

文章编号 1004-924X(2006)03-0341-05

Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤的高功率 L-band 光纤激光器的实验研究

贾秀杰¹, 郭占城¹, 付圣贵¹, 范万德¹, 刘艳格¹, 袁树忠¹, 宁 鼎², 董孝义¹

(1. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071; 2. 中国电子科技集团总公司第 46 研究所, 天津 300220)

摘要:采用端面泵浦的方式,用尾纤输出波长为 976 nm 的高亮度多模半导体激光器,包层泵浦的铒镱共掺双包层大模面积光纤,非球面镜组耦合系统,进行了共掺双包层光纤的高功率 L-band 光纤激光器的研究,泵浦耦合效率达到了 62% 以上,并在 F-P 激光振荡腔中实现了高效的连续激光输出。在光纤长度为 30 m、入纤功率为 13.41 W 时,首次报道输出连续功率达到了 4.3 W。激光器的斜率效率为 44%,激光输出中心波长 1 603 nm。

关键词:Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤;双包层光纤;包层泵浦;光纤激光器;F-P 谐振腔

中图分类号:TN248.8 文献标识码:A

Experimental investigation on co-doped double-clad high-power fiber laser in L-band

JIA Xiu-jie¹, GUO Zhan-cheng¹, FU Sheng-gui¹, FAN Wan-de¹,
LIU Yan-ge¹, YUAN Shu-zhong¹, NING Ding², DONG Xiao-yi¹

(1. *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*; 2. *The 46th Electronic Research Institute of the Ministry of Information Industry, Tianjin 300220, China*)

Abstract: A end-pumped co-doped double-clad high-power fiber laser in L-band was studied using a 976 nm pigtailed multimode tunable high brightness diode laser, clad-pumped erbium-ytterbium co-doped double-clad large-mode-area (LMA) fiber and the aspheric lenses coupler. The pumping coupling efficiency is more than 62% and the high efficiency continuous wave laser is gained in the Fabry Perot cavity. The experimental results show that a Er/Yb co-doped double clad native large-mode-area fiber laser can get output power of 4.3 W and the slope efficiency of 42% at signal central wavelenth of 1603 nm, when the double-clad fiber length is 30 m, the pumping power of entering fiber is 13.41 W.

Key words: Erbium-ytterbium co-doped optical fiber; double-clad fiber; cladding pump; fiber laser; Fabry Perot cavity

收稿日期:2005-11-22;修订日期:2006-04-18.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 60137010);国家科技部“863”计划项目(No. 2003AA312100)。

1 引言

掺铒(Er^{3+})光纤激光器(EDFL)具有泵浦阈值低、输出功率高、出射光波长落在 1 550 nm 光纤通信窗口等优点,因此,EDFL 受到人们广泛的青睐^[1]。但由于 Er^{3+} 离子为三能级系统,并且光纤中掺杂浓度过高容易产生浓度淬灭现象,从而导致掺 Er^{3+} 光纤激光器的效率低下,即使利用包层泵浦技术也难于实现高功率输出。近期研究表明^[2],在掺铒光纤的纤芯中掺入稀土离子的同时共掺入一些敏化剂 Yb^{3+} 离子,通过交叉弛豫,使高能级上的 Yb^{3+} 粒子转移到 Er^{3+} 能量相近的能级上去, Er^{3+} 相关能级上的粒子数急剧增加;而且 Yb^{3+} 的掺入能抑制 Er^{3+} 离子簇的形成,减少浓度淬灭,使能量转换更加有效^[3];同时使用包层泵浦技术即可实现高的泵浦耦合效率和转换效率^[4],大大提高输出功率。因此,随着 WDM 技术的迅速发展,这种高输出功率的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器将满足人们对瓦量级通信波长激光光源的需求,成为光通信中的常用器件。1993 年国外就开始了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 单模双包层光纤激光器方面的研究工作^[5],但当时输出激光功率只有 19 mW。2000 年后单模双包层光纤激光器的理论模型逐渐完善起来^[6],此后实验研究也有了进一步的进展^[7-9],但是最大的输出也只有瓦量级。与此同时短脉冲铒镱共掺双包层光纤激光器的研究也进入新的阶段,平均输出能量达到 60 μJ ,峰值功率达到 10 kW^[10]。国内关于双包层光纤器件的研究比国外晚一些,南开大学首先开始了双包层光纤器件的研发^[11-12]。但是 Er/Yb 共掺双包层光纤的研制以及器件的开发还处在初始阶段。2003 年初空军工程大学占生宝研发小组进行了单模双包层 Er/Yb 光纤激光器的实验^[13]以及放大器的理论研究工作^[14]。文献^[13]表明,当时激光输出只有 245 mW,2003 年有所提高,达到 394 mW^[15]。南开大学李乙刚等人也进行了 Er/Yb 单模双包层光纤激光器的实验研究工作,输出功率也只有 1 W 左右^[16-17]。随着对激光功率指标要求的提高,具有高稀土元素掺杂浓度,同时其芯径相对较大而数值孔径相对较小的所谓“大模场面积”(LMA)光纤被开发出来。

