

掺镱(Yb^{3+})双包层光纤激光器的数值分析*

徐向涛,戴特力,梁一平,王定举,范嗣强,张鹏
(重庆师范大学物理与电子工程学院,光学工程重点实验室,重庆400047)

摘要 通过对速率方程的求解,得到了掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的输出功率表达式 $P_{\text{out}} = \frac{(1-R_2)\sqrt{R_1} \cdot P_{s,\text{sat}}}{(1-R_1)\sqrt{R_2} + (1-R_2)\sqrt{R_1}}$.

$\left[(1 - \exp(-\xi)) \frac{v_s}{v_p} \cdot \frac{P_p^+(0) + P_p^-(L)}{P_{s,\text{sat}}} - (N\Gamma_s \sigma_s^a + \alpha_s)L - \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}\right) \right]$ 。利用 Matlab 软件对其进行了数值模拟,分析了泵浦波长、泵浦功率、光纤长度、光纤掺杂浓度、输出腔镜对激光器输出功率的影响。结果表明,用 915 nm 和 975 nm 进行泵浦时所需的最佳光纤长度是不相同的,掺杂浓度对光纤长度的最佳值也存在影响,输出腔镜的反射率应尽量小,合理地优化系统参数能使掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器输出功率达到最优。

关键词 光纤激光器;速率方程; Yb^{3+} 掺杂;数值分析

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

文章编号 1672-6693(2013)01-0091-04

随着高功率半导体激光器(LD)泵浦技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率已经由最初的几百毫瓦上升到了数千瓦水平^[1-2]。与传统固态激光器相比,光纤激光器具有阈值低、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点,在工业、军事国防及医疗等领域有着广泛的应用前景^[3-8]。

光纤激光器采用掺稀土元素(钕、镱、钇、铥、铈等)光纤作为增益介质,其中 Yb^{3+} 离子量子转换效率高、无激发态吸收、无浓度淬灭,并且具有很高的吸收截面、较宽的吸收光谱(800~1100 nm)以及较宽的发射光谱(975~1200 nm),可实现高功率输出^[9]。为了实现掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的最佳性能,对其进行数值模拟分析是必要的^[10-11]。本文通过求解速率方程并利用 Matlab 软件进行数值模拟,对掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的关键参数(泵浦波长、泵浦功率、掺杂浓度、输出腔镜、光纤长度)进行了分析讨论,有利于从理论上优化选取激光器的最佳参数,对实际光纤激光器的系统设计具有参考和指导意义。

1 理论分析

光纤激光器通常采用二极管激光器(LD)作为泵

浦源,泵浦光通过一定的泵浦方式耦合到内包层中,沿光纤传输,并逐渐被掺杂在纤芯中的稀土离子吸收。图1是常见的端面泵浦掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器结构示意图, L 是双包层增益光纤的长度, R_1 和 R_2 分别为光纤激光器的前腔镜和输出镜, P_p 为泵浦光功率, P_{out} 为输出光功率, $P_p^+(z)$ 、 $P_p^-(z)$ 分别为前、后向泵浦光功率, $P_s^+(z)$ 、 $P_s^-(z)$ 分别为前、后向传输激光功率。

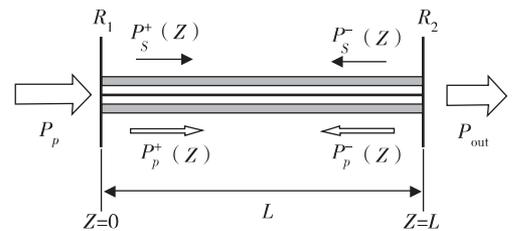


图1 端面泵浦掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器结构示意图

稳态下掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的速率方程可以表示为^[12]

* 收稿日期 2012-07-03 修回日期 2012-10-18 网络出版时间 2013-01-18 15:05

资助项目:国家自然科学基金项目(No. 61008059);重庆市自然科学基金项目(No. cstcjj40029);重庆市教委科技项目(No. KJ060816);重庆市高校创新团队建设计划资助项目(No. 201013);重庆师范大学博士启动基金项目(No. 11XLB014)

