

Er/Yb 共掺光纤直写短腔激光器实验研究

宋志强¹ 王伟涛¹ 祁海峰¹ 彭纲定^{1,2} 王 昌^{1*}

¹山东省科学院激光研究所山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250014

²新南威尔士大学电子工程与通信学院, 悉尼 2052, 澳大利亚

摘要 分别对 Nufern 公司和 CorActive 公司的光敏性 Er/Yb 共掺单模光纤采用直接紫外曝光方式制备了分布反馈和分布布拉格反射结构的短腔光纤激光器。实验结果表明:Er/Yb 共掺光纤存在与温度有关的猝灭效应。在激光斜率效率测试过程中,当抽运功率达到一定值时,出现了激光输出功率陡然降低的现象。对激光器谐振腔进行辅助散热时,激光转化效率有所升高。通过对同一台激光器进行先后测量发现,再次测量得到的激光器效率总是低于制作完成即时测量的数值;在高抽运条件下,输出功率衰退和受温度影响的状况总是存在。

关键词 激光器;Er/Yb 共掺光纤;温度猝灭;浓度猝灭

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0801008

Experimental Research of Direct Writing Short Cavity Lasers in Er/Yb Co-Doped Fibers

Song Zhiqiang¹ Wang Weitao¹ Qi Haifeng¹ Peng Gangding^{1,2} Wang Chang¹

¹Shandong Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China

²School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia

Abstract The short cavity fiber lasers with distributed feedback and distributed Bragg reflection structures are fabricated by using direct ultraviolet exposure on the photosensitive Er/Yb co-doped single mode fibers respectively produced in Nufern and CorActive companies. The experimental results show that the quenching effect related to temperature exists in the Er/Yb co-doped fibers. In the process of laser slope efficiency test, the laser output power suddenly falls down when the pump power reaches certain value. But when an auxiliary heat dissipation is given to the laser resonant cavity, the laser conversion efficiency increases by certain value. The successive power measurement results of the same laser show that the laser efficiency measured later is always lower than that measured just after its fabrication. Moreover, the output power decline at high pump power and the temperature-sensitive situation always exist.

Key words lasers; Er/Yb co-doped fiber; temperature quenching; concentration quenching

OCIS codes 140.3490; 140.3510; 140.4480

1 引言

近年来,随着分布式光纤传感技术的迅速发展,作为系统光源的窄线宽光纤激光器被广泛研究。基于短直腔结构的分布布拉格反射(DBR)和分布反馈(DFB)光纤激光器具有结构简单、易于获得稳定单纵模运转的优点,是目前使用最多的两种单频激光器。然而,受限于光纤中稀土离子的掺杂浓度不够高、尤其是 C 波段的高掺铒(Er)光纤有严重的浓度猝灭问题^[1-2],短直腔光纤激光器往往输出功率很低,其实用性受限。对

收稿日期: 2016-01-18; 收到修改稿日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(61307101)、山东省自然科学基金(ZR2013FL029)、山东省重点研发计划(2015GGX101001)

作者简介: 宋志强(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤光栅和光纤激光器方面的研究。

E-mail: szq821214@163.com

* 通信联系人。E-mail: wang960100@163.com

此,国内外学者提出了各种方案以获得更高的窄线宽激光输出功率,如主振荡功率放大(MOPA)结构^[3-5]、采用 Er/Yb 共掺光纤^[5-7]和采用磷酸盐玻璃高掺杂光纤^[8-9]等。然而,MOPA 结构会导致激光线宽展宽和光谱信噪比变差;磷酸盐玻璃高掺杂光纤具有较高的增益系数,但其温度特性与普通单模光纤不同,两种光纤的低损耗熔接存在一定的技术困难。Er/Yb 共掺光纤可消除浓度猝灭效应^[10-11],几厘米的光纤可产生 10 dB~20 dB 的增益,满足了短腔光纤激光器几十毫瓦输出功率的要求。尽管目前已有文献报道了稳定运转的单频 Er/Yb 共掺光纤激光器^[12-15],但其在光敏性及成栅工艺上存在很多问题,因此短腔光纤激光器的制备仍然比较困难。

