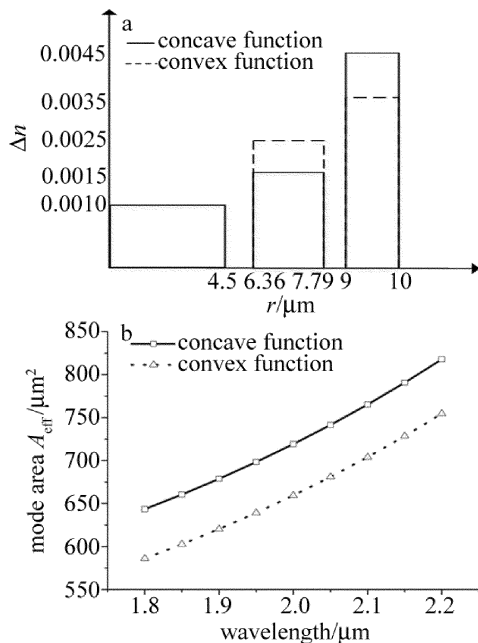


Fig. 6 a—the refractive index profile of the outer layer of H-G (ascending) model b—mode field area under change trend of two kinds of refractive index

从图 6b 可以看出,在两种折射率分布情况下,模

场面积都随着波长的增大而增大。在相同波长处,外层折射率呈凹函数分布情况下模场面积最大,当在传输波长为 $2\mu\text{m}$ 时,达到 $719\mu\text{m}^2$,而此时外层折射率为凸函数变化时只有 $659\mu\text{m}^2$ 。因此可以通过控制各层 Δn_i 的比例,来实现更大的模场面积,从这一点也说明上升型模型较其它模型模场面积更大。

所以对于光纤的设计,选取 H-G(上升型)结构,考虑到光纤纤芯半径不宜过大,取纤芯各层半径 r_i 分别为 $4.5\mu\text{m}$, $6.36\mu\text{m}$, $7.79\mu\text{m}$, $8.99\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$,其各层的折射率差 Δn_i 为 $0.001, 0, 0.0015, 0, 0.0045$ 。此时模场面积为 $719\mu\text{m}^2$,并且截止波长为 $1.7\mu\text{m}$,能够满足在 $2\mu\text{m}$ 处单模传输。

1.3 光纤弯曲损耗

考虑到所设计光纤是作为放大器的增益光纤使用,其弯曲损耗对整体放大器的性能有着较大的影响,因此下面对其弯曲损耗进行理论分析。

在理想圆对称波导中,由于在圆周上没有差别,弯曲方向可以任意选择,由于光纤的弯曲会改变应力方向的材料折射率,那么等效的折射率分布可以表示如下^[10]:

$$n(x, y) = n_0(x, y) \sqrt{1 + 2x/R_{\text{bend}}} \quad (4)$$

式中, $n_0(x, y)$ 表示光纤拉直状态下的折射率分布, R_{bend} 是弯曲半径, x 表明光纤沿 x 轴方向弯曲。由于弯曲后光纤的折射率分布不具备圆对称性,因此需要通过数值方法求解传输常数 β , 利用其虚部来计算该模式下的弯曲损耗 α ^[11], $\alpha = 20\lg(e) \text{Im}\beta$, e 为自然常数,图 7 表示弯曲损耗与弯曲半径 R_{bend} 关系。

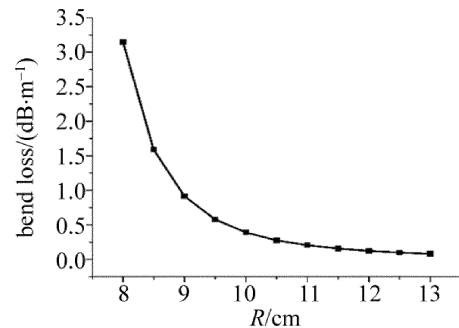


Fig. 7 Relationship between bending loss and bending radius

从图 7 中可以看出,随着弯曲半径增大,弯曲损耗也逐渐减小,在弯曲半径大于 9cm 情况下,弯曲损耗小于 1dB/m 。由于光纤涂敷层折射率为低折射率材料时,弯曲损耗较低^[12],因此,通过在光纤外涂敷低折射率涂敷层还可以进一步减小弯曲损耗。

2 掺铥光纤放大器特性分析

使用 793nm 波长激光抽运时,基于铥离子的四能级模型来建立放大器的速率方程和传输方程,从而对掺铥光纤放大器中各参量进行分析,将所设计光纤与普通阶跃光纤进行对比,从光纤长度和抽运功率两方面探讨大模场掺铥光纤的特性。