作者简介:徐向涛,男,硕士研究生,研究方向为光纤激光器,E-mail: xuxiangtao@163.com 通讯作者:梁一平,E-mail: Liangyiping@yahoo.com.cn

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20130118.1505.201301.91_018.html

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_p^a\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_s^a\Gamma_s}{h\nu_s A_c}}{[\frac{P_p^+(z) + P_p^-(z)}{h\nu_p A_c}(\sigma_p^a + \sigma_p^e)\Gamma_p + \frac{1}{\tau}] + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_s^a + \sigma_s^e)\Gamma_s}{h\nu_s A_c}} \quad (1)$$

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

$$\frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \pm\Gamma_s[(\sigma_s^e + \sigma_s^a)N_2(z) - \sigma_s^a N]P_s^\pm(z) \pm \Gamma_s\sigma_s^e N_2(z)P_0 - \alpha_s P_s^\pm(z) \quad (3)$$

式中相关参数见表1, N 是纤芯中掺 Yb^{3+} 的掺杂浓度, $N_2(z)$ 是光纤不同位置处 Yb^{3+} 的上能级粒子浓度。在稳态条件下, 有边界条件

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

利用(1)~(4)式求解速率方程, 得到双包层光纤激光器的输出功率^[13-14]

$$P_{\text{out}} = \frac{(1 - R_2)\sqrt{R_1} \cdot P_s}{(1 - R_1)\sqrt{R_2} + (1 - R_2)\sqrt{R_1}} \cdot \left[(1 - \exp(-\xi)) \frac{\nu_s}{\nu_p} \cdot \frac{P_p^+(0) + P_p^-(L)}{P_s} - (N\Gamma_s\sigma_s^a + \alpha_s)L - \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}\right) \right]$$

其中 $P_{s, \text{sat}} = h\nu_s A_c \mathcal{L}[\tau\Gamma_s(\sigma_s^e + \sigma_s^a)]$ 为饱和泵浦功率;

$\xi = \frac{(\sigma_p^e + \sigma_p^a)\Gamma_p}{(\sigma_s^e + \sigma_s^a)\Gamma_s} \left[(N\Gamma_s\sigma_s^a + \alpha_s)L + \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}\right) \right] - (N\Gamma_p\sigma_p^a + \alpha_p)L$ 为与激光器自身参数相关的一个参量。

2 数值模拟结果及讨论

根据理论计算结果, 利用计算机 Matlab 软件进行数值模拟, 分析了泵浦波长、泵浦功率、光纤长度、光纤掺杂浓度、输出腔镜对激光器输出激光功率的影响。计算中所用相关参数见表1。

表1 掺镜双包层光纤激光器相关参数

符号	物理参量	数值
λ_p	泵浦光中心波长	915 nm 或 975 nm
λ_s	激光中心波长	1 064 nm
τ	Yb^{3+} 粒子上能级平均寿命	8×10^{-4} s
σ_p^a	泵浦光的吸收截面	2.5×10^{-24} m ²
σ_p^e	泵浦光的发射截面	2.5×10^{-24} m ²
σ_s^a	激光的吸收截面	1.4×10^{-27} m ²
σ_s^e	激光的发射截面	2×10^{-25} m ²
A_c	纤芯的横截面	7.85×10^{-11} m ²
α_p	掺 Yb^{3+} 双包层光纤对泵浦光的损耗	3×10^{-3} m ⁻¹
α_s	掺 Yb^{3+} 双包层光纤对激光的损耗	5×10^{-3} m ⁻¹
L	掺 Yb^{3+} 双包层光纤的长度	30 m

Γ_p	泵浦光功率填充因子	0.002 4
Γ_s	激光功率填充因子	0.82
R_1	前腔镜反射率	0.99
R_2	输出镜反射率	0.04

掺镜双包层光纤激光器特性曲线如图2所示, 在光纤长度 $L = 25$ m 时, 进入光纤的 20 W 泵浦光几乎全部被吸收。从 $L = 0$ m 开始, 激光功率增长的速度很快, 但是在 $L = 25$ m 以后, 激光功率开始缓慢下降。这是因为在靠近光纤的末端, 泵浦光已被完全吸收, 剩余没有被泵浦的光纤吸收的激光, 造成激光输出功率的降低。由于采用前向端泵浦和输出腔镜光纤端面 4% 的菲涅耳反射, 反向激光功率曲线趋于平缓。因此要获得最大功率的激光输出, 就要对光纤长度进行优化。

