

# 高功率单模 $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器\*

董淑福<sup>1,2</sup> 王屹山<sup>2</sup> 沈 华<sup>2</sup> 陈国夫<sup>2</sup>

(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** 给出了单模输出的铒镱共掺双包层光纤激光器(EY-DCFL)的数值分析及最新实验结果. 基于速率方程及功率传输方程,对单模 EY-DCFL 进行数值分析,从理论上对其性能进行优化. 然后,在相同条件下进行了 EY-DCFL 的实验研究. 描述了输出激光功率随入纤泵浦功率和光纤长度的变化以及输出激光波长随光纤长度的变化. 在光纤长度为 6.3 m 时,获得了波长为 1566 nm、最大功率为 2.2 W 的单模激光输出,整体光-光转换效率 22%,这是目前国内用该类光纤获得的最高单模输出功率.

**关键词** 光纤激光器;双包层光纤;铒镱共掺;包层泵浦;数值模拟

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## 0 引言

以双包层光纤为基础的包层泵浦技术是产生波长 1~2  $\mu\text{m}$  范围高功率激光的最有效途径<sup>[1]</sup>. 近年来,由于光纤结构设计、制造技术以及泵浦激光二极管性能的提高,利用掺 Yb、Nd 以及 Nd/Yb 共掺双包层光纤获得波长约 1.1  $\mu\text{m}$ 、功率 100~1000 W 的单模或多模输出的激光器已有报道<sup>[1~5]</sup>. 但是,在 1.5~2.0  $\mu\text{m}$  的所谓眼睛安全波长范围内的辐射,特别是波长 1.55  $\mu\text{m}$ ,由于其在光纤通信、眼睛安全激光雷达、自由空间以及卫星光通信中的重要性, $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤激光器将是最有力的竞争者<sup>[1,6~8]</sup>.

本文报道了  $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$  共掺双包层多模光纤激光器的最新实验结果,分析了输出光功率随光纤长度及输入泵浦功率的变化关系. 基于速率方程及功率传输方程,对  $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤激光器的性能进行了数值模拟,同时对理论和实验结果进行了对比分析.

## 1 理论模型

$\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤激光器的能级结构模型及相应的粒子数速率方程和功率传输方程,在很多文献中都有表述,具体可参看相关文献<sup>[9,10]</sup>.

## 2 光纤特性

数值分析及实验中所用的光纤为加拿大国家光学研究所(INO)生产的 EY802 型单模  $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$

共掺双包层光纤,其纤芯成份为: $3.43 \times 10^{25} / \text{m}^3$  (0.43 wt%)  $\text{Er}^{3+}$ ,  $3.16 \times 10^{26} / \text{m}^3$  (4.13 wt%)  $\text{Yb}^{3+}$  以及  $2.91 \times 10^{27} / \text{m}^3$  (6.81 wt%)  $\text{P}^{5+}$  等. 该双包层光纤圆形单模纤芯的直径和数值孔径分别为 6.4  $\mu\text{m}$  和 0.17;其内包层为正六边形,两平行边间的距离为 126  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.35. 该光纤在 980 nm 带和 1532 nm 带的吸收谱分别如图 1、2,其在 1115 nm 处的背景损耗小于 44 dB/km.

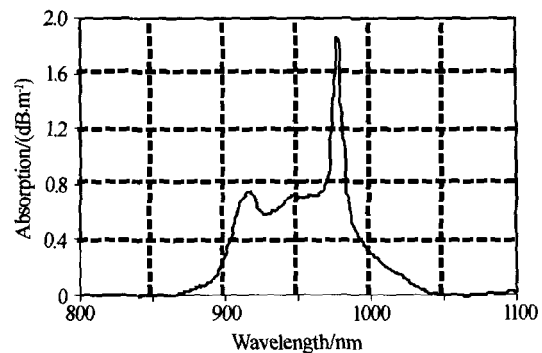


图 1 EY802 光纤在 980 nm 带的吸收谱  
Fig. 1 Absorption spectrum of the EY802 fiber at 980 nm band

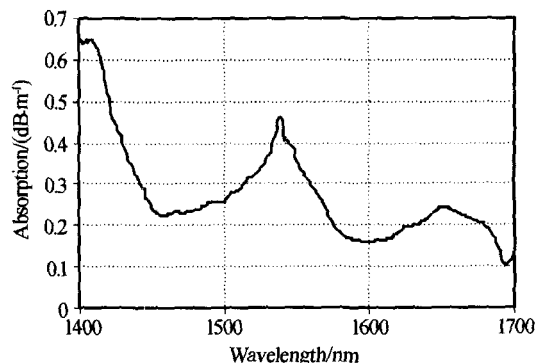


图 2 EY802 光纤在 1535 nm 带的吸收谱  
Fig. 2 Absorption spectrum of the EY802 fiber at 1535 nm band

\*国家自然科学基金(批准号:60137010)资助项目  
Tel:029-84399445 Email:shufudong@163.com  
收稿日期:2004-09-01

基于实验室现有 EY802 光纤长度(约 9.5 m), 结合该光纤在 980 nm 带的吸收谱(图 1)并考虑将来应用, 决定首先选择整个光纤长度进行实验, 然后将其分成两段, 长度分别为 3.2 m 和 6.3 m, 再重复进行实验. 因此, 相应的数值分析的光纤长度亦分别取为上述长度.

### 3 数值分析

入纤泵浦功率取为 10 W, 进行数值模拟的其它参数见表 1<sup>[9~16]</sup>.

表 1 数值模拟时的有关参数

参量	值	参量	值
$\lambda_p / \text{nm}$	976	$\sigma_{Ybpa} / \text{m}^2$	$5.0 \times 10^{-25}$
$\lambda_s / \text{nm}$	1565	$\sigma_{Ybpc} / \text{m}^2$	$5.0 \times 10^{-25}$
$\tau_{Ybz} / \text{s}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$\sigma_{Erpa} / \text{m}^2$	$2.0 \times 10^{-25}$
$\tau_{Erz} / \text{s}$	$11 \times 10^{-3}$	$\sigma_{Erca} / \text{m}^2$	$2.2 \times 10^{-25}$
$\Gamma_p$	0.00234	$\sigma_{Ersc} / \text{m}^2$	$1.6 \times 10^{-25}$
$\Gamma_s$	0.78575	$T_{1p}$	0.94
$k_{YbEr} / \text{m}^3 \text{s}^{-1}$	$2.224 \times 10^{-22}$	$R_{1s}$	0.9963
$\alpha_p / \text{m}^{-1}$	$10 \times 10^{-3}$	$R_{2p}$	0.04
$\alpha_s / \text{m}^{-1}$	$65 \times 10^{-3}$	$R_{2s}$	0.04

图 3 给出了光纤长度为 9.5 m 时泵浦功率和激光功率沿光纤的分布曲线. 从图中可以看出, 在距离输入端小于 7.0 m 的位置上, 腔内前向激光功率逐渐增加, 在 7.0 m 处达到最大值; 在超过 7.0 m 的位置上, 前向激光功率逐渐减小, 在输出端时下降为 3.241 W, 从而使输出激光功率仅为 3.111 W. 此时, 残留的泵浦光仅为 0.483 W, 光-光转换效率约 31%. 当光纤长度取 3.2 m 和 6.3 m 时, 前向的泵浦功率和激光功率沿光纤的分布曲线基本与图 3 相应长度上的曲线一致, 因此未给出.

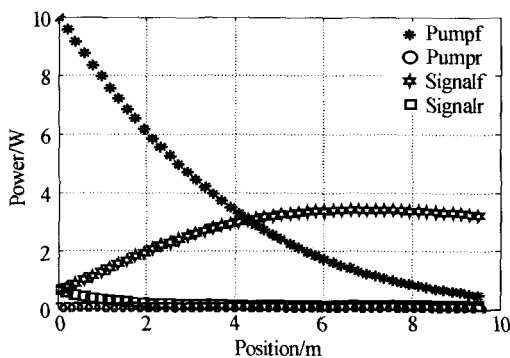


图 3 光纤长度为 9.5 m 时泵浦功率和激光功率沿光纤的分布曲线

Fig. 3 Distributions of pump and laser power along the fiber for a fiber length of 9.5 m

图 4 给出了光纤长度为 3.0~8.0 m、间隔 0.2 m 时不同光纤长度下的输出激光功率、残留泵浦功率以及光-光的转换效率.