2.1 掺铥光纤放大器模型

使用 793nm 波长激光对铥离子进行前向抽运时,涉及到 TM^{3+} 的 4 个能级结构^[13],分别为 $^3\text{H}_6, ^3\text{H}_4, ^3\text{H}_5, ^3\text{F}_4$,记 N_{0-3} 表示此能级下铥离子的浓度, W_{03}, W_{10}, W_{01} 分别为基态抽运系数、激光受激发射系数、激光受激吸收系数, K_{ijk} 表示的是从 i 能级到 j 能级和 k 能级到 l 能级的能量转移过程, τ_i 为能级 i 的寿命。由于 $^3\text{H}_6$ 到 $^3\text{F}_4$ 的交叉弛豫现象^[14-15],记 $C_{r,1}$ 为交叉弛豫因子,而 $^3\text{H}_5$ 能级寿命极短,将其忽略。则铥离子的速率方程^[16] 及 W_{03}, W_{10}, W_{01} 的表达式如下^[17-18] :

$$\begin{cases} \frac{dN_0}{dt} = -(W_{01} + W_{03})N_0 + \frac{N_1}{\tau_1} + \beta_{30} \frac{N_3}{\tau_3} + W_{10}N_1 + \frac{N_3}{\tau_3} - C_{r,1} \\ \frac{dN_1}{dt} = W_{01}N_0 - \left(\frac{1}{\tau_1} + W_{10}\right)N_1 + 2C_{r,1} + \beta_{31} \frac{N_3}{\tau_3} \\ \frac{dN_3}{dt} = W_{03}N_0 - \frac{N_3}{\tau_3} - C_{r,1} \\ N = N_0 + N_1 + N_3 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_{r,1} = k_{3101}N_3N_0 - k_{1013}N_1^2 \\ W_{03} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA} \sigma_\alpha(\lambda_p) [P_f(z) + P_r(z)] \\ W_{10} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_e(\lambda_s) S_f(z) \\ W_{01} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_\alpha(\lambda_s) S_f(z) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\sigma_e(\lambda_p), \sigma_\alpha(\lambda_p), \sigma_e(\lambda_s), \sigma_\alpha(\lambda_s)$ 分别表示抽运光的发射和吸收截面、激光的发射和吸收截面; λ_p 和 λ_s 分别表示抽运光和信号光波长; h 是普朗克常量; c 为光速; A 为纤芯的横截面积; $S_f(z)$ 为信号光的功率; $P_f(z)$ 和 $P_r(z)$ 为前后项抽运光功率; β_{ij} 表示能级 i 到能级 j 的自发辐射分支比。考虑受到受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 效应的影响, 光纤中的功率可以分别用下式表示^[19] :

$$\begin{cases} \frac{dP_f(z)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_e(\lambda_p)N_1 - \sigma_\alpha(\lambda_p)N_0]P_f(z) - \alpha_p P_f(z) \\ \frac{dP_r(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_e(\lambda_p)N_1 - \sigma_\alpha(\lambda_p)N_0]P_r(z) + \alpha_p P_r(z) \\ \frac{dS_f(z)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_\alpha(\lambda_s)N_0]S_f(z) - \alpha_s P_f(z) - \frac{S_f(z)}{A_{\text{eff}}} \sum_i g_{\text{SBS},i} P_{\text{SBS},i}(z) \\ \frac{dP_{\text{SBS},i}(z)}{dz} = -\Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_\alpha(\lambda_s)N_0]S_f(z) + \alpha_s P_f(z) - \frac{g_{\text{SBS},i}}{A_{\text{eff}}} \sum_i P_{\text{SBS},i}(z)S_f(z) \end{cases} \quad (7)$$

式中, Γ_p, Γ_s 为抽运光和信号光的重叠积分因子。考虑到布里渊散射光线宽, 利用一组布里渊散射频率 $\nu_{\text{SBS},i}$ 代替单一频率, $P_{\text{SBS},i}$ 和 $g_{\text{SBS},i}$ 分别为布里渊散射频率 $\nu_{\text{SBS},i}$ 处的 Stokes 功率和 SBS 增益系数, 则 $g_{\text{SBS},i}$ 如下式所示:

$$g_{\text{SBS},i} = g_0 \frac{(\Delta\nu_s/2)^2}{[\nu_{\text{SBS},i} - (\nu_0 + \Delta\nu_0)]^2 + (\Delta\nu_s/2)^2} \quad (8)$$

