

文章编号: 1001-3806(2008)04-0420-04

国产掺镜双包层光纤激光器的研究

张俊^{1,2}, 陈爽¹, 冯莹^{1*}

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073; 2 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

摘要: 高功率光纤激光器在定向能领域有着重要的应用。为了研究双包层光纤激光器的输出特性, 采用数值模拟和实验研究的方法, 进行了理论分析和实验验证。用国产大芯径掺镜光纤搭建了双包层光纤激光器, 获得了 1092nm 的激光输出, 功率为 1.6W。结果表明, 光纤最佳长度与后腔镜和抽运功率有很大关系, 通过优化设计后腔镜, 选取最佳后腔镜信号光反射率 R_2 , 可获得最大激光功率输出, 提高激光器效率, 获得特定的稳定的纵模输出, 优化系统的性能。

关键词: 激光技术; 掺镜双包层光纤激光器; 数值模拟; 后腔镜

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

Study on fiber laser with China-made Yb^{3+} -doped double-clad fiber

ZHANG Jun^{1,2}, CHEN Shuang¹, FENG Ying¹

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China; 2. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: High power fiber laser has important application in the directed energy domain. In order to find the laser output characteristic under different fiber length and back-cavity mirrors, numerical simulation and experiment method were used. With home-made large-core Yb-doped fiber, double-clad fiber laser system was constructed. And the signal laser with a central wavelength of 1092nm and the maximum output power of 1.6W was obtained. It was shown that optimum fiber length had important contact with back-cavity and pump power. The maximum output could be obtained with the optimum R_2 . It is found that the output characteristics of the fiber laser can be better by design the reflectivity ratio of the back-cavity mirror.

Key words: laser technique; Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser; numerical simulation; back-cavity mirror

引 言

高功率掺镜光纤激光器具有结构简单、无激发态吸收、无浓度猝灭、有较宽吸收谱和增益谱等优点^[1-2], 已成为研究的热点之一。在 2004 年初的 Photonics West 上, JEONG 等人报道了其输出 1kW 的光纤激光器, 引起轰动; 同年, 他们成功研制了 1.36kW 的连续激光输出, 斜率效率 83%, 光束质量 $M^2 = 1.4$, 为当今单根光纤的最高功率输出^[3-4]。目前, 掺镜光纤激光器的功率输出水平继续提高, 并在空间光通信、工业加工、激光焊接、印刷、打标、医疗以及军事等领域有着广泛的应用前景^[3-6]。作者从稳态速率方程出发, 对掺镜双包层光纤激光器的输出特性进行了研究, 分析了激光输出与光纤长度、后腔镜的关系及光纤中的功率分

布, 并通过实验研究了后腔镜对激光输出的影响。实验证明, 选取合适的后腔镜可以有效降低激光阈值、减弱模式竞争、控制激光波长, 获得稳定的激光输出。

1 理论分析

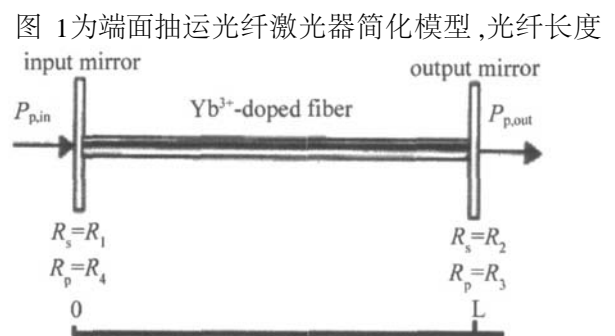


Fig 1 Theory model of end-pumped double-clad fiber laser

为 L , R_1 , R_2 分别为前后腔镜对信号激光的反射率, R_4 , R_3 分别为前后腔镜对抽运光的反射率。为了简化分析, 可认为抽运功率只分布于内包层中, 而纤芯为抽运光提供损耗, 基于这种近似, 腔内激光功率满足如下微分方程^[7]:

作者简介: 张俊 (1982-), 男, 助理工程师, 现从事风洞光学非接触测量方面的研究工作。

* 通信联系人。E-mail: csfengying@sina.com

收稿日期: 2007-05-30; 收到修改稿日期: 2007-10-26

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)] \sigma_{ap} \Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{\Gamma_s \sigma_a(\lambda) [P^+(z, \lambda) + P^-(z, \lambda)]}{h\nu_s A}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)] (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{\Gamma_s [\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)] [P^+(z, \lambda) + P^-(z, \lambda)]}{h\nu_s A}} \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \mp \Gamma_p [\sigma_{ap} N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z)] P_p^\pm(z) \mp \alpha_p(z) P_p^\pm(z) \quad (2)$$

$$\frac{dP^\pm(z, \lambda)}{dz} = \pm \Gamma_s \{ [\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)] N_2 - \sigma_a(\lambda) N \} P^\pm(z, \lambda) \pm \Gamma_s \sigma_e(\lambda) N_2 P_0(\lambda) \mp \alpha_s(z, \lambda) P^\pm(z, \lambda) \quad (3)$$

式中, λ 为信号波长, P^\pm 表示腔内正反向传输的信号功率; P_p^\pm 则表示正反向传输的抽运功率; N_2 为上能级镱离子浓度, N 为掺杂浓度; Γ_s 和 Γ_p 为功率填充因子, Γ_s 由光纤的模式理论得到, Γ_p 则由纤芯与内包层的面积比得出; σ_a 和 σ_e 为镱离子的吸收和发射截面; τ 为自发辐射寿命, α 为光纤中的损耗系数。

通过龙格库塔法求 (1) 式 ~ (3) 式, 则可对双包层掺镱光纤激光器进行数值模拟和仿真计算, 并得出腔内沿光纤的功率分布及激光器输出功率。为了使计算更接近实际情况, 考虑腔镜对腔内所有激光的反射限制, 此时边界条件共有 4 个, 因而增加了数值计算的复杂程度。下面给出边界条件:

$$P_p^+(0) = R_4 \cdot P_p^-(0) + P_{p,m}; P_p^+(L) = R_3 \cdot P_p^-(L) \quad (4)$$

$$P_s^+(0) = R_1 \cdot P_s^-(0); P_s^-(L) = R_2 \cdot P_s^+(L) \quad (5)$$

2 数值计算结果和分析

2.1 光纤长度对输出的影响

根据实验中腔镜的反射率 ($R_1 = 0.99, R_2 = 0.39, R_3 = 0.946, R_4 = 0.062$) 及抽运功率不同时激光输出与光纤长度的关系如图 2a 所示。当抽运功率为 3.7W, 10W, 20W 时, 光纤最佳长度分别为 3.5m, 4m,

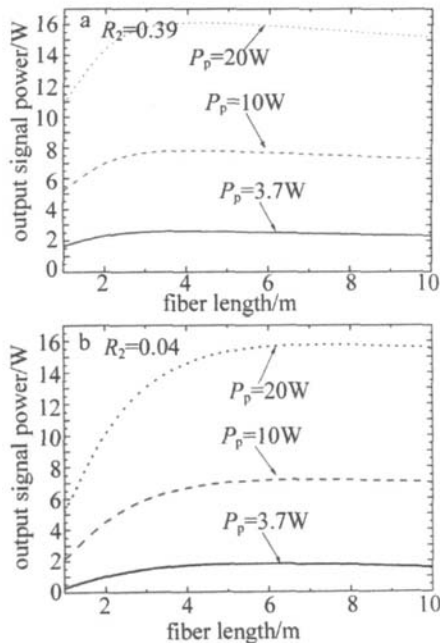


Fig 2 Analysis of optimum fiber length under different R_2

4.5m。可见, 随着抽运功率增大, 光纤最佳长度增大; 但由于增益光纤的高掺杂浓度, 与文献 [8] 相比, 光纤最佳长度很小。而利用光纤端面的菲涅耳反射作后腔镜时 (一般来说, 指 R_2, R_3 均为 0.04), 激光输出与光纤长度的关系如图 2b 所示, 光纤最佳长度分别为 6m, 7m, 7.2m。与图 2a 相比, 随着 R_2 和 R_3 的减小, 光纤最佳长度变大。

可见, 增大抽运功率, 光纤最佳长度变大; 增大 R_2, R_3 , 光纤最佳长度减小; 而在小功率抽运时, 由于增益光纤的高掺杂浓度, 在较短长度的光纤内, 抽运光就能被充分吸收, 获得最大的激光输出, 光纤最佳长度很短。所以, 实验中应根据不同长度的光纤选取不同反射率的后腔镜, 以获得最大的激光输出, 提高系统效能。

