

文章编号: 1001-3806(2011)01-0025-04

增益导引折射率反导引大模场光纤激光器特性分析

余晓秋^{1,2}, 李明中^{1*}, 王建军¹, 耿远超^{1,2}, 许党朋¹, 林宏奂¹, 张锐¹, 黄小东¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 研究生部, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究增益导引折射率反导引光纤激光器的功率分布及输出特性, 根据此类光纤的结构原理和特点, 建立了端面抽运的增益导引折射率反导引光纤激光器的基模速率方程, 推导了避免激发高阶模的增益阈值判决条件, 并运用弦切法和 Runge-Kutta 法数值求解了该速率方程, 分析了光纤长度、腔镜反射率等参量对基模输出功率的影响。采用芯径为 100 μm 、折射率差为 -0.00094、掺杂 Yb^{3+} 浓度为 $5 \times 10^{26}/\text{m}^3$ 的增益导引折射率反导引光纤构建激光器时, 要使得整段光纤不激发高阶模, 需使光纤长为 3cm、两腔镜反射率为 0.98 和 0.3, 当抽运功率为 30W 时, 可获得 2.42W 的大模场单模输出, 斜率效率约为 8.1%。结果表明, 优化设计腔镜反射率和光纤长度后, 采用较短的大模场高掺杂增益导引折射率反导引光纤可获得一定效率的基模输出。

关键词: 激光技术; 增益导引折射率反导引光纤; 速率方程; 数值分析

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.01.008

Characteristic analysis of gain guided index antiguided large-mode-area fiber lasers

YU Xiao-qiu^{1,2}, LI Ming-zhong¹, WANG Jian-jun¹, GENG Yuan-chao¹,
XU Dang-peng¹, LIN Hong-huan¹, ZHANG Rui¹, HUANG Xiao-dong¹

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to study the power distribution and output characteristics of gain guided index antiguided (GG-IAG) fiber lasers, rate equations of basic model light of double-clad GG-IAG fiber lasers with end-pumping were established, based on the principle and structure characteristics of GG-IAG fibers. After solving the rate equations with tangential method and Runge-Kutta method, power distribution and output characteristics of basic model light were gained. The results show that parameters of fiber and laser cavity, such as fiber length, output lens reflectivity, have significant influence on gain distribution and output power of basic model light. When using a GG-IAG fiber with a radius of 100 μm , index step -0.00094 and concentration of ions $5 \times 10^{26}/\text{m}^3$ to construct a GG-IAG fiber laser, fiber length needs to be 3cm and output lens reflectivity is 0.98 and 0.3 respectively, in order to restrain LP_{11} model, and while inputting a 30W pump-light, 2.42W single-mode laser with large-mode-area can be obtained. The analysis shows that by optimally designing cavity mirror reflectivity and fiber length, fundamental mode output with certain efficiency can be obtained in a short length large-mode-area highly doped GG-IAG fiber.

Key words: laser technique; gain guided index antiguided fiber; rate equations; numerical analysis

引言

光纤激光器以其高效率、高光束质量、高可靠性、结构紧凑和散热性好等诸多优点, 广泛应用于科学研究、工业加工、医疗和军事等领域。随着需求的不断提升, 高功率成为光纤激光器发展的重要方向。在普通单模光纤中, 纤芯中的高功率密度会导致非

线性效应和光纤损坏。大模场光纤技术可通过增大模场面积来降低纤芯中高功率密度, 进而抑制非线性效应和避免光纤损坏。现有大模场光纤包括传统大模场光纤、大模场光子晶体光纤、手性耦合光纤, 另外弯曲损耗剃模等漏模技术可以通过去除大模场光纤中不希望的高阶模来维持单模。但是, 上述大模场光纤技术在超大模场(大于 100 μm)情况下效果不好^[1]。2003年, SIEGMAN 提出了增益导引折射率反导引(gain guided index antiguided, GG-IAG)光纤的概念, 此光纤具有纤芯折射率小于包层折射率、纤芯有增益的结构特点^[2]。