式中, $\Delta\nu_s$ 为 SBS 线宽, ν_0 为后向布里渊频移, $\Delta\nu_0$ 为布里渊频移的改变, g_0 为 SBS 峰值增益。

用 z 来表示某点在光纤中所处的位置, 那么上述掺铥光纤放大器的边界条件分别为 $z=0$ 和 $z=L$ 处的光功率值, 其中 L 为光纤长度。在 $z=0$ 处有波长为 $2\mu\text{m}$ 的种子激光和 793nm 的抽运光, 在 $z=L$ 处, 有 Stokes 光和反向的抽运光, 可以用下式表示^[20] :

$$\begin{aligned} S_f(0) = P_{s,0}, P_f(0) = P_f, P_r(L) = P_r, \\ P_{\text{SBS},i}(L) = h\nu_s \Delta\nu_{\text{SBS},i} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $S_f(0), P_f(0), P_r(L), P_{\text{SBS},i}(L)$ 依次表示输入的信号光种子功率、正向抽运光功率、反向抽运光功率和 Stokes 光功率; $P_{s,0}$ 为种子光功率; $\Delta\nu_{\text{SBS},i}$ 为散射线宽; ν_s 为 Stokes 光的频率。

2.2 掺铥光纤放大器性能影响因素

为了分析模场面积与光纤放大器性能的关系, 体现所设计光纤的优势, 与纤芯半径为 $8\mu\text{m}$, 模场面积为 $268\mu\text{m}^2$ 的普通阶跃光纤进行对比。其中两种模场面积光纤信号光的重叠积分因子 Γ_s 分别为 0.46, 0.75, 抽运光重叠积分因子 Γ_p 分别为 0.0256, 0.0164。其余放大器参量如表 2 所示^[18-19], 表 2 中参

量 b 为光纤内包层半径。

Table 2 Simulation parameters of fiber amplifier

parameter	value	parameter	value
λ_p	793nm	λ_s	2000nm
b	62.5 μm	$\sigma_a(\lambda_p)$	$5.0 \times 10^{-25} \text{m}^2$
$\sigma_a(\lambda_s)$	$1 \times 10^{-26} \text{m}^2$	$\sigma_e(\lambda_p)$	$2.18 \times 10^{-25} \text{m}^2$
$\sigma_e(\lambda_s)$	$2.5 \times 10^{-25} \text{m}^2$	α_p	0.012m^{-1}
α_s	0.0023m^{-1}	N	$4.0 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$
τ_1	334.7 μs	τ_3	14.2 μs
g_0	$4.0 \times 10^{11} \text{m/W}$	$\Delta\nu_s$	58MHz
k_{1013}	$2.4 \times 10^{-24} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	k_{3101}	$3 \times 10^{-23} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
β_{30}	0.14	β_{31}	0.72
ν_s	34.7GHz	ν_0	16.3GHz

基于以上模型,在不同的抽运功率下,研究两种模场面积光纤放大的信号光功率随光纤长度变化情况,分别对抽运光功率为 3W, 40W, 50W, 100W 的情况进行仿真分析。

如图 8a 所示,在抽运光功率较小时,由于普通阶跃光纤中抽运光功率密度较大,同时较高的抽运光功率密度能够及时对消耗的粒子数进行补充,所以能达到的信号光输出功率也就更大,大模场面积光纤的吸收效率较高,其在光纤的初始阶段,信号光功率也就增长较快。而随着抽运光功率逐渐被吸收,当抽运光功率继续增大为 40W 的情况下,从图 8b 可以看出,在光纤长度为 10m,两种模场面积光纤下的最大输出功率基本相同,此时的抽运光功率称为临界抽运功率,当抽运功率大于它时,大模场光纤由于具有较大的吸收效率,同时大模场面积光纤能降低光功率密度,从而抑制 Stokes 光功率,因此,大模场光纤放大器在高抽运功率下相比普通单模光纤放大器能够得到更大的输出功率。

图 9 为两种模场面积下、光纤放大器转换效率随光纤长度的变化,可以看出,对于一定的抽运功率,存在一个临界光纤长度 L_{cr} ,使得光纤放大器转换效率达到最大,这是由于光纤自身也会对激光造成损耗,光纤过长损耗也随之增大导致输出功率会下降,所以对于光纤放大器而言,光纤长度的选择十分关键,过长过短都不利于得到最优的输出功率。从图 9 中可以看出,当抽运光功率增大时, L_{cr} 也随之增加,只有合适的光纤长度能够使放大器得到最优的输出效果。在抽运光功率为 40W 时,所设计大模场面积光纤的 $L_{cr} \approx 7\text{m}$,当在抽运光功率为 100W 时,其增长至 10m 左右,而此时普通阶跃光纤 $L_{cr} = 11\text{m}$,因此模场面积较大时, L_{cr} 相对较小。