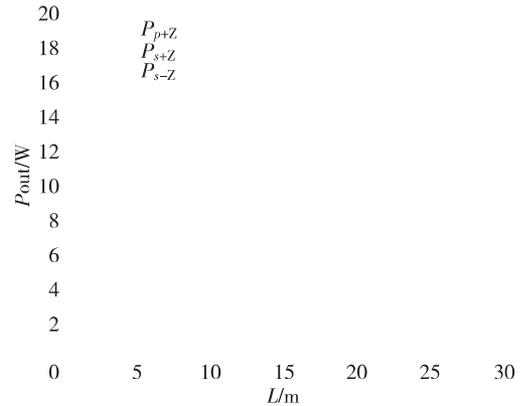


图2 掺镜双包层光纤激光器特性曲线

掺镜双包层光纤激光器在泵浦功率 20 W 时, 不同泵浦光波长下, 输出功率与光纤长度的关系如图3所示, 当抽运波长为 915 nm 时, 最佳光纤长度为 30 m, 最大输出功率 16 W; 当抽运光波长为 975 nm 时, 最佳光纤长度为 10 m, 最大输出功率 16 W。当达到最佳光纤长度后, 975 nm 的 LD 泵浦光纤激光器的输出功率随光纤长度下降得要快。这是由于 975 nm 的吸收截面大, 在较短长度的光纤中, 泵浦光的功率就几乎被吸收完全。因此在相同的掺镜双包层光纤激光器系统中, 要达到同样的输出功率, 采用 915 nm 的 LD 泵浦要比 975 nm 的 LD 泵浦所需要的光纤长度要长。

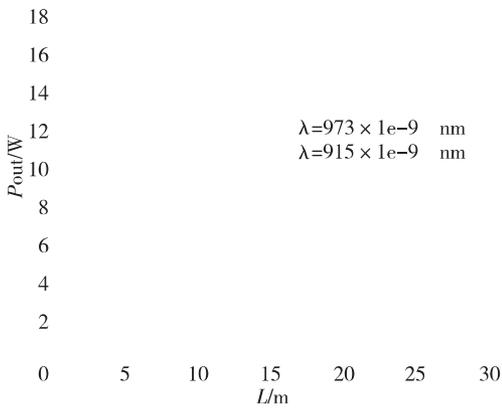


图 3 不同泵浦光波长下 输出功率与光纤长度的关系

掺镱双包层光纤激光器在不同泵浦功率下,输出功率与光纤长度的关系如图 4 所示,光纤激光器随着泵浦功率的增加,输出功率也得到增加。泵浦功率分别为 10、15、20 W 时,所需的最佳光纤长度都是在 20 m 左右。因此在确定的掺镱双包层光纤激光器系统中,随着泵浦功率的提高,所需要的最佳光纤长度是不变的。

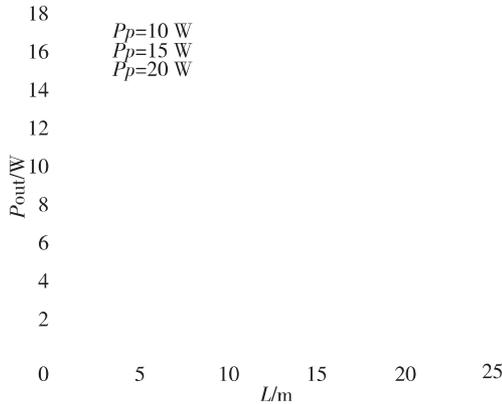


图 4 不同泵浦功率下 输出功率与光纤长度的关系

掺镱双包层光纤激光器在泵浦功率 20 W 时,不同掺杂浓度下,光纤长度与输出功率的关系如图 5 所示,输出功率一定时,掺杂浓度越高,所需要的光纤长度越短。光纤长度一定时,掺杂浓度越高,输出功率就越高。当光纤长度超过最佳值后,在多余的那部分光纤中会产生损耗,使得激光输出功率随着光纤长度的增加而减小。这是因为光纤掺杂浓度越高,对泵浦光的吸收能力也就越强。一般情况下,高的掺杂浓度,利用较短的光纤便可以达到较高的输出功率,最佳光纤长度越短,可以减小光纤对激光的损耗、非线性效应等。但是过高的掺杂浓度会引起 Yb^{3+} 对激光的二次吸收,引起输出功率下降。