理论表明, GG-IAG 光纤在维持稳定超大模场

作者简介: 余晓秋(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事增益导引折射率反导引光纤技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: limingzhong@sina.com

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-06-08

单模方面会有着优良表现。2006年到2008年, SEIGMAN和SUDESH等人采用 $100\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$ 芯径的GG-IAG光纤构建激光器,实验获得了良好的大模场单模,验证了GG-IAG光纤理论;在计算构建GG-IAG激光器所需的光纤长度和腔镜反射率等参量时,他们采用了类似于计算固体激光器参量的方法^[1-5]。天津大学的WANG等人也采用这种方法数值模拟了不同增益系数和负折射率差值情况下的模场分布及对模场的影响^[6]。这种方法把纤芯内增益视为常数,忽略了增益沿光纤的变化,而增益是与高阶模的激发直接相关的,因此,采用它计算出来的参量可能会使得在某段光纤上产生高阶模。

使用普通双包层掺杂光纤搭建激光器或放大器时,往往采用双包层光纤速率方程组来较精确地计算和优化光纤参量。作者旨在根据GG-IAG光纤的结构特点,探讨适合于双包层GG-IAG光纤的速率方程组,以便更为精确地计算构建GG-IAG光纤激光器的所需参量。

1 双包层GG-IAG光纤激光器原理分析

和传统双包层光纤激光器一样,双包层GG-IAG光纤激光器也可以采取端面抽运的构型,示意图见图1。抽运光从光纤端面注入,光纤长度为 L ,纤芯的截面积为 A ,纤芯的掺杂浓度为 N ,前后腔镜对激光的反

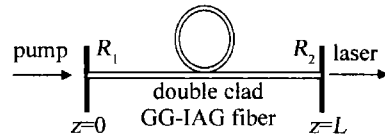


Fig.1 Schematic of end-pump double-clad GG-IAG fiber laser

射率分别为 R_1 和 R_2 。

由于GG-IAG光纤结构与普通光纤有着较大差异,GG-IAG光纤激光器也与传统单模光纤激光器有着一定的差别。其一,GG-IAG光纤中基模光束的损耗,不仅包含有普通光纤中的一般损耗(吸收损耗和散射损耗等),还有基模的模式损耗,其值等于激发基模所需的阈值增益 $g_{01,CG}$;其二,阶跃GG-IAG的基模光束功率填充因子范围大约为 $10\% \sim 61\%$ ^[2],而且它是随着光纤增益的变化而变化的,而普通阶跃光纤基模光束功率填充因子高达 80% ,它基本维持恒定;其三,由于GG-IAG光纤的折射率反导引结构,包层中部分抽运光会在包层-纤芯界面发生全反射而无法进入纤芯,普通光纤则不会发生这种情况,因此,GG-IAG光纤中的抽运光功率填充因子应该比同等几何结构的普通光纤要小。

1.1 双包层增益导引折射率反导引光纤激光器的速率方程组

1.1.1 GG-IAG光纤激光器速率方程组理论分析 结合两类光纤的差异分析和端抽运式双包层光纤激光器的速率方程^[7],在稳态条件下,双包层GG-IAG光纤激光器基模光束的速率方程可以写为:

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{a,p}\Gamma_p\lambda_p}{hcA} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_{a,s}\Gamma_s(g)\lambda_s}{hcA}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p})\Gamma_p\lambda_p}{hcA} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_{a,s} + \sigma_{e,s})\Gamma_s(g)\lambda_s}{hcA}} \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{a,p}N - (\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p})N_2(z)]P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z) \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s(g)[(\sigma_{e,s} + \sigma_{a,s})N_2(z) - \sigma_{a,s}N]P_s^\pm(z) - (\alpha_s + g_{01,CG})P_s^\pm(z) \quad (3)$$