参考文献[5]中对掺铥光纤放大器进行了分析,

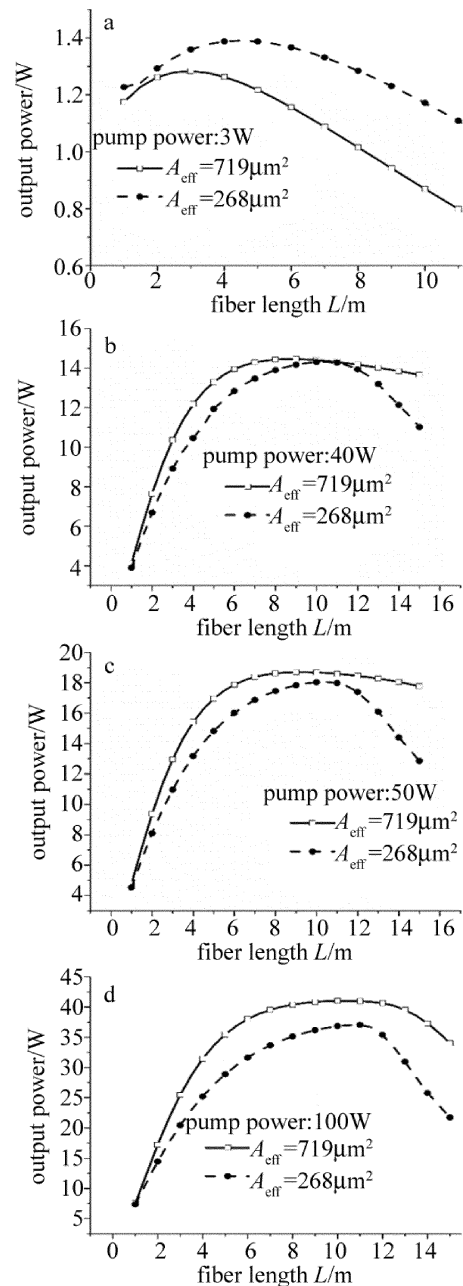


Fig. 8 Relationship between output power and fiber length with different pump power
a—50W b—100W

利用 915nm 激光抽运,仿真计算两种模场面积输出功率随输入信号功率、抽运光功率和光纤长度的变化特性,讨论了模场直径不同时最优抽运功率和光纤长度的选择,得出利用 10m 光纤放大时的临界抽运功率为 30W,即在抽运功率大于 30W 后选择大模场光纤能够有效提高放大器增益。而在作者对掺铥光纤放大器的分析中,利用 10m 光纤放大时,同样存在一个 40W 的临界抽运功率,即在抽运功率大于临界抽运功率情况下,大模场光纤能够有效提升放大器效率。当抽运

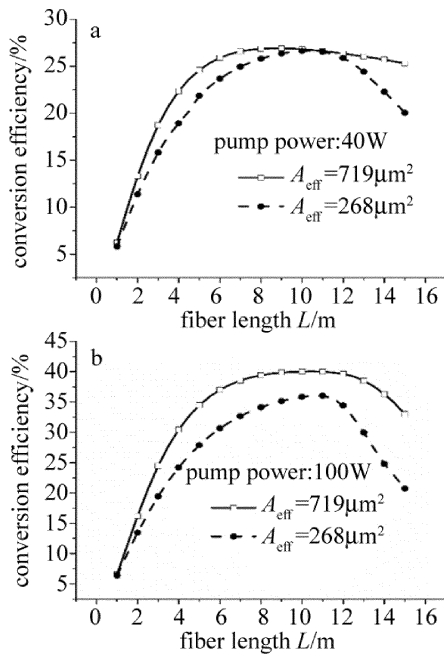


Fig. 9 Relationship between amplifier conversion efficiency and fiber length with different pump power
a—40W b—100W