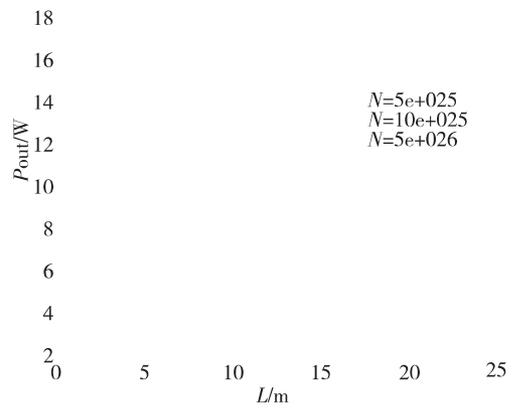


图 5 不同掺杂浓度下,光纤长度与输出功率的关系

掺镱双包层光纤激光器后腔镜反射率与激光器输出功率的关系如图 6 所示,一般情况下,前腔镜对激光的反射率应尽可能高,可以采用全反镜。由图 6 可知后腔镜反射率对激光器输出功率有很大的影响,后腔镜反射率越低,输出功率越高,后腔镜反射率越高,输出功率越低。这就是高功率双包层光纤激光器普遍采用光纤端面 4% 的菲涅耳反射的原因。

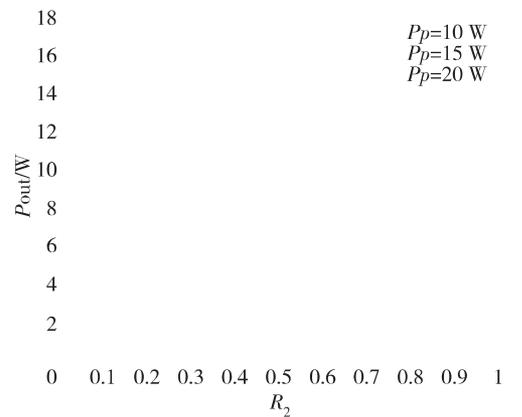


图 6 后腔镜反射率与激光器输出功率的关系

3 结论

通过求解速率方程,得出掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的输出激光功率表达式。根据已有的泵浦源和掺 Yb^{3+} 双包层光纤等相关参数,利用 Matlab 软件进行数值模拟,分别分析了泵浦波长、泵浦功率、掺杂浓度、输出腔镜、光纤长度对激光器输出激光功率的影响。结果表明,在泵浦功率一定时,泵浦波长为 915 nm 所需的最佳光纤长度比泵浦波长为 975 nm 要长; Yb^{3+} 的掺杂浓度越高,所需光纤长度越短,掺杂浓度越低,所需光纤长度越长;后腔镜反射率选择应越低越好。泵浦功率的增加,所需的最佳光纤长度并没有明显的变化。这些结论对实际掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的系统设计提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 楼祺洪. 高功率光纤激光器及其应用[M]. 北京 : 中国科学技术大学出版社 2010.
Lou Q H ,High power fiber lasers and its applications[M]. Beijing :University of Science and Technology of China 2010.
- [2] Jeong Y ,Sahu I K ,Payne D N ,et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW of continuous-wave output power [J]. Opt Express 2004 ,12(25) :6088-6092.
- [3] 杜亮 戴特力 梁一平 ,等. 全光纤激光器中光栅作为腔镜的特点研究 [J]. 重庆师范大学学报 :自然科学版 2011 ,28(4) :49-52.
Du L ,Dai T L ,Liang Y P ,et al. Research of the characteristics of fiber bragg grating as the cavity mirror in all-fiber Laser [J]. Journal of Chongqing Normal University :Natural Science Edition 2011 28(4) :49-52.
- [4] 韩凯 马阎星 王小林 ,等. 高功率掺铽光纤激光的研究进展 [J]. 激光与光电子进展 2010 47(10) :101406.
Han K ,Ma Y X ,Wang X L ,et al. Progress of high power Tm-doped fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress 2010 ,47(10) :101406.
- [5] 马阎星 肖虎 周朴 ,等. 全光纤激光器实现 kW 级功率输出 [J]. 强激光与粒子束 2011 23(5) :1137-1138.
Ma Y X ,Xiao H ,Zhou P ,et al. kW level fiber laser in all fiber format [J]. High Power Laser and Particle Beams ,2011 ,23(5) :1137-1138.
- [6] 张亮 秦莉 张键 ,等. 新型全光纤结构双包层光纤激光器 [J]. 半导体光电 2005 26(1) 34-39.
Zhang L ,Qin L ,Zhang J ,et al. New type all fiber double cladding fiber laser[J]. Semiconductor Optoelectronics ,2005 ,26(1) 34-39.
- [7] 陈昊 李剑锋 欧中华 ,等. 中红外光纤激光器的研究进展 [J]. 激光与光电子进展 2011 48(11) :111402.
Chen H ,Li J. F ,Ou Z. H ,et al. Progress of mid-infrared fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress ,2011 ,48(11) :111402.
- [8] 周继芳 段志春 高曾辉 ,等. 含滤波器多模光纤激光器有效反射率的分析 [J]. 四川师范大学学报 :自然科学版 ,2011 34(4) 551-555.