式中, P_p^+ 和 P_p^- 分别为腔内正向和反向激光功率, P_p^+ 和 P_p^- 分别为正向和反向抽运光功率; $N_2(z)$ 为上能级镱离子浓度; Γ_p 是为抽运光功率填充因子,即抽运光耦合进纤芯百分比; $\Gamma_s(g)$ 为基模光功率在纤芯中的百分比,可由光纤的模式理论得出,它与激光增益 g 有关; $g(z)$ 为增益系数; $\sigma_{a,p}$ 和 $\sigma_{e,p}$ 分别为抽运光的吸收截面和发射截面; $\sigma_{a,s}$ 和 $\sigma_{e,s}$ 分别为激光的吸收截面和发射截面; τ 为自发辐射寿命; h 为普朗克常量; c 为真空中的光速; α_p 和 α_s 分别为抽运光和激光的吸收散射损耗系数; λ_p 和 λ_s 为抽运光和激光的波长; $g_{01,CG}$ 为基模阈值增益。

两腔镜处边界条件为:

$$\begin{cases} P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \\ P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \end{cases} \quad (4)$$

与普通双包层光纤激光器相比,GG-IAG光纤激光器速率方程组有如下特点:(1)GG-IAG光纤中基模光束的损耗,不仅包含有普通光纤中的一般损耗(吸收和散射损耗等),还有基模的模式损耗,其值等于激发基模所需的阈值增益 $g_{01,CG}$ ^[8],因此(3)式中右边第2项应是 $(\alpha_s + g_{01,CG})P_s^\pm(z)$;(2)阶跃GG-IAG的基模光束功率填充因子 Γ_s 随增益 g 而变, g 可表示为:

$$g(z) = \Gamma_s [(\sigma_{e,s} + \sigma_{a,s})N_2(z) - \sigma_{a,s}N] - \alpha_s \quad (5)$$

为了下面计算需要, g 中不包含模式损耗项, 故 g 并非基模光纯增益。功率填充因子 Γ_s 与 g 的关系可由下式表示^[9]:

$$\Gamma_s \approx 1 - \frac{g_{th,01}}{g} = 1 - \frac{2\lambda^2}{(\pi^2 a^3 \sqrt{-n_0^3 \Delta n})g} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x \sim x(N_2) \equiv [(\sigma_{e,s} + \sigma_{a,s})N_2(z) - \sigma_{a,s}N] (\pi^2 a^3 \sqrt{-n_0^3 \Delta n}) / (2\lambda^2) \\ y \equiv (\pi^2 a^3 \sqrt{-n_0^3 \Delta n}) \alpha_s / (2\lambda^2) \end{cases} \quad (8)$$

再将(7)式、(8)式代入(1)式就可以得到关于 $N_2(z)$ 的隐式超越方程, 解之可以求得 $N_2(z)$ 。但由于此隐式超越方程过于复杂, 并不利于数值求解, 故在数值求解时可采用下面的方法来处理。

1.1.2 基模功率填充因子 Γ_s 的求解方法 此方法的原理基于两点:(1) 纤芯中增益和基模模场的轴向变化都是连续的, 故基模功率填充因子的轴向变化也是连续的;(2) 整段光纤的纤芯增益和 Γ_s 在抽运光输入端面是最高的。

计算整段光纤上 Γ_s 的步骤: 首先, 将抽运光输入端面上的初始 Γ_s 设定为较高值, 比如 0.8, 高的初始值对计算影响并不大, 因为 Γ_s 会随计算而迅速趋向合理的值; 然后在分步计算时利用(5)式计算此步的纤芯增益 g , 利用(6)式和 g 值计算下一步的基模功率填充因子 Γ_s , 如此就可获得整段光纤上的 Γ_s 分布。