2.2 后腔镜对输出的影响

图 3 为不同抽运功率时 R_2 与输出功率的关系。在设定的抽运功率下, 最佳反射率 R_2 分别为 0.52, 0.33, 0.2。

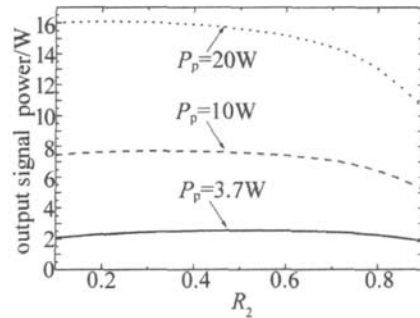


Fig 3 R_2 versus output power under different pump power

可见, 最佳反射率随着抽运功率的增大而减小。因此, 对于小功率抽运的光纤激光器来说, 应选择最佳反射率 R_2 , 以增大激光输出。

2.3 激光功率沿光纤的分布

图 4 为不同抽运功率时腔内沿光纤的功率分布。可见, 抽运光沿光纤呈指数分布, 在光纤前端功率最高, 向光纤后端方向减小; 当抽运功率较小时, 由于 R_2 较大, 信号激光在腔内保持较高功率的振荡, 但是输出功率仍很小; 同时, 因为增益光纤的高掺杂浓度, 即使光纤长度只有 6m, 仍能充分吸收抽运光, 所以增大 R_3 对提高激光输出功率作用不明显。