本文利用合作拉制的大模场面积 Er/Yb 共

掺双包层光纤为增益介质,并使用一种自行设计的高效光学耦合系统,在抽运功率为 13.41 W 的情况下,研制出输出功率高达 4.3 W 的铒镱共掺大模面积双包层光纤激光器,实现了全国产化的、高功率与较高转换效率的稳定激光输出,输出激光中心波长在 L-band 的 1 603 nm,斜率效率达到 44%。文献查新表明,如此大功率的 L-band 铒镱共掺大模面积双包层光纤激光器为国内首次报道。

2 实验装置及相关参数

采用端面泵浦方式。泵浦源利用 Limo 公司产 976 nm,90 W 半导体激光器,泵浦激光经尾纤输出,尾纤尺寸为 $\varphi 400 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22,利用自行设计的高效光学耦合系统将泵浦光耦合入双包层光纤的内包层内。前腔镜镀有 1 550 nm 波长附近的高反膜,反射带宽为 65 nm,反射率约为 90%;同时镀有 976 nm,透射率为 80% 增透膜。光纤端面的 Fresnel 反射作为后腔镜,反射率是 4%。增益介质为 46 所拉制的 Er/Yb 共掺大模场面积双包层光纤,光纤的内包层为 D 型,尺寸为 $400/350 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.33;纤芯直径为 $8.4 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.14;外包层直径为 $560 \mu\text{m}$,涂层直径为 $668 \mu\text{m}$ 。铒镱掺杂离子浓度约为 500×10^{-6} ,实验使用的光纤长度为 30 m。在光纤的输出端利用 LP-3C 型光功率计测量激光器输出功率。用 ADVANST Q8383 型光谱分析仪测量激光光谱,光谱仪波长最小分辨率为 0.1 nm。

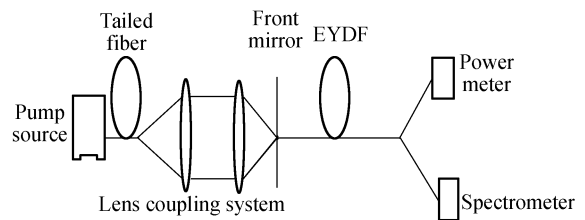


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果与分析

利用约 25 cm 的一小段 EYDF,在激光器结

构不变的情况下测试泵浦光的入纤功率,实验图如图 1。泵源功率及入纤功率是在 8~10℃ 温度下测量的。该泵源的波长不随温度而变化,保持恒定在 976 nm。图 2 是入纤功率随泵浦电流变化的关系图,可以看出,在较宽范围内,曲线呈很好的线性。但是由于前腔镜镀膜为软膜,所以没有过大的增加泵浦电流,只加到了 13 A,对应的泵源功率是 24.8 W,以防损伤前腔镜。图 3 是 Er/Yb 共掺大模场面积双层包层光纤的荧光谱,荧光谱范围为 1.560~1.608 μm,跨度约 48 nm,为典型的 Er³⁺ 的 C+L-band 的自发辐射谱形状。增大泵浦功率,发现自发辐射谱没有展宽,而是峰值向长波方向偏移,这与理论分析^[18]是吻合的。