1.2 避免激发高阶模的判决条件

GG-IAG 光纤中 LP_{01} 模(基模)和 LP_{11} 模对应的模式增益阈值分别为^[5]:

$$g_{01,GG} = \sqrt{\frac{133.8}{2n_0^3(-\Delta n)}} \frac{\lambda^2}{(2\pi)^2 a^3} \quad (10)$$

$$g_{11,GG} = \sqrt{\frac{862.2}{2n_0^3(-\Delta n)}} \frac{\lambda^2}{(2\pi)^2 a^3} \quad (11)$$

式中, a 表示要在整段光纤都维持基模, 纤芯增益 $g(z)$ 要满足 $g_{01,GG} < g(z) < g_{11,GG}$ 。

2 GG-IAG 光纤激光器参量优化设计及数值模拟

2.1 GG-IAG 光纤激光器参量优化设计

设计 GG-IAG 光纤激光器时, 要涉及到对光纤及谐振腔诸多参量的优化设计。设计目标为获得基模振荡、抑制高阶模和提高输出功率。可变的参量有很多, 包括光纤参量, 如纤芯包层半径、折射率参量、掺杂浓度、吸收发射截面参量, 还包括谐振腔参量, 如光纤长度、腔镜反射率等。要对所有参量进行优化是非常复杂的, 为简单起见, 本文中只考虑了光纤长度和腔镜反射率对设计目标的影响, 其它参量根据常见光纤材料

式中, a 为纤芯半径, λ 为波长, n_0 为纤芯折射率, Δn 为纤芯-包层折射率差。将(6)式代入(5)式, 可以得到 Γ_s 与 $N_2(z)$ 的关系:

$$\Gamma_s = \frac{(x+y) \pm \sqrt{(x-y)^2 - 4x}}{2x} \sim N_2(z) \quad (7)$$

式中,

的特性来设定。由于 GG-IAG 对光纤增益要求较高, 所以纤芯的掺杂浓度数值设置较高。计算所取参量如表 1 所示。

Table 1 Basic parameters for numerical simulation

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| n_0 | 1.57224 |
| Δn | -0.00094 |
| τ/ms | 0.84 |
| Γ_p | 0.20 |
| initial value of Γ_s | 0.8 |
| α_p/m^{-1} | 3×10^{-3} |
| α_s/m^{-1} | 3×10^{-3} |
| N/m^{-3} | 5.0×10^{26} |
| λ_s/nm | 1010 |
| $\sigma_{a,p}/\text{m}^2$ | 5.0×10^{-25} |
| $\sigma_{e,p}/\text{m}^2$ | 1.2×10^{-26} |
| $\sigma_{e,s}/\text{m}^2$ | 6.5×10^{-25} |
| $\sigma_{a,s}/\text{m}^2$ | 1.2×10^{-27} |
| λ_p/nm | 915 |
| R_1 | 0.98 |
| d/m | 100×10^{-6} |

2.2 数值计算及结果分析

考虑单端连续抽运情况。运用弦切法和 Runge-Kutta 法, 在 MATLAB 中对速率方程(1)式~(3)式进行数值求解。

2.2.1 腔内功率沿光纤的变化 选取参量输出镜反射率 $R_2 = 0.5$, 光纤长度 $L = 10\text{cm}$, 初始抽运功率 $P_{p0} = 30\text{W}$, 模拟计算得到腔内抽运功率 P_p 、正(反)向基模光功率 P_+ (P_-) 的分布, 见图 2。

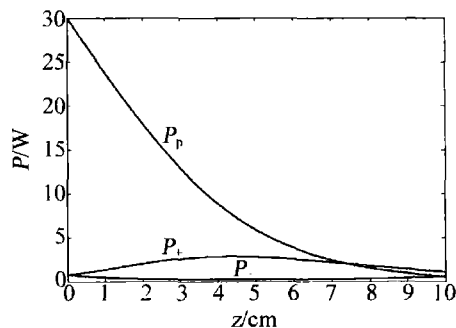


Fig. 2 Power distributions of pump light, positive and negative direction basic model light