Zhou J F ,Duan Z C ,Gao Z H ,et al. Analysis of effective reflectivity about multimode fiber laser containing spatial filter [J]. Journal of Sichuan Normal University :Natural Science ,2011 34(4) 551-555.
- [9] Pask H M ,Carman R J ,Hanna D C. Ytterbium-doped silica fiber lasers :versatile sources for the 1-1.2um region[J]. IEEE Selected Topics in Quantum Electron ,1995 ,(1) 2-13.
- [10] 张帆 王春灿 耿蕊 ,等. 高功率掺铽双包层光纤激光器的优化和设计 [J]. 光电工程 2007 34(12) 32-37.
Zhang F ,Wang C C ,Geng R ,et al. Optimization and design of high power ytterbium-doped double-cladding fiber laser [J]. Opto-Electronic Engineering 2007 34(12) 32-37.
- [11] 陈子伦 侯静 姜宗福. 双包层光纤激光器最大输出功率的估算 [J]. 强激光与粒子束 2007 19(4) 577-580.
Chen Z L ,Hou J ,Jiang Z F. Estimation of maximum output power of double clad fiber laser [J]. High power Laser and particle Beams 2007 ,19(4) 577-580.
- [12] Kelson I ,Hardy A A. Strongly pumped fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics ,1998 34(9) :1570-1577.
- [13] 欧攀. 高等光学仿真[M]. 北京 :北京航空航天大学出版社 2011.
Ou P. Simulation of advanced optics[M]. Beijing :BeiHang University 2011.
- [14] Kelson I ,Hardy A A. Optimization of strongly pumped fiber lasers[J]. Journal of Lightwave Technology ,1999 ,17(5) :891-897.

Numerical Analysis of Yb³⁺-Doped Double -Clad Fiber Laser

XU Xiang-tao , DAI Te-li , LIANG Yi-ping , WANG Ding-ju , FAN Si-qiang , ZHANG Peng

(Key Laboratory of Optical Engineering , College of Physics and Electronic Engineering , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China)

Abstract : By solving the rate equations , the expression for output laser power of Yb³⁺-doped double-clad fiber laser was obtained. The effects of pumping wavelength , pumping power , fiber length , doping concentration , output mirror reflectivity on the laser output power were analyzed by using Matlab software. The results show that the optimum fiber length was different under 915nm and 975nm pumping , and was affected by the doping concentration. The output cavity mirror reflectivity should be as small as possible. The optimized output power of Yb³⁺ doped double-clad fiber laser could be achieved through optimizing some system parameters of the laser.

Key words : fiber laser ; rate equation ; Yb³⁺-doped ; numerical analysis

(责任编辑 欧红叶)