

文章编号: 1001-3806(2006)04-0366-04

高功率多模钕镜共掺双包层光纤激光器的研究

董淑福^{1,2}, 陈国夫², 赵尚弘¹, 沈 华², 王屹山²

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077; 2 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘要: 为了获得尽可能高的输出功率以满足应用需求, 分别以实验和数值分析的方法对钕镜共掺双包层光纤激光器的性能进行了进一步研究。实验上, 采用加拿大国家光学研究所生产的 EY805 型钕镜共掺双包层多模光纤作为增益介质, 描述了输出功率随输入抽运功率以及光纤长度的变化, 在光纤长度为 1.8m 的情况下, 获得了 3.5W 的最大输出功率, 光-光转换效率达 31.8%。基于速率和传输方程, 对该钕镜共掺双包层光纤激光器进行了数值模拟, 在相同光纤长度下, 计算的最大输出功率约 4.4W, 光-光转换效率 40%, 比实验结果要高。讨论了进一步对该光纤激光器性能进行优化的措施。该结果对于促进钕镜共掺双包层光纤激光器的实用化及其性能改进具有重要意义。

关键词: 激光器; 双包层光纤; 钕镜共掺; 包层抽运; 数值模拟

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Research of high-power multimode Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-cladding optical fiber lasers

DONG Shu-fu^{1,2}, CHEN Guo-fu², ZHAO Shang-hong¹, SHEN Hua², WANG Yi-shan²

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract In order to achieve much higher output power to satisfy the application requirements, the performances of erbium/ytterbium co-doped double-cladding fiber lasers (EY-DCFLs) are studied experimentally and theoretically. By using the EY805 model erbium/ytterbium co-doped multimode double-cladding fiber manufactured by NO, Canada as the gain medium, it is described that the output power is a function of the input pump power and fiber length. The maximum output power is about 3.5W by using a 1.8m fiber with an optical to optical conversion efficiency of 31.8%. Numerical analysis of this EY-DCFL is also performed based on the rate and propagation equations. The calculated output powers of about 4.4W and conversion efficiency of 40% for the same fiber are a little larger than the experimental results. Then further optimization measures of the EY-DCFL are discussed, such as preparing of the fiber end well, adding dichroism mirror at the output end and making fiber Bragg gratings directly in the fiber core. The above results are very important for the utilization and performance improvement of EY-DCFL.

Key words lasers; double-cladding fiber; erbium/ytterbium co-doped; cladding pump; numerical simulation

引 言

由于在通信、医疗、传感、光存储及激光打印等领域的潜在应用价值, Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤激光器^[1~3] (EY-DCFL) 及其放大器^[4~7] 引起了人们的广泛关注。包层抽运技术结合 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺确保了从高功率、大尺寸和大数值孔径抽运光束向高功率、高亮度、衍射极限输出激光的高效转换, 并有效地抑制了单掺 Er³⁺ 光纤中的能量上转换^[8] 和自脉动^[9,10]

等缺陷。

作者给出了 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤激光器的最新实验结果; 基于速率和传输方程, 在相同条件下进行了数值模拟, 模拟中考虑了抽运光波长随工作电流变化的影响, 并对二者进行了对比。

1 光纤特性及实验装置

实验中所用光纤为加拿大国家光学研究所生产的 EY805 型 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层多模光纤^[12,31], 其纤芯成分为: $4.80 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} \text{ Er}^{3+}$, $3.73 \times 10^{26} \text{ m}^{-3} \text{ Yb}^{3+}$, $2.07 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} \text{ Ge}^{4+}$ 以及 $4.55 \text{ Ge}^{4+} \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3} \text{ P}^{5+}$ 等。该光纤纤芯为圆形, 直径和数值孔径分别为 16 μm 和 0.20, 内包层为正六边形, 两平行边间的距离为 200 μm , 数值孔径为 0.35。该光纤在 976nm 和

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60007003)

作者简介: 董淑福 (1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光通信与激光技术、通信网络研究。

E-mail: shufudong@163.com

收稿日期: 2005-06-06 收到修改稿日期: 2005-07-14

1535nm 光谱区域的吸收谱如图 1 所示。

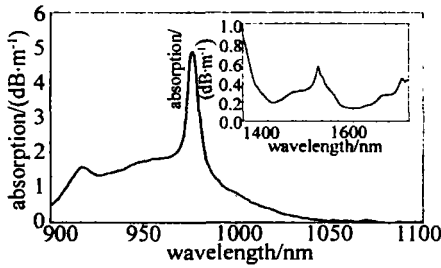


Fig 1 Absorption spectrum of EY805 fiber at 976nm spectral region, the insert curve shows the absorption spectrum of EY805 fiber at 1535nm spectral region

实验装置如图 2 所示。所用抽运源为美国 Q Photonics 公司生产的 PUMA-20 CW MM 半导体激光器,

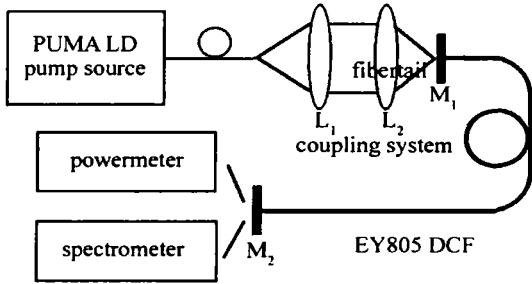


Fig 2 Experimental setups of the high-power Er/Yb doped F-P cavity DCF. L₁—collimating lens L₂—focusing lens M₁—input dichroic mirror M₂—output dichroic mirror

在室温下的最大输出功率为 16.7W, 发射波长从阈值时的 961nm 移动到最大电流时的 979nm。其输出尾纤的熔石英纤芯直径为 116μm, 数值孔径为 0.22。由于抽运源输出尾纤参数 (纤芯直径及数值孔径) 均优于 EY805 光纤内包层参数, 因而, 从理论上来说只需简单的 1:1 成像聚焦结构就可以获得高的耦合效率^[11], 所以选用了两个 10^x/0.25 的高性能显微物镜来组成准直聚焦系统。F-P 腔的输入二色镜在 1535nm~1570nm 具有 99.63% 以上的反射率, 而在 960nm~979nm 具有 93.2% 以上的透过率。为简单起见, 精确切割的光纤端面用作输出耦合镜, 它具有约 4% 的菲涅耳反射。输出激光用一个 45° 二色镜进行滤光, 用光谱物理公司生产的 407A 功率计测量其输出功率, 用日本 Advantest Q8344A 光谱分析仪来测量

其输出频谱。

2 实验结果

根据图 1 中所给出的 EY805 光纤的吸收系数 (4.86dB/m@976nm), 获得高激光输出功率所需的最佳光纤长度约为 2.06m。根据现有的几段光纤长度并考虑其它用途, 分别用长度为 1.15m, 1.8m 和 2.8m 进行了实验。图 3 中给出了不同光纤长度下 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤激光器的输出功率随入纤抽运功率的变化。可见, 长度为 1.8m 时输出功率最大, 在

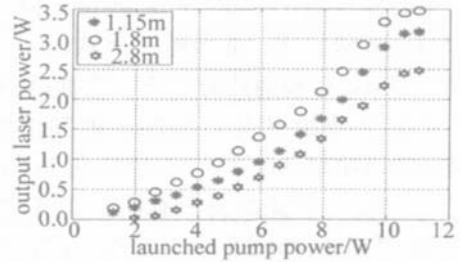


Fig 3 Output laser power as a function of launched pump power of the EY805-DCF for different lengths

最大抽运时的输出激光功率约 3.5W; 但对于光纤长度为 1.15m 和 2.8m 时, 输出激光功率都下降, 最大输出功率分别约为 3.1W 和 2.5W。对于 1.15m 光纤来讲, 输出功率低是因为光纤太短, 对抽运光的吸收很不充分所致; 而对于 2.8m 光纤, 主要是该光纤在 1535nm 波长区域具有较大的吸收损耗所致 (见图 1)。图中斜效率的改变是由于抽运源的输出波长随驱动电流的增加而变化 (从 961nm 到 979nm), 而 EY805 光纤的吸收系数也随波长逐渐变化 (见图 1), 因此, 吸收的抽运功率并不随入纤抽运功率线性增加。如果考虑输出激光功率对吸收的抽运功率的斜效率, 则分别为 42.5% (1.8m), 39.1% (1.15m) 及 28.2% (2.8m)。光纤为 1.15m 和 1.8m 时的入纤抽运激光阈值约 650mW, 但为 2.8m 时, 上升到约 2W。最大入纤抽运功率是通过将抽运光耦合到一段长约 10cm 的 EY805 光纤中测得, 同时考虑了前腔镜对抽运光的透过率。