光功率为 100W 时,所设计大模场面积光纤放大器与普通阶跃光纤放大器相比,转换效率提高 5%,达到 40%,输出功率达到 41.01W。

3 结 论

设计了一个大模场掺铥光纤,并对其放大特性进行了分析,利用非均匀布喇格光纤结构,通过对参量的优化,在满足单模传输下,实现模场面积为 $719 \mu\text{m}^2$ 的大模场掺铥光纤。在考虑受激布里渊散射效应下建立大模场掺铥光纤放大器理论模型,根据铥离子的能级结构理论分析出其速率方程,分别仿真分析两种模场面积光纤放大器下,光纤长度、抽运功率对效率的影响,在抽运光功率为 100W 时,所设计的大模场面积光纤与普通阶跃光纤相比,转换效率提高 5%,达到 40%,输出功率达到 41.01W。这些结果为实际掺铥光纤放大器的设计提供了理论指导。

参 考 文 献

[1] GLYBOCHKO P, ALTSHULER G, VINAROV A, *et al.* Comparison between the possibilities of holmium and thulium laser in lithotripsy in vitro[J]. *European Urology Supplements*, 2017, 16(3): e391-e392.
[2] SENER T E, BUTTICÉ S, MACCHIONE L, *et al.* Thulium laser vaporessection of the prostate: Can we operate without interrupting oral antiplatelet/anticoagulant therapy? [J]. *Investigative & Clinical Urology*, 2017, 58(3): 192-199.
[3] SCHOLLE K, LAMRINI S, KOOPMANN P, *et al.* $2 \mu\text{m}$ laser sources

and their possible applications[M]. Vukovar, Croatia: *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, 2010:494-495.
[4] ZHANG M, YAN F P, LIU Sh, *et al.* Research of stimulated Brillouin scattering effect in high-power Tm^{3+} -doped fiber amplifiers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0405009 (in Chinese).
[5] LIU J, LIU Ch, SHI H X, *et al.* 342W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(19): 194209 (in Chinese).
[6] CHANG L P, FAN W, WANG L, *et al.* Amplification performance of large- and small-mode-area ytterbium-doped double-clad fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(11): 1492-1497 (in Chinese).
[7] ZHOU D Ch, BAI X M, ZHOU H. Preparation of the large-mode-area ytterbium-doped microstructure fibre and laser performance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1205006.
[8] ZHENG J J. Design and fabrication of large-mode-area single mode erbium doped irregular Bragg fibers and related devices[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011:73-77 (in Chinese).
[9] CAO Zh Q. Transfer matrix method in guided wave optics [M]. Shanghai: Profile of Shanghai Jiao Tong University Press, 2000: 71-96 (in Chinese).
[10] BAGGETT J C, MONRO T M, FURUSAWA K, *et al.* Understanding bending losses in holey optical fibers[J]. *Optics Communications*, 2003, 227(4): 317-335.
[11] ZHENG S, REN G, LIN Z, *et al.* Design and analysis of novel multilayer-core fiber with large mode area and low bending loss[J]. *Optics Communications*, 2014, 315(sC): 317-323.
[12] LIN Zh, ZHENG S W, REN G B, *et al.* Characterization and comparison of 7-core and 19-core large-mode-area few-mode fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 064214 (in Chinese).
[13] ZHANG W, ZHANG W Y, WU W D, *et al.* Research progress of high power continuous-wave Tm-doped fiber laser [J]. *Infrared*, 2017, 38(5): 1-7 (in Chinese).
[14] LONG J Y, BAI J T, REN Z Y, *et al.* Pumping efficiency analysis and progress of $2 \mu\text{m}$ Tm^{3+} doped silica fiber lasers[J]. *Laser Journal*, 2009, 30(4): 1-3 (in Chinese).
[15] PETERKA P, KASIK I, DHARA A, *et al.* Theoretical modeling of fiber laser at 810nm based on thulium-doped silica fibers with enhanced $^3\text{H}_4$ level lifetime[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2773-2781.
[16] SMITH A V, SMITH J J. Mode instability thresholds for Tm-doped fiber amplifiers pumped at 790nm [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 975-992.
[17] DONG Sh F, CHENG G F, ZHAO Sh H, *et al.* Theoretical study on the 1180nm laser pumped Tm, Ho co-doped silica fiber laser[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 138-141 (in Chinese).
[18] LI D J, DU G G, YAN P G. Numerical analysis of Tm-doped silica fiber lasers pumped by LD [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(4): 439-444 (in Chinese).
[19] LENG J Y. Theoretical and experimental research on narrow-linewidth fiber amplifiers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011:24-26 (in Chinese).
[20] WANG Ch C, ZHANG F, LU Y Ch, *et al.* Study of stimulated Brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(12): 1630-1635 (in Chinese).