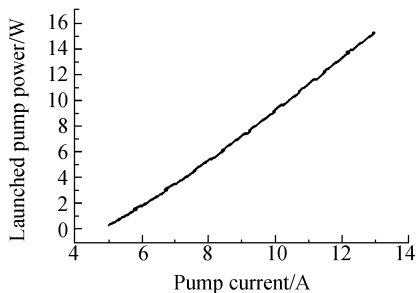


图 2 入纤功率与泵浦电流的关系

Fig. 2 Relation of launched pump power and pump current

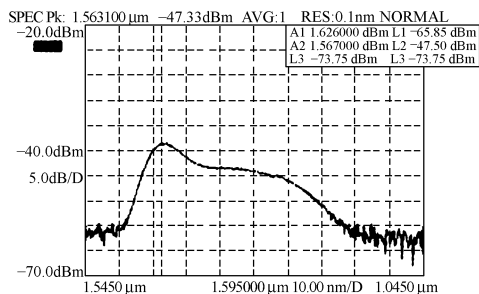


图 3 EYDF 在低泵浦功率时的荧光谱

Fig. 3 Fluorescence spectrum of EDFA under low pump power

实验采用端面泵浦的方式,将光纤两端面抛光成直角。仔细调整支架,使前腔镜与光纤端面垂直。仔细观察发现,当泵浦电流增加至 6.3 A 时,开始出现激光辐射,由此可知本激光器的激光振荡阈值电流在 6.3 A 左右。继续增加泵浦电流,当达到 13 A 时,激光光谱见图 4,其中心波长为 1.603 μm,为 L 波段输出,激光谱宽约为 2 nm

左右。由此可见,输出激光在前腔镜的高反带宽之内。分析激光光谱的谱宽较宽的原因,认为是由于使用二向色镜和光纤端面构成谐振腔,缺少滤波装置。由于高浓度镱离子的掺杂,泵浦对铒离子进行抽运,其产生的自发辐射在腔内接受到相同能级上镱离子转移的能量,再次对铒离子进行抽运,从而在 L-band 产生增益。在实验中还可观察到,随着泵浦电流的增加,激光的中心波长并没有改变,具有很好的稳定性。谐振开始后,随泵浦功率的增加,激光器的输出功率呈线性增加。当泵浦电流超过 9 A 后,输出功率增加幅度减小。继续增加泵浦电流至 12 A,此时激光输出功率增加有所缓慢,如图 5 所示,点为输出功率随入纤泵浦功率变化的特性曲线,直线表示线性拟合。这种现象是由于使用的腔镜镀膜为软膜,热损伤阈值比较低,在泵浦功率较高的时候,达到了它的损伤阈值,从而使输出功率增大幅度降低。当电流超过 13 A 后,输出激光功率快速下降,检查腔镜镀膜已经被严重损伤。在此实验条件下,测得激光器的斜率效率为 44%,在入纤功率为 13.41 W 时得到了 4.3 W 的激光输出。

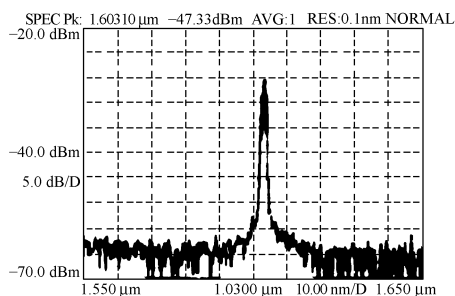


图 4 EYDF 激光器的输出激光光谱

Fig. 4 Output spectrum of EYDF laser

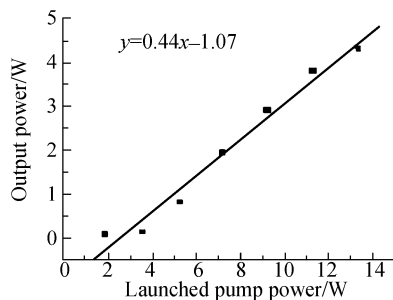


图 5 输出功率随入纤泵浦功率变化的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of the output power changed with launched pump power

4 结 论

利用 Er/Yb 共掺双包层光纤研制大功率光纤激光器是国内外相关研究领域的热点。我们使用自行设计的光学耦合系统,与中国电子科技集团公司第 46 研究所合作设计、拉制了 Er/Yb 共掺大模面积双包层光纤等,研发出一种国产化的双包层光纤激光器,输出功率达到 4.3 W,根据所查文献可知,这样高的瓦量级 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器还是首次报道。