为了获得体积小巧的毫瓦级窄线宽光纤激光器,实验研究了短直腔 Er/Yb 共掺光纤激光器的输出特性。研究发现,与成熟的掺 Er 光纤 DFB 激光器相比,Er/Yb 共掺短腔光纤激光器具有更高的斜率效率和输出功率,但功率稳定性很差,存在激光器输出功率随抽运功率的上升而下降的现象。对激光器谐振腔辅助散热,可使激光斜率效率和输出功率保持较高的水平,但输出功率随时间下降的趋势以及受温度影响的状况不能消除。

2 实验及讨论

采用加拿大 CorActive 公司的 EY305 和美国 Nufern 公司的 CD846 两种 Er/Yb 共掺光纤作为样品进行实验研究。EY305 光纤是一种单包层的商用光纤,具有大于 500 dB/m 的 980 nm 波长抽运吸收系数,CD846 光纤是 Nufern 公司提供的样品光纤,经对比测试,其具有与 EY305 光纤相当的抽运吸收系数。两种光纤都具有紫外光敏性,可不过载氢处理而实现光栅刻写。

参照已经成熟的掺 Er 光纤 DFB 激光器制作工艺^[3,16],利用相位掩模板法分别在 EY305 和 CD846 光纤上制作了长度 L 为 30 mm、 π 相移位置为 $0.4L$ 的光纤相移光栅,两种光纤在同样曝光量下引入的折射率调制量分别为 1.39×10^{-4} 和 1.21×10^{-4} ,光栅强度分别达到 8.5 和 7.4,中心波长分别为 1547.3 nm 和 1547 nm,它们所构成的 DFB 光纤激光器分别记为 EY305 DFB-FL 和 CD846 DFB-FL,其结构如图 1 所示,其中 ISO 为隔离器,WDM 为波分复用器, P_{out} 为输出功率,Er/Yb- π -FBG 为铒镱共掺 π 相移光纤光栅。采用波长为 980 nm 的半导体激光器作为 DFB 光纤激光器的抽运源,最大抽运功率为 150 mW。两种 DFB-FL 激光器的功率输出特性分别如图 2、3 所示。

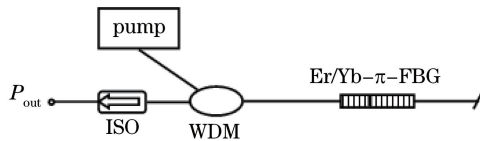


图 1 DFB-FL 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DFB-FL

图 2、3 中分别给出了有源光纤光栅刻写完成后的即时输出功率 P_{out1} 、放置一天后的功率测量值 P_{out2} 随抽运功率变化的曲线以及在抽运功率为 150 mW 时激光器在 15 min 内的输出功率稳定性情况。测量时