图 4 是上述 3 种光纤长度下, Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤激光器在最大抽运时的输出光谱。当光纤长为

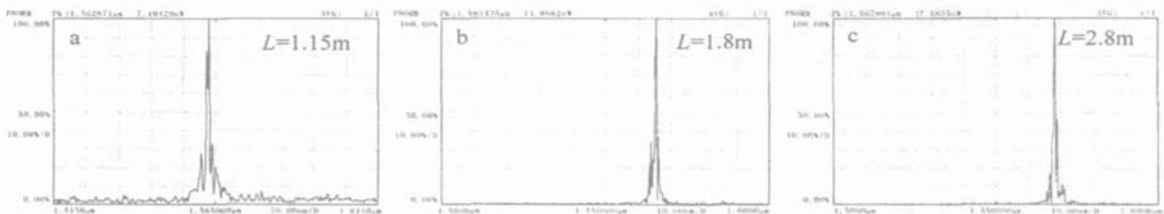


Fig 4 Output spectrum of the EY805-DCF at the maximum pump power for different fiber lengths

1.15m 时, 中心波长为 1563.0nm, 随着光纤长度的增加, 输出波长向长波长移动, 1.8m 时为 1565.4nm, 2.8m 时为 1567.8nm。输出波长向长波长移动是由于

Er³⁺ 的再吸收所致。

对于长度为 1.15m 的 EY805 光纤, 在实验中还观察到了 Yb³⁺ 辐射谱的产生及其随抽运功率的变化情

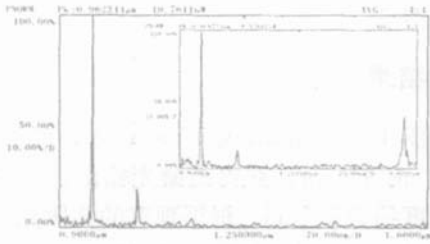


Fig 5 Yb³⁺ radiation at fiber length of 1.15m and pump power of 900mW, the insert curve shows the simultaneous emission of Yb³⁺ and Er³⁺ at pump power of about 1 W

况,如图 5所示。当抽运功率上升到约 900mW 时,首先出现了中心波长为 1.0496 μ m 的频谱成分,这是由于 Yb³⁺ 从 ²F_{5/2}能级向 ²F_{7/2}能级跃迁所致,显然此时没有 Er³⁺ 的 1.55 μ m 带辐射成分产生。当抽运功率上升至约 1W 时,Er³⁺ 开始出现 1.562 μ m 的频谱成分;当进一步提高抽运功率到 1.1W 时,Er³⁺ 在 1.562 μ m 的跃迁占据主导地位,但此时仍旧有同时亦有非常小的 1.07 μ m 的频谱成分,如图 5 中小图所示;当在进一步提高抽运功率时,将导致 Yb³⁺ 辐射的彻底消失,其上能级能量将彻底转移给 Er³⁺。这一现象可从一定程度上证实 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺系统的工作机理。

3 数值分析

Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤激光器中粒子数速率方程及抽运功率和信号功率沿光纤长度的传输方程已在文献 [2] 中给出。数值模拟中的有关参数的取值,若无特殊说明,亦同文献 [2],文献 [3]。

图 6 中给出了实验中所用 3 种光纤长度下,数值

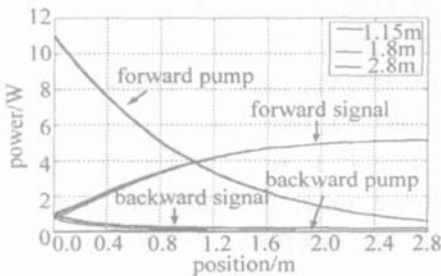


Fig 6 Pump and signal powers as a function of the position along the fiber for different fiber lengths

模拟所得的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤激光器的性能。从图中可以看出,抽运功率和激光功率沿光纤长度几乎具有相同的变化趋势,因此,从该图可以得到任意光纤长度时的激光器性能。

显然,通过增加 EY 805 光纤的长度,越来越多的抽运光被吸收,导致高的激光输出功率和低的残留抽运功率。光纤长度为 1.8m 和 2.8m 时的输出激光功率分别为 4.66W 和 4.93W,光-光转换效率分别为 42.4% 和 44.8%。与图 3 的实验结果比较可见,3 种光纤长度下计算所得的输出激光功率都比实验结果

大,并且光纤长度为 2.8m 时的计算结果仍旧比 1.8m 时略大,而实验结果却比 1.8m 时低约 1W。造成这些差异的原因有: (1) 进行理论分析时所用的部分数据并非由 EY 805 光纤实测所得,而是取自一些相关文献,这与该光纤的实际特性可能存在差异; (2) EY 805 光纤在购买后随着放置的时间而性能下降,抽运带及激光带的实际背景散射损耗值比厂家给出的值要高。

为了对数值模拟与实验结果进行精确比较,必须考虑 EY 805 光纤的吸收特性(见图 1)。通过将不同波长处的吸收系数归一化,并乘以 Yb³⁺ 在 976nm 处的吸收截面 ($5.0 \times 10^{-25} / \text{m}^2$),可获得 960nm ~ 980nm 任意波长的吸收截面,并取 Yb³⁺ 的辐射截面等于吸收截面。

图 7 是光纤长度为 1.8m 时,在不同入纤抽运功

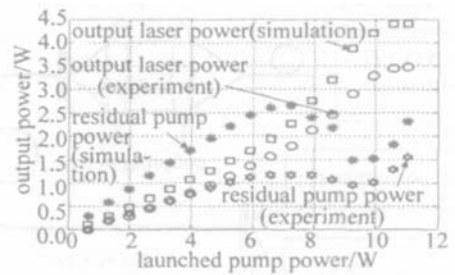


Fig 7 Calculated and experimental results of output laser powers and residual pump powers at different pump powers for a fiber length of 1.8m

率下,数值模拟及实验分别所得的输出激光功率及残留抽运功率。可以看到,不管激光功率还是残留抽运,数值模拟与实验结果具有相同的变化趋势,唯一区别是实验值要比模拟值低一些,尤其是高抽运时的输出激光功率。例如,在最大抽运时的实验输出激光功率约 3.5W,这比计算值 (4.4W) 低 20%。除此之外,通过考虑 Yb³⁺ 在不同波长处截面的变化,实验与理论之间具有较好的一致性。否则,图 3 中的特性将无法解释。图中在入纤抽运功率约 9.2W 处残留抽运功率出现一最小值是由于此时激光抽运波长正好位于 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤的峰值吸收波长,使抽运吸收比较充分所致。

该激光器性能的进一步优化,应考虑输出腔镜对抽运光和激光的反射率 (R_{2p} 和 R_{2s})。图 8 中给出了

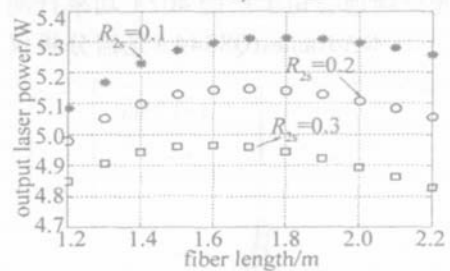


Fig 8 Output laser powers of the EY-DCFL at different fiber length and different output mirror reflectivity

当 R_{2p} 取 0.98 R_{2s} 分别取 0.1, 0.2 和 0.3 时,输出激光功率随光纤长度的变化曲线。显然,当 $R_{2s} = 0.1$ 时,

在腔长约 1.7m ~ 1.8m 时可以获得超过 5.3W 的最大输出激光功率, 比仅利用光纤端面 4% 的菲涅耳反射情形(光纤长 1.8m 时)高 700mW, 这主要是后腔镜的存在可充分利用抽运光, 使光纤长度变短, 从而减小了对抽运光和激光的散射损耗。

4 讨论

尽管与先前的报道相比^[2,3], 本文中所获得的 3.5W 最大输出功率及 31.8% 的整体光-光转换效率都大大提高, 但仍比理论分析值要低。造成这些差异的原因如下: (1) 由于 EY805 双包层光纤的内包层直径约 200 μ m, 当前尚无精确切割工具可用, 而用简易切割刀制作的端面会略有倾斜或不平, 导致光纤端面与输入二色镜之间存在间隙, 从而使反射率降低; (2) 在数值模拟中, 忽略了 Er^{3+} 上能级粒子数及上转换等其它效应, 因此计算所得的值要比真实值略高一些; (3) 由于抽运源的输出波长随着抽运电流的增大从 961nm 移动到 979nm, 而 EY805 光纤的吸收系数在波长超过峰值吸收波长时却迅速下降, 因此, 实际吸收的抽运功率并不随入纤抽运功率线性增加。

根据图 8 中模拟结果, 可通过在输出端加一高性能二色镜 ($R \approx 100\% @ 976\text{nm}$, $T = 90\% @ 1565\text{nm}$) 来进一步提高该光纤激光器的性能。在光纤长约 1.7m ~ 1.8m 时, 可以使输出激光功率提高 700mW。当然, 如果使用锥形光纤束耦合器将更高的功率耦合进双包层光纤的内包层, 并使用光纤布喇格光栅作为输入、输出耦合镜, 将可以实现一个稳定、紧凑、高功率、高效率且全光纤的激光器。

5 结论

给出了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层多模光纤激光器的最新实验及相应的理论模拟结果。实验中获得了波长为 1.565 μ m、功率为 3.5W 的多模激光输出, 入纤抽运阈值 660mW, 光-光转换效率达 31.8%, 这是目前国内用该类光纤获得的最好结果。另外, 基于简化的速率

和传输方程, 对该 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器进行了数值模拟, 以进一步优化其性能。在当前实验条件下, 通过进一步优化系统, 如光纤长度、耦合系统以及输出腔镜等, 将可以获得更高的输出。

参 考 文 献

- [1] NILSSON J, ALAM S, ALVAREZ-CHAVEZ JA *et al*. High-power and tunable operation of erbium-ytterbium codoped cladding-pumped fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 2003, 39(8): 987~994.
- [2] DONG Sh F, ZHAO Sh H, ZHUANG M L. Experiments and analysis of double cladding erbium-ytterbium codoped optical fiber lasers [A]. Materials Active Devices and Optical Amplifiers [C]. Wuhari: SPIE, 2003, 214~220 (in Chinese).
- [3] ZHAN Sh B, ZHAO Sh H, DONG Sh F *et al*. The experimental study of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped double clad fiber laser [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 606~608 (in Chinese).
- [4] GOLDBERG L, KOPLow J. Compact side pumped 25dBm Er/Yb codoped double cladding fiber amplifier [J]. Electron Lett 1998, 34(21): 2027~2028.
- [5] DONG Sh F, ZHAO Sh H, ZHAN Sh B *et al*. Operation principles and numerical analysis of double cladding erbium-ytterbium codoped optical fiber amplifiers [A]. High-power Lasers and Applications II [C]. Shanghai: SPIE, 2002, 28~36 (in Chinese).
- [6] XIA G, JI D, ZHAN JH, ZHAO Sh H *et al*. Performance study on double cladding Er/Yb codoped fiber amplifiers with a reflector [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 12~15 (in Chinese).
- [7] ZHUANG M L, ZHAO Sh H, DONG Sh F *et al*. Numerical analysis of the population distribution characteristics in $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ codoped double clad fiber amplifiers [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 379~382 (in Chinese).
- [8] ZHAN Sh B, ZHAO Sh H, DONG Sh F *et al*. Effects of suppressing energy transfer upconversion in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped fiber laser [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(6): 400~403 (in Chinese).
- [9] DING M, CHEO D K. Effects of Yb:Er codoping on suppressing self pulsing in Er doped fiber lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1997, 9(3): 324~326.
- [10] ZHAO Sh H, ZHAN Sh B, DONG Sh F *et al*. The effects of suppressing for self-pulsing behavior in Er^{3+} -doped and $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped fiber laser [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2003, 14(6): 577~580 (in Chinese).
- [11] DONG Sh F, CHENG G H, YANG L Zh *et al*. Studies on the pump coupling and laser feedback in double cladding fiber lasers [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 523~525 (in Chinese).