从图 2 可看出, 在所选参量的条件下, 要获得最大输出功率, 最佳光纤长度大约为 4.2cm。比起传统双包层光纤激光器所需的光纤长度, GG-IAG 光纤激光

器的光纤显得非常短,主要原因是 GG-IAG 光纤多采用高掺杂,如 $5.0 \times 10^{26}/\text{m}^3$ 甚至更高。但是,当光纤长度为最大输出功率对应的最佳光纤长度时,并不一定能保证在整段光纤上都不会激发高阶模,这在后面的计算结果中可以看到。

2.2.2 输出功率与光纤长度的关系 选取参量 R_2 为 0.2, 0.5 和 0.8, 初始抽运功率 $P_{p0} = 30\text{W}$, 计算得到在不同输出镜反射率 R_2 下, 输出功率 P_{out} 随光纤长度 L 的变化, 见图 3。

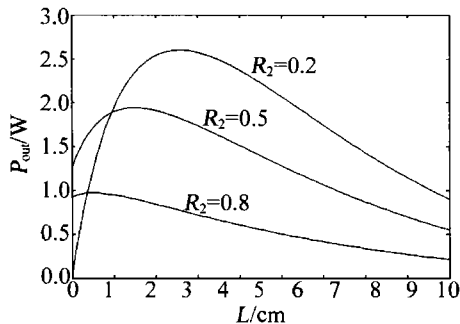


Fig. 3 Variation of output power with fiber length, under different output lens reflectivity

从图 3 可看出, 不同 R_2 所对应的最佳光纤长度不一样, 且最大输出功率也不一样。三者中, $R_2 = 0.2$ 时的最大输出功率最大, 对应最佳长度约为 3.8 cm。相对于抽运初始功率 30 W, 图中最大输出功率约为 2.7 W, 斜率效率约为 9%, 较普通双包层光纤激光器要低很多。造成斜率效率较低的主要原因有 3 个: (1) 在设定抽运功率填充因子数值时, 考虑到 GG-IAG 光纤的折射率反导引结构, 将抽运功率填充因子设得较低; (2) GG-IAG 光纤中基模功率填充因子随纤芯内增益而变, 且范围约为 10% ~ 61%, 比普通光纤 80% 左右的基模功率填充因子要低; (3) GG-IAG 光纤就要消耗一部分能量来激发和维持基模。同时, 现有实验数据也表明, GG-IAG 光纤激光器的斜率效率远不足 1% [1]。

2.2.3 输出功率随后腔镜反射率 R_2 的关系 选取参量 L 为 2 cm, 4 cm 和 6 cm, $P_{p0} = 30\text{W}$, 模拟计算得到输出功率随 R_2 的变化曲线, 见图 4。

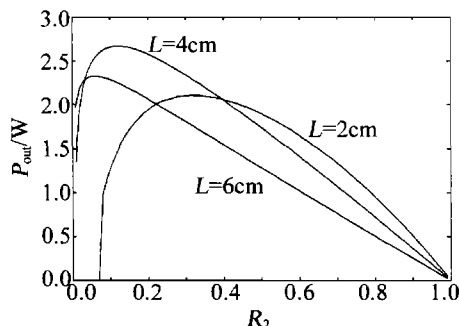


Fig. 4 Variation of output power with output lens reflectivity, under different fiber lengths

从图中可看出, 在不同的光纤长度下, 最大输出功率对应的最佳反射率 R_2 是不一样的。当 $L = 4\text{cm}$ 时, 最佳 $R_2 \approx 0.12$; 当 $L = 2\text{cm}$ 时, 最佳 $R_2 \approx 0.31$; 当 $L = 6\text{cm}$, $R_2 < 0.06$ 时激光输出功率为 0, 这表明在某些参量设置下, 仅采用光纤端面来做反射镜是不能获得激光输出的。