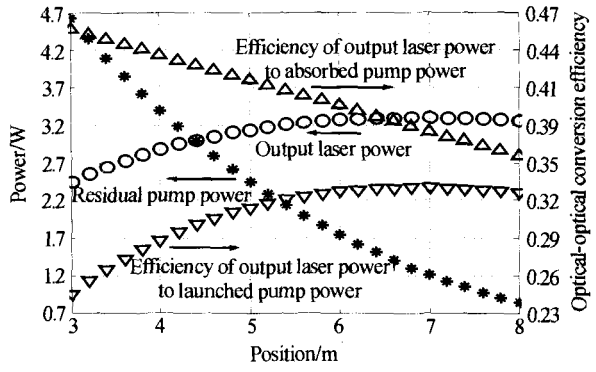


图 4 不同光纤长度时的输出激光功率, 残留泵浦功率及转换效率

Fig. 4 Output laser power, residual pump power and conversion efficiency for different fiber lengths

从图中可以看出, 当光纤长度为 3.2 m 时, 尚有近 4.36 W 的残留泵浦功率未被吸收, 导致获得的激光功率较低, 仅可以获得 2.555 W 的激光输出功率, 但输出激光对吸收的泵浦光的转换效率却很大, 约 45.3%; 当光纤长度为 6.3 m 时, 残留泵浦功率为 1.563 W, 输出激光功率为 3.286 W, 输出激光对吸收的泵浦光的转换效率约 39.0%. 另外, 从图中不难看出, 最佳光纤长度约 6.8~7.2 m, 能够获得的最大输出激光功率约 3.3 W.

为了进一步优化 EY802  $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤激光器的性能, 应对光纤长度及输出腔镜反射率进行合理选择. 图 5 给出了在不同输出镜反射率时输出激光功率随光纤长度的变化曲线, 取  $R_{2p}$  为 0.98,  $R_{2s}$  分别为 0.1、0.2 和 0.3. 可以看到, 当  $R_{2s} = 0.1$  时, 在腔长约 5.1~5.2 m 时可以获得约 3.662 W 的最大输出激光功率, 比仅利用光纤端面 4% 的非涅尔反射的最好结果(光纤长约 7.0 m, 输出功率 3.3 W)高 360 mW, 这主要是后腔镜的存在可充分利用泵浦光, 使光纤长度变短, 从而减小了对泵浦光和产生激光的散射损耗. 当  $R_{2s} = 0.2$  和 0.3

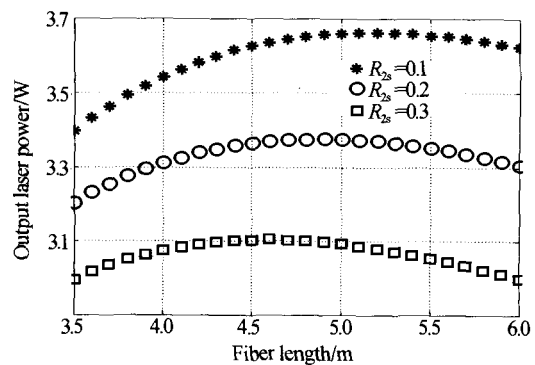


图 5 不同输出镜反射率时输出激光功率随光纤长度的变化曲线

Fig. 5 Changes of output laser power with fiber length for different output mirror reflectivity

时,所能获得的最大激光输出比前者降低(分别约 3.378 W 和 3.104 W),但得到最大值时所需的光纤长度依次缩短(分别为 4.9 和 4.6 m).

图 6 给出了光纤长度为 9.5 m 时,Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup> 共掺双层光纤激光器中 Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> 上能级粒子数的变化特性. 从图中可以看出:1) Er<sup>3+</sup> 的上能级粒子数占 Er<sup>3+</sup> 掺杂浓度的 42% 以上,且沿光纤长度的变化较小,这显示了从 Yb<sup>3+</sup> 到 Er<sup>3+</sup> 的高效能量转移;2) Yb<sup>3+</sup> 的上能级粒子数仅占 Yb<sup>3+</sup> 掺杂浓度的 23% 以下,且沿光纤长度的变化较大,这证明了 Yb<sup>3+</sup> 的基态粒子数并没有被抽空的假设;3) 在光纤长度约小于 6.5 m 的位置处,Er<sup>3+</sup> 的上能级粒子数小于 Yb<sup>3+</sup> 的上能级粒子数,但在大于 6.5 m 的位置处,Er<sup>3+</sup> 的上能级粒子数大于 Yb<sup>3+</sup> 的上能级粒子数. 另外,当光纤长度取 3.2 m 和 6.3 m 时,在三根光纤相同的长度部分,Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> 上能级粒子数几乎分别具有相同的变化规律,区别之处仅在于具体数值随光纤长度的增加略微增减.