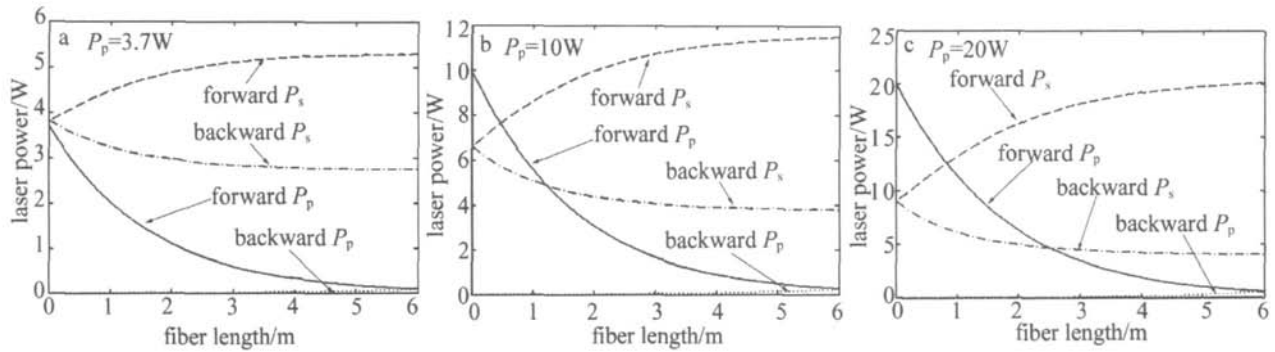


Fig 4 Distribution of pump power and laser power along the fiber length

3 实验研究

3.1 实验装置

实验装置见图 5,采用 F-P腔结构,端面正向抽运。抽运源为 Lmo公司生产的半导体激光器,尾纤输

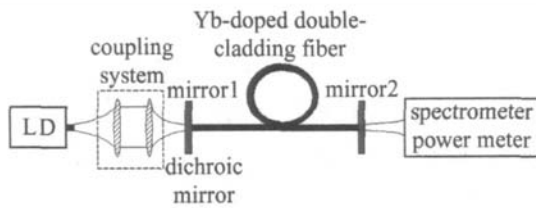


Fig 5 Experiment schematic diagram of fiber laser

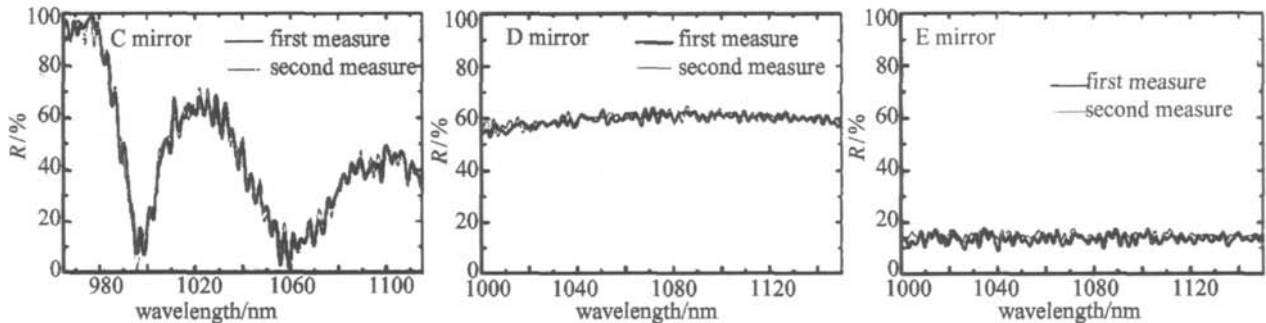


Fig 6 The reflectivity spectrum of the back-cavity mirrors

实验中采用了不同组合的腔镜,现将其进行编号(见表 1),以便于说明。

Table 1 Cavity mirror of double-clad fiber laser

cavity mirror	front cavity mirror	back cavity mirror
I	A	C
II	A	D
III	A	E
IV	A	Fresnel reflect
V	B	C

3.2 实验结果

实验中透镜耦合系统安装在五维调节架上,通过调试保持光路同轴。增益光纤置于 2 个五维的光纤精密调节架上,精密调节光纤的位置,使光纤端面与二相色镜紧贴,实现最好的耦合与激光输出。采用 6m 的增益光纤,换用多种腔镜搭建激光器系统,测得结果见表 2。

出最大功率 25W,尾纤芯径为 200 μ m,数值孔径为 0.22,工作波长为 975nm。增益光纤为烽火通信提供的 D 形掺镱双包层光纤,内包层尺寸 400 μ m \times 350 μ m,数值孔径为 0.37,纤芯直径为 31.5 μ m,数值孔径为 0.14。抽运源输出的多模激光经透镜耦合系统聚焦后通过前腔镜耦合进增益光纤。前腔镜选用了两只二相色镜,对 975nm 抽运光透过率分别为 93.8%和 92.6%,对 1050nm ~ 1100nm 波段的反射率均在 99.9%以上,并分别记为 A 镜和 B 镜。后腔镜先后采用了 3 只部分反射镜,记为 C 镜、D 镜、E 镜,其反射谱见图 6。为了深入研究腔镜对激光器特性的影响,实

Table 2 Output characteristic of fiber laser with diferent cavity mirror

cavity mirror	threshold pump power/W	pump power incident on fiber/W	output signal power/W	center wavelength/nm
I	2.3	3.7	1.6	1093
II	2.2	3.7	1.69	1092
III	3.8	3.7	1.7	1080
IV	4.2	3.7	1.84	1075
V	2.5	3.42	1.33	1093

3.3 分析与讨论

从表 2 可见,采用 II 号、I 号、III 号、IV 号腔镜时阈值功率依次增大,这是因为 R_2 依次减小所致;采用 IV 号、III 号、II 号腔镜时,随着 R_2 的增大,信号波长向长波方向移动^[9]。I 号与 V 号腔镜的不同在于前者 R_4 较小,所以耦合入纤功率大。通过比较二者的入纤抽运功率和输出功率,可得激光器输出功率随抽运入纤

功率增大而线性增大,并且从另一个侧面说明了耦合系统和光纤激光器实验的稳定性。

采用 II 号、III 号、IV 号、V 号腔镜时,激光输出光谱见图 7。可见,V 号腔镜输出光谱形状优于其它腔镜,

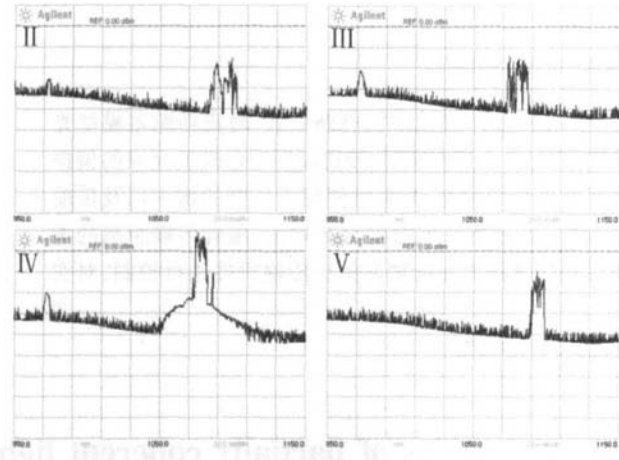


Fig 7 Spectra of output signal and pump laser

为稳定的多纵模输出,既无残余抽运光,也无放大自发辐射荧光输出,这是因为其后腔镜具有良好的选模作用(见图 6)。而其它后腔镜对各波长反射率几乎相同,不能有效消除残余抽运光,导致测得功率值不准确,并且模式竞争更加激烈。

从而可知,小功率抽运时若是采用光纤磨抛端面作后腔镜,则难以得到窄线宽和稳定的激光输出;若要消除输出中含有的荧光和残余抽运光,提高系统效能,获得特定的稳定的纵模输出,需要对后腔镜进行优化设计,使其具有良好的选模机制。

4 结 论

从速率方程出发,理论分析了不同情况下激光器

的输出特性,得出光纤最佳长度与后腔镜、抽运功率都有很大关系;通过选取最佳 R_2 可获得最大激光功率输出。采用国产大芯径掺镱光纤搭建了双包层光纤激光器,研究了后腔镜对激光输出的影响。实验中发现,增大 R_3 和 R_2 可降低激光阈值;采用选模作用好的后腔镜,可得到需要的激光波长,降低腔内的模式竞争,获得稳定的激光输出。故通过优化设计后腔镜,能够提高激光器的效率,获得稳定的纵模输出,优化系统的性能。

参 考 文 献

- [1] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPER A C, *et al* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33 (7): 1049-1056.
- [2] MEIL, WANG Y, WANG Zh J, *et al* Numerical analysis of the transient-state behavior of Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser [J]. Laser Technology, 2006, 30 (3): 225-231 (in Chinese).
- [3] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1kW continuous-wave output power [J]. Electron Lett, 2004, 40 (8): 470-472.
- [4] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12 (25): 6088-6092.
- [5] LIU C H, EHLERS B, DOERFEL F, *et al* 810W continuous-wave and single-transverse-mode fiber laser using 20 μm core Yb-doped double-clad fibre [J]. Electron Lett, 2004, 40 (23): 1049-1050.
- [6] REN G G, HUANG J J. Major progress of U. S 2005' high-energy laser technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006 (6): 3-9 (in Chinese).
- [7] KELSON I, HARDY A. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34 (9): 1570-1577.
- [8] WEI W L, YAN P, OU P. Numerical analysis and experimental results of output characteristics for strongly pumped Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser [J]. Optical Technique, 2004, 30 (1): 13-16 (in Chinese).
- [9] CHEN B, CHEN L R, LIN Z Q, *et al* Selecting lasing wavelength by varying fiber length [J]. Chinese Journal of Laser, 1999, 26 (12): 1061-1065 (in Chinese).

(上接第 419 页)

- [5] ZHANG Zh P, YANG FM. Automated operational software at Shanghai SLR station [C]//Proceedings of the 13th International Laser Ranging Workshop. Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 1-3.
- [6] ZHANG Zh Y, SUIX L. Faint signal digital correlation detection of laser ranging study and simulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29 (7): 661-665 (in Chinese).
- [7] DEGNAN J J. Optimization of the correlation range receiver parameters in SLR2000 [C]//Proceedings of the 13th International Laser Ranging Workshop. Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 3-7.
- [8] MCGARRY J, CHEEK J, CONKLIN B, *et al* SLR 2000 automated system control software [C]//Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging. Frankfurt Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 5-8.
- [9] RICKLEFS R L, SHELUS P J. Poisson filtering of laser ranging data [C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ran-

ging Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 26-29.

- [10] LUCK J, MOORE C, GREENE B. Autonomous laser ranging results from mount stromlo [C]//Proceedings of the 12th International Workshop on Laser Ranging Matera: A.S.L., 2000: 2-12.
- [11] SAMWEL S W, METWALLY Z, MIKHAL J S, *et al* Analyzing the range residuals of the SLR data using two different methods [J]. NR IAG Journal of Astronomy and Astrophysics, 2005, 4 (1): 1-14.
- [12] JEFFERYS W H, RIES J G. Bayesian analysis of lunar laser ranging data [C]//Proceedings of the Conference at Pennsylvania State University. Berlin: Springer Verlag, 1997: 2-10.
- [13] SEAGO J H. Enhancements toward robust normal point generation [C]//Proceedings of 11th International Workshop on Laser Ranging. Frankfurt Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 1-8.
- [14] WANG H, LIS, ZHOU H. Correction of atmosphere delay for geoscience laser altimeter system [J]. Laser Technology, 2007, 31 (2): 169-171 (in Chinese).