2.2.4 纤芯内增益与 LP_{11} 模阈值 选取参量 L 分别为 2 cm, 3 cm 和 4 cm, R_2 为 0.3 和 0.7, $P_{p0} = 30\text{W}$, 模拟得到在不同长度 L 、不同后腔镜反射率 R_2 的情况下, 腔内基模激光增益 $g(z)$ 随光纤长度的变化曲线, 以及激发 LP_{01} 模和 LP_{11} 模所需的阈值, 见图 5。

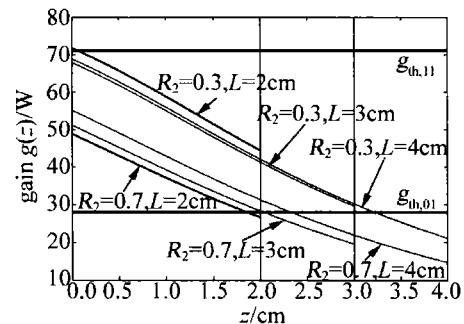


Fig. 5 Variation of laser gain $g(z)$ with distance, under different fiber lengths and different output lens reflectivity

图 5 中, 每条曲线表示基模增益 $g(z)$ 沿光纤的变化, 曲线的横轴终点对应着光纤长度, 3 条曲线对应 $R_2 = 0.3$ ($R_2 = 0.7$)。上面的水平粗线表示 LP_{11} 模阈值, 其中当 $R_2 = 0.3, L = 2\text{cm}$ 时的初始端处会激发高阶模, 且当 R_2 越小则越容易激发高阶模。在特定光纤段激发出来的 LP_{11} 模, 虽然会在其它不支持高阶模的纤芯段中得到一定的损耗, 但它仍会吸收基模的部分功率, 致使基模光功率降低。下面的水平粗线表示基模阈值, 可以看出在某些参量下有部分光纤段不足以维持基模, 虽然基模光仍会得到传输, 但会产生很大的损耗。在设计激光器参量时, 应尽可能地使得增益曲线 $g(z)$ 都位于 LP_{11} 模阈值之下、 LP_{01} 模阈值之上, 这要涉及到众多参量的优化, 比如对比图 4 和图 5 可以发现, 要使输出功率高, 则需要腔镜反射率较低, 而要使增益曲线处于高阶模阈值之下, 又要求腔镜反射率较高, 所以这两者是矛盾的, 在优化过程中要合理权衡。

2.3 一组合适的参量

从上述分析可看出, 寻找一组既能抑制高阶模又能获得最大功率输出的参量是比较困难的。结合图 3 和图 5, 在优先抑制高阶模的目标下, 选择这样一组参量是可行的, 即 $d = 100\mu\text{m}$, $N = 5.0 \times 10^{26} \text{m}^{-3}$, $L = 3\text{cm}$, $R_2 = 0.3$, 当抽运功率 $P_{p0} = 30\text{W}$ 时可获得 2.42 W 的大模场单模输出, 斜率效率约为 8.1%。

(下转第 78 页)

子体光子晶体禁带的密度和温度特性。以高斯脉冲为激励源,引入了PML吸收边界。用算法公式所得的电磁波透射系数来讨论了温度、等离子体层密度对其禁带特性的影响。结果表明,对由左旋和右旋极化波透射系数频谱形成的光子禁带而言,通过对等离子体上升时间在一定范围内的调整,可以在保持其周期性的同时,实现对禁带宽度的拓展。仅仅通过升高温度几乎不能实现对其宽度的拓展,但会影响透射频谱的峰值。等离子体的密度越大,禁带的宽度越大,可以实现对禁带的拓展,但是周期性会遭到破坏。

上述分析表明,影响时变等离子体光子晶体禁带宽度的决定性因素是等离子体上升时间和等离子体层密度,而不是等离子体温度。所以,可以合理选择以上参量实现耐温变的时变磁化等离子体光子晶体器件。