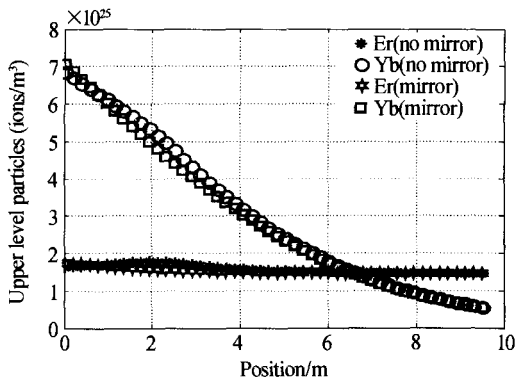


图 6 光纤长度为 9.5 m 时 Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> 上能级粒子数沿光纤长度的变化曲线

Fig. 6 Changes of Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> upper level particles along the fiber length for a fiber length of 9.5 m

### 4 实验方案

实验装置如图 7. 实验中所用的泵浦源为美国 QPhotonics 公司生产的 PUMA-20 CW MM 半导体激光器,在室温下的最大输出功率为 16.8 W,其发射波长从阈值时的 961 nm 移动到最大电流时的 979 nm. 其输出尾纤的熔石英纤芯直径为 116 μm,数值孔径 NA 为 0.22. 由于半导体激光泵浦源输出尾纤的参数(纤芯直径及数值孔径)均优于 EY802 双层光纤内包层的参数,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,所以选用了两个 10×/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 1535~1570 nm 具有 99.63% 以上的反射率,而在 960~980 nm 具有 93.2% 以上的透过率.

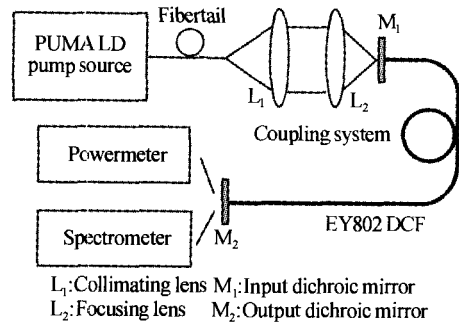


图 7 Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup> 共掺双层光纤激光器的实验装置  
Fig. 7 Experimental setups of the EY802 Er-Yb co-doped F-P cavity DCFL

为简单起见,用精确切割的光纤端面作为输出耦合镜,它具有约 4% 的非涅尔反射. 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 ADVATEST Q8344A 光谱分析仪来测量其输出频谱.

最大入纤功率是通过将泵浦光耦合到一段长约 7 cm 的 EY802 光纤中测得,同时考虑加前腔镜时其对泵浦光的透过率(约 94%).

### 5 实验结果

图 8 给出了光纤长度分别为 9.5 m、3.2 m 和 6.3 m 时 EY802 型 Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup> 共掺双层单模光纤激光器的输出功率随入纤泵浦功率的变化.

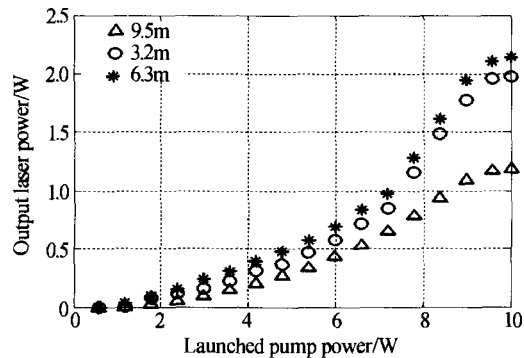


图 8 光纤长度分别为 9.5、3.2 和 6.3 m 时 Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup> 共掺双层光纤激光器的输出功率随光纤泵浦功率的变化  
Fig. 8 Changes of output laser power with launched pump power of Er-Yb co-doped DCFL for the fiber length of 9.5 m, 3.2 m and 6.3 m, respectively

从图中可以看出,当光纤长度为 9.5 m 时,最大输出激光功率约 1.2 W,激光阈值约 1.2 W,最大斜效率为 23.5%;当光纤长度为 3.2 m 时,最大输出激光功率接近 2 W,激光阈值约 1.0 W,此时最大斜效率上升为 53%;当光纤长度为 6.3 m 时,最大输出激光功率约 2.2 W,激光阈值约 0.7 W,此时最大斜效率上升为 55.6%.

值得注意的是,在图 8 中,激光器斜效率也在改

变,造成这一现象的原因是泵浦激光器的输出波长随驱动电流的增加而变化所致.

图9给出了上述三种光纤长度时 EY802  $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层单模光纤激光器在最大输出时的激光光谱.可见,当光纤长度为 9.5 m 时,输出激光波长为 1.568  $\mu\text{m}$ ,光谱宽度约 0.5 nm;当光纤长度为 3.2 m 时,输出激光波长为 1.565  $\mu\text{m}$ ,光谱宽度约 0.6 nm;当光纤长度为 6.3 m 时,输出激光波长为 1.566  $\mu\text{m}$ ,光谱宽度约 0.6 nm.可见,输出激光中心波长为随光纤长度的增加而向长波长移动,这是由于  $\text{Er}^{3+}$  的重吸收所致.

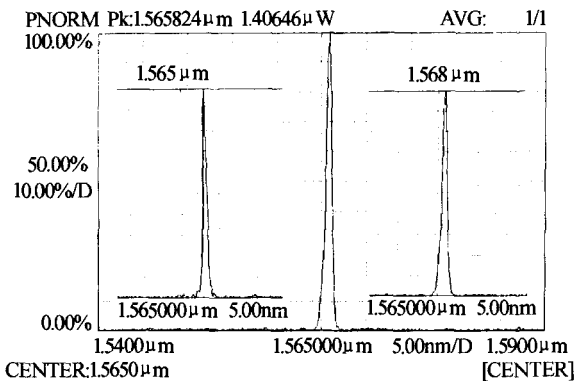


图9 光纤长度分别为 9.5、3.2 和 6.3 m 时  $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤激光器在最大输出时的激光光谱  
Fig. 9 Output laser spectra of EY802 Er-Yb co-doped DCFL at maximum output power for the fiber length of 9.5 m, 3.2 m and 6.3 m, respectively

## 6 对比分析

对比实验与理论分析结果可以看出,实验所获得的输出功率比理论分析的结果要低.例如,在光纤长度 6.30 m 时,实验输出功率(2.2 W)比理论分析结果(3.286 W)低 33%.产生这些差异的原因如下:

1) 进行理论分析时所用的部分数据并非由 EY802 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;同时,为便于数值分析,对  $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤激光器的理论模型进行了简化,这使得计算结果比真实结果要高.

2) 实验中所用的泵浦源(美国 Qphotonics 公司生产的 PUMA-20 CW MM 半导体激光器)的输出波长并非稳定在 EY802 光纤的峰值吸收波长处,而是随着泵浦电流的增大从 961 nm(阈值时)移动到 979 nm(最大值时),而光纤的吸收系数也随波长在逐渐变化,特别是当波长超过峰值吸收波长时,吸收系数迅速下降,从而导致吸收的泵浦功率并不随入纤泵浦功率线性增加.