该光纤为该单位研制的第一代 Er/Yb 共掺

双包层光纤,具有一定的探索性质。实验证明了该光纤在较低的泵浦功率下能够输出 L 波段激光,对于光纤通信具有很重要的价值,但是其转换效率还有待于进一步提高,在拉制光纤时还应该进一步改进离子掺杂比,包层结构与参数等。本项实验由于腔镜的原因不能进行高泵浦水平的实验,无法研究高泵浦功率下激光器的输出功率、激光波长的变化。同时,由于滤波元件难以加入到激光器中,窄化输出激光目前还难以实现。下一步计划定制特定的二向色镜作为激光器的前腔镜进行高功率泵浦实验;同时研究在 LMA 光纤上如何写制光栅,实现输出激光的滤波。

参考文献:

- [1] 乔学光,郭小东.基于光纤环形镜的 C + L 波段高平坦高功率掺铒光源[J].光学精密工程,2005,13(2):205-210. QIAO X G, GUO X D. High power, high flattening C + L band erbium-doped fiber source based on fiber loop mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2):205-210. (in Chinese)
- [2] TOWNSEND J B, BARNES W L. Yb³⁺ sensitized Er³⁺ doped silica optical fiber with ultrahigh transfer efficiency and gain[J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27(21):1958-1959.
- [3] AISO K, TASHIRO Y, SUZUKI T, et al. Development of Er/Yb co-doped fiber for high-power optical amplifiers[J]. *Furukawa Review*, 2001, 20:41-45.
- [4] SNITZER E, PO H. Double-clad offset core Nd fiber laser[C]. *Optical fiber communication Conf.* 1988: PD5.
- [5] MINELLY J D, BARNES W L, LAMING R I, et al. Diode-array pumping of Er/Yb co-doped fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(3):301.
- [6] YAHEL E, HARDY A. Amplified spontaneous emission in high-power, Er-Yb co-doped fiber amplifiers for wavelength-division-multiplexing applications[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, 20(6):1198-1203.
- [7] CHEO P K, KING G G. Clad-pumped Yb:Er co-doped fiber lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, 13(3):188-190.
- [8] SALHI M. High power tunable all fiber double-clad Er;Yb:silicate fiber laser[J]. *Opt. Commun.*, 2005, 247:181-185.
- [9] LU Z G, SUN F G. High-power multi-wavelength Er-Yb co-doped double-cladding fiber ring laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(9):1821-1823.
- [10] LAROCHE M, CHARDON A M. Compact diode-pumped passively Q-switched tunable Er-Yb double-clad fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(22):1980-1983.
- [11] 宁鼎,傅成鹏,丁镭,等.掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的实验研究[J].光子学报,2001,30(4):442-445. NING D, FU CH P, DING L, et al. Experimental research of Yb³⁺-doped double-clad fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica.*, 2001, 30(4):442-445. (in Chinese)
- [12] 项阳,宁鼎.选用国产元件的 CW 1.8 W 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器[J].光电子·激光,2003,14(10):1018-1020. XIANG Y, NING D. CW 1.8W Yb³⁺ doped double-clad fiber laser with homemade elements[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(10):1018-1020. (in Chinese)
- [13] 占生宝,赵尚弘.双包层 Er/Yb 共掺光纤激光器的实验研究[J].激光技术,2003,27(6):606-608. ZHAN SH B, ZHAO SH H. The experimental study of the Er³⁺ / Yb³⁺ co-doped double clad fiber laser[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6):606-608. (in Chinese)
- [14] DONG S F, YANG L ZH. Highly efficient Er-Yb co-doped double-cladding fiber amplifier switch fiber bragg gratings and shorter fibers[J]. *Acta Photonica Sinica.*, 2004(33):257-260.

- [15] 王屹山,郑瑶雷. 包层泵浦的铒镱共掺光纤激光高效产生的实验研究[J]. 光子学报,2003,32(9):1025-1027.
WANG Y SH,ZHENG Y L. High-efficiency generation of cladding pumped erbium-ytterbium co-doped double clad fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2003, 32(9):1025-1027. (in Chinese)
- [16] CHEN SH P,LI Y G. Watt-level L band superfluorescent fiber source[J]. *Opt. Exp.*, 2005, 13(5) :1531-1536.
- [17] CHEN SH P,LI Y G,LU K CH. Branch arm filtered coherent combining of tunable fiber lasers[J]. *Opt. Exp.*, 2005, 13(20) : 7878-7883.

作者简介:贾秀杰(1971—),女,2003年获得北京师范大学理学硕士学位;现为南开大学光学专业博士,师从董孝义教授,主要从事光纤光子器件的研究。