参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-206.
- [2] JOHN S. Localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] MEI L Q, YE W M, ZEN C. Characteristic properties of transmission research of 2-D photonic crystals using the transfer matrix method (TMM)[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2003, 9(2): 88-92 (in Chinese).
- [4] OUYANG Zh B, AN H N, RUAN S C, *et al.* Promoting the coupling efficiency of waves by a 2-D photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(1): 69-72 (in Chinese).
- [5] WU W Q, CHEN X W, ZHOU H, *et al.* Investigation of the ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers with hybrid cores[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1): 109-113 (in Chinese).
- [6] LI Y, ZHRNG R S, FENG Y C, *et al.* Influence of disordered photonic crystal on light extraction of a kind of light emitting diode model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(6): 903-905 (in Chinese).
- [7] LIU Q N. Effect of absorption of dopant on design of photonic crystal filters[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 327-329 (in Chinese).
- [8] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 84-87 (in Chinese).
- [9] HOJO H, MASE A. Dispersion relation of electromagnetic wave in one-dimensional plasma photonic crystals[J]. *Journal of Plasma and Fusion Research*, 2004, 80(2): 89-92.
- [10] ZHANG H F, MA L, LIU Sh B. Defect mode properties of magnetized plasma photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 1071-1076 (in Chinese).
- [11] LIU Sh B, MO J J, YUAN N C. FDTD simulation for magnetized plasma photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(6): 2804-2808 (in Chinese).
- [12] ZHANG H F, MA L, LIU Sh B. Effect of temperature and density on characteristics of prohibit band gap in magnetized plasma photonic crystals[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(4): 393-396 (in Chinese).
- [13] ZHUANG Z W, YUAN N C, LIU Sh B, *et al.* Plasma stealth technology[M]. Beijing: Science Press, 2005: 41-47 (in Chinese).
- [14] PETRIN A B. Transmission of microwaves through magnetized plasma[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2001, 29(3): 471-478.

(上接第28页)

3 结 论

建立了适用于双包层GG-IAG光纤激光器的速率方程,提出了采用该速率方程求解时的高阶模阈值判决方法,数值分析了光纤长度和腔镜反射率参量对激光功率和增益分布的影响。结果表明,由于GG-IAG光纤的反折射率结构,使得抽运效率低、基模损耗大,进而使得输出功率和斜率效率比普通光纤激光器要小得多。要获得更好的参量组,还需要对掺杂浓度、光纤芯径、光纤纤芯包层折射率差、功率填充因子等参量同时进行优化设计。

参 考 文 献

- [1] SUDESH V, McCOMB T, CHEN Y, *et al.* Diode-pumped 200 μm diameter core gain-guided, index-antiguide single mode fiber laser [J]. *Applied Physics*, 2008, B90(3): 369-372.
- [2] SIEGMAN A E. Propagating modes in gain-guided optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2003, A20(8): 1617-1628.
- [3] SIEGMAN A E, CHEN Y, SUDESH V, *et al.* Confined propagation and near single-mode laser oscillation in a gain-guided, index antiguided optical fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(25): 251101/1-251101/3.
- [4] CHEN Y, SUDESH V, McCOMB T, *et al.* Lasing in a gain-guided index antiguided fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, B24(8): 1683-1688.
- [5] CHEN Y, McCOMB T, SUDESH V, *et al.* Very large-core, single-mode, gain-guided, index-antiguide fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2505-2508.
- [6] WANG W N, TAN X L, TIAN Zh, *et al.* Research on laser characteristics of gain-guided and index-antiguide fibers[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(5): 503-505 (in Chinese).
- [7] WANG F R. Yb³⁺-doped double-clad fiber laser theory and experiment research[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005: 20-21 (in Chinese).
- [8] WANG X R, XIONG C D, QIU Q, *et al.* Analysis of Ytterbium-doped gain guided and index antiguided fiber amplifier[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7278: 72780C/1-72780C/6.
- [9] SIEGMAN A E. Gain-guided, index-antiguide fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, B24(8): 1677-1682.