## 7 结论

$\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$  共掺与包层泵浦技术相结合,是获

得波长 1.55  $\mu\text{m}$  高功率激光的有效途径.实验中所获得的波长为 1.566  $\mu\text{m}$ 、功率为 2.2 W 的单模激光输出,是目前国内用  $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层单模光纤获得的最高输出功率.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, Sahu J K, Jeong Y, *et al.* High power fiber lasers: new developments. *SPIE*, 2003, **4974**: 50~59
- 2 阮双琛, 苏红新, 冯鸣, 等. 8.6W 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的研究. *光子学报*, 2003, **32**(5): 523~524  
Ruan S C, Su H X, Feng M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 523~524
- 3 Dominic V, MacCormack S, Waarts R, *et al.* 110 W fibre laser. *Electron Lett*, 1999, **34**(14): 1158~1160
- 4 Platonov N S, Gapontsev D C, Gapontsev V P, *et al.* 135 W cw fiber laser with perfect single mode output. *OSA Trends in Optics and Photonics-Conf. on Lasers and Electro-optics*, OSA Tech. Dig., Washington, DC, 2002, **73**: CPDC3
- 5 Limpert J, Liem A, Höfer S, *et al.* 150W Nd/Yb codoped fiber laser at 1.1  $\mu\text{m}$ . *OSA Trends in Optics and Photonics -Conf. on Lasers and Electro-optics*. OSA Tech. Dig., Washington, DC, 2002, **73**: 590~591
- 6 Alam S U, Turner P W, Grudinin A B, *et al.* High-power cladding pumped Erbium-Ytterbium co-doped fiber laser. *Southampton Photonics*, 2002. 1~5
- 7 Nilsson J, Alam S U, Alvarez-Chavez J A, *et al.* High-power and tunable operation of erbium-ytterbium Co-doped cladding-pumped fiber lasers. *J Quantum Electron*, 2003, **39**(8): 987~994
- 8 王屹山, 郑瑶雷, 沈华, 等. 包层泵浦的铒镱共掺光纤激光高效产生的实验研究. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1025~1027  
Wang Y S, Zheng Y L, Shen H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1025~1027
- 9 Pasquale F D. Modeling of highly-efficient grating-feedback and fabry-perot  $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  co-doped fiber lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, **32**(2): 326~332
- 10 Dong S F, Zhao S H, Zhan S B, *et al.* Operation principles and numerical analysis of double-cladding erbium-ytterbium co-doped optical fiber amplifiers. *SPIE*, 2002, **4914**: 28~36
- 11 Federighi M, Pasquale F D. The effect of pair-induced energy transfer on the performance of silica waveguide amplifiers with high  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  concentrations. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, **7**(3): 303~305
- 12 Pasquale F D, Federighi M. Improved gain characteristics in high-concentration  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$

- codoped glass waveguide amplifiers. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, **30**(9): 2127~2131
- 13 Karásek M. Optimum design of  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  codoped fibers for large-signal high-pump-power applications. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, **33**(10): 1699~1705
- 14 Pask H M, Carman R J, Hanna D C, *et al.* Ytterbium-doped silica fiber lasers; versatile sources for the 1.2  $\mu\text{m}$  region. *IEEE J Sel Top in Quantum Electron*, 1995, **1**(1): 2~13
- 15 Bedo S, Luthy W, Weber H P. The effective absorption coefficient in double-clad fibres. *Opt Commun*, 1993, **99**(5,6): 331~335
- 16 Kelson I, Hardy A. Optimization of strongly pumped fiber lasers. *J Lightwave Technol*, 1999, **17**(5): 891~897

## High Power Single Mode $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ Co-doped Double Cladding Fiber Lasers

Dong Shufu<sup>1,2</sup>, Wang Yishan<sup>2</sup>, Shen Hua<sup>2</sup>, Chen Guofu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Transient Optics & Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2004-09-01

**Abstract** Numerical analysis and experimental results of erbium-ytterbium co-doped double-cladding fiber lasers (EY-DCFLs) with single mode output were presented. Numerical analysis of this EY-DCFL, based on the rate and propagation equations, was performed firstly in order to optimize its properties theoretically. Then experimental research was done of this EY-DCFL by using the same conditions such as pump power, fiber length, and dichroic mirror. The output powers as functions of the input pump power and fiber length were described, as well as the output wavelength vs the fiber length. The maximum output power was about 2.2 W lasing at 1566 nm by using a 6.30 m fiber, with an overall optical to optical conversion efficiency of 22%, which were 33% lower than the calculated values for the same fiber length.

**Keywords** Optical fiber lasers; Double-cladding fiber; Erbium-Ytterbium co-doped; Cladding pump; Numerical simulation



**Dong Shufu** was born in 1971, in Qingdao, China. He received the B. S. degree in optical fiber communication and M. S. degree in communication & electronics from Air-force Telecommunication Engineering Institute, China, in 1994 and 1997, respectively. He graduated in July 2004 and received the Ph. D. degree in March 2005 from State Key Laboratory of Transient Optics & Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. He is now an associate professor in Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University. His interests include optical communication system and devices, especially the optical fiber lasers & amplifiers.