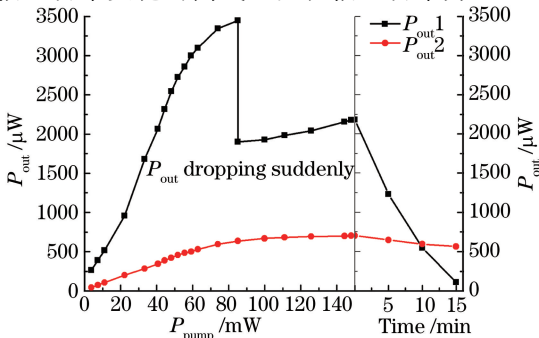


图 2 EY305 DFB-FL 功率输出特性曲线

Fig. 2 Output power curves of EY305 DFB-FL

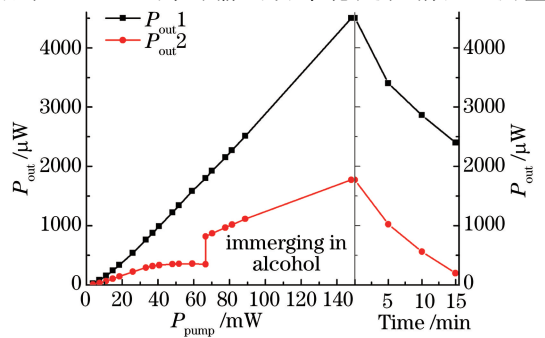


图 3 CD846 DFB-FL 功率输出特性曲线

Fig. 3 Output power curves of CD846 DFB-FL

激光器栅区自由平放在光学平台上,当抽运功率升至 80 mW 时,EY305 DFB-FL 激光器的 P_{out1} 已出现饱和趋势,并出现功率衰落且不能恢复的现象,继续提高抽运功率,尽管 P_{out1} 变大,但其斜率效率变小;将抽运功率固定在 150 mW 时,可以观测到激光器输出功率由 2.6 mW 很快衰减到几十微瓦。对于隔日的功率测量值 P_{out2} ,其激光斜率效率远小于 P_{out1} 的,并且抽运吸收在 100 mW 处基本饱和,远低于由 Nufern PS-ESF-3/125 光纤制作的掺 Er 光纤 DFB 激光器的饱和抽运功率;在 150 mW 抽运功率下,采用酒精溶液浸泡辅助有源栅区降温,激光功率衰减变慢。CD846 DFB-FL 激光器具有相似的曲线,在测量 P_{out1} 时采用了酒精溶液辅助散热,激光器未出现功率陡然降低的现象,但随着酒精溶液的挥发消失,150 mW 抽运功率下的激光功率衰减比较明显;在测量 P_{out2} 时,抽运饱和情况很快出现,但通过酒精溶液降温,输出功率和斜率效率均变大,但同 EY305 DFB-FL 激光器一样, P_{out2} 的斜率效率要远低于 P_{out1} 的。

对于上述实验情况,考虑到 DFB 光纤激光器对有源相移光纤光栅的要求较高,而 EY305 和 CD846 都需要很长的曝光时间来获得足够的光栅强度,在此过程中会有很多不稳定因素导致 π 相移光栅的相移量误差过大,同时光栅强度会随时间而衰退,因此采用结构更简单的 DBR 激光器重复以上实验。所用 Er/Yb 光纤长度仍为 30 mm,在光纤两端先后曝光制作长度为 12 mm 和 16 mm 两个光栅,光栅折射率调制量均在 1.4×10^{-4} 左右,反射率均大于 99%。两个光栅间隔 2 mm 构成 DBR-FL,其结构示意图如图 4 所示,其中 Er/Yb-FBGs 为铒镱共掺光纤光栅对。

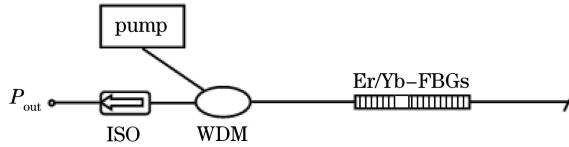


图 4 DBR-FL 结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of DBR-FL

两种 DBR-FL 的功率输出特性分别如图 5、6 所示,图中同样给出了有源光纤光栅刻写完成后的即时输出功率 P_{out1} 、放置一天后的功率测量值 P_{out2} 随抽运功率变化的曲线以及在抽运功率为 150 mW 时激光器在 15 min 内的输出功率稳定性情况。对 EY305 DBR-FL 先后两次进行测量时,均将光栅区浸入酒精溶液散热,而对 CD846 DBR-FL 均是在输出功率接近饱和时再用酒精溶液散热,以此恢复其斜率效率。与 DFB-FL 的实验结果相似,在自由散热的条件下,抽运吸收功率容易饱和,而将光栅区浸泡在酒精中辅助散热,激光输出功率随抽运功率增大仍可线性上升,保持较高的斜率效率;在 150 mW 抽运功率下,输出功率持续降低,对其辅助散热可使输出功率衰减变慢。更为明显的是,隔日测量得到的激光斜率效率均低于激光器制作完成后即时测量的结果。

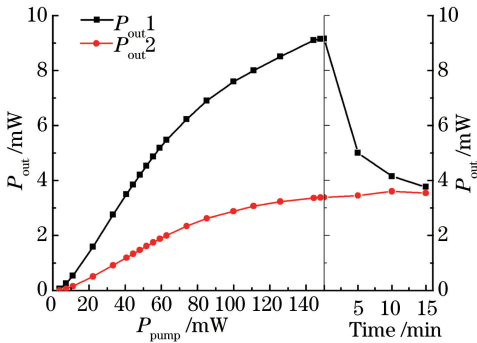


图 5 EY305 DBR-FL 功率输出特性曲线

Fig. 5 Output power curves of EY305 DBR-FL

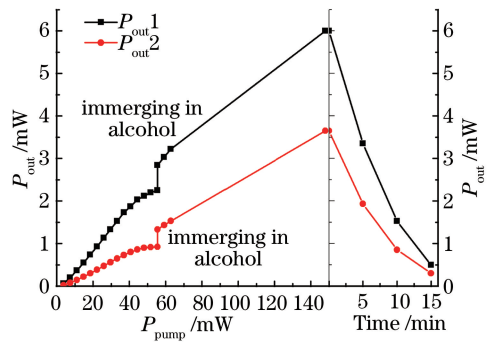


图 6 CD846 DBR-FL 功率输出特性曲线

Fig. 6 Output power curves of CD846 DBR-FL

对于以上实验现象,分析认为:尽管 Er/Yb 共掺提高了 Er 离子的猝灭浓度,基本消除了浓度猝灭效应,但光纤材料中仍存在与温度有关的猝灭问题。随着抽运功率的增大,激光器的发热量也会变大,并且由于 Er/Yb 共掺光纤吸收系数很高,单端抽运方式使得有源光栅上沿长度分布的抽运吸收功率不一致,这会导致发热引起的温度升高也不一致,进而使得光栅波长发生漂移而失配,最后导致激光功率下降甚至不出光。

这从有源区荧光亮度分布也能看出,在抽运功率刚注入时可看到明显的亮度梯度,随着激光功率不断降低,光纤上的荧光亮度逐渐趋于均匀。对于先后测量的激光器斜率效率明显降低的现象,一方面可能是紫外曝光引起的应力变化导致了光栅强度随时间发生变化,另一方面 Er/Yb 共掺光纤中可能还存在一定程度的镱离子光子暗化效应^[17],这使得有效增益发生永久性降低。

最后,对在酒精溶液辅助降温下功率稳定性稍好的 EY305 DFB-FL 和 EY305 DBR-FL 的线宽进行了测试,结果如图 7 所示。利用零差法测量激光器的线宽并进行洛伦兹拟合,得到两种激光器的线宽分别为 6.3 kHz 和 6.5 kHz,这比掺铒 DFB-FL 的线宽要宽 1 倍^[3],但仍然具有窄线宽的特性。同时,图 8 给出了两种激光器利用紫外曝光方式直写制作的光栅谱和激光光谱,可见两种激光器都是严格的单纵模运转。

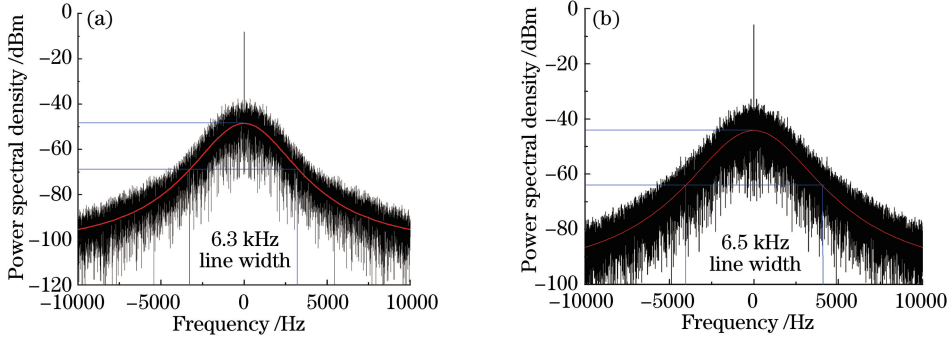


图 7 光纤激光器的线宽。(a) EY305 DFB-FL; (b) EY305 DBR-FL

Fig. 7 Line widths of fiber lasers. (a) EY305 DFB-FL; (b) EY305 DBR-FL

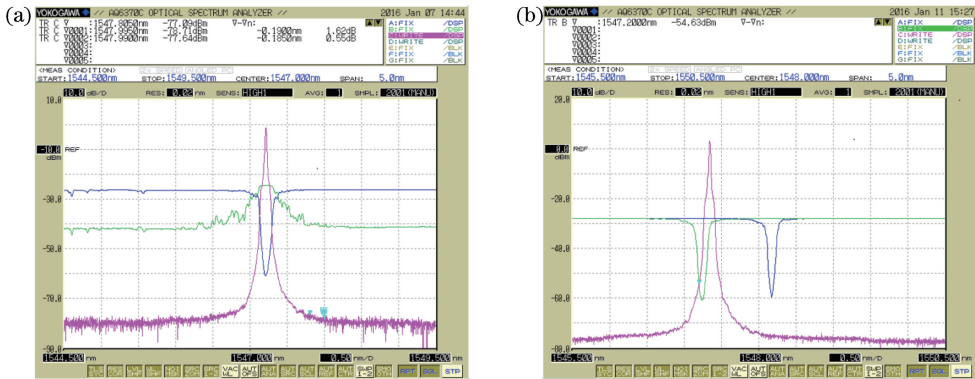


图 8 光纤激光器的光谱图。(a) EY305 DFB-FL; (b) DBR-FL

Fig. 8 Spectra of fiber lasers. (a) EY305 DFB-FL; (b) DBR-FL

3 结 论

光纤材料的发展推动了光纤激光器技术的进步,Er/Yb 共掺光纤的出现为短腔激光器实现较高输出功率提供了可能性。采用两种光敏性 Er/Yb 共掺光纤,分别制备了 DFB 和 DBR 结构的短腔激光器,通过对斜率效率和功率稳定性的测量发现,尽管 Er/Yb 共掺光纤避免了浓度猝灭问题,但 Er/Yb 共掺光纤激光器仍存在与温度相关的功率猝灭问题,这需要通过进一步的研究来分析解决。

参 考 文 献

- Shunsuke Ono, Setsuhisa Tanabe. Evaluation of quenching effect on gain characteristics in silica-based erbium doped fiber using numerical simulation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 408(3): 732-736.
- Yu Chunlei, Dai Shixun, Zhou Gang, et al. Concentration quenching mechanism in erbium-doped tellurite glass[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(8): 3894-3899.
于春雷, 戴世勋, 周 刚, 等. 掺铒碲酸盐玻璃中的浓度猝灭机理研究[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3894-3899.
- Xue Lifang, Zhang Qiang, Li Fang, et al. High-frequency modulation, high power and narrow-linewidth distributed feedback fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 139-157.

- 薛力芳, 张 强, 李 芳, 等. 高频调制大功率窄线宽分布反馈光纤激光器[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 139-157.
- 4 Bonfrate G, Vaninetti F, Negrisolo F. Single-frequency MOPA Er/sup³⁺/DBR fiber laser for WDM digital telecommunication systems[J]. IEEE Photonic Technology Letters, 1998, 10(8): 1109-1111.
- 5 Jeong Y, Sahu J K, Soh D B, *et al.* High-power tunable single-frequency single-mode erbium: Ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source[J]. Optics Letters, 2005, 30(30): 2997-2999.
- 6 Dong L, Loh W H, Caplen J E, *et al.* Efficient single-frequency fiber lasers with novel photosensitive Er/Yb optical fibers [J]. Optics Letters, 1997, 22(10): 694-696.
- 7 Samson B N, Dong L, Cowle G J, *et al.* High performance single frequency fiber grating-based erbium: Ytterbium-codoped fiber lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 16(1): 114-118.
- 8 Xu S H, Yang Z M, Liu T, *et al.* An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μm [J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1249-1254.
- 9 Yang C S, Xu S H, Li C, *et al.* Ultra compact kilohertz-linewidth high-power single-frequency laser based on Er³⁺/Yb³⁺-codoped phosphate fiber amplifier[J]. Applied Physics Express, 2013, 6(2): 263-270.
- 10 Peng Yang, Li Shanfeng, Zhang Qingyu, *et al.* Photoluminescence and its physical mechanism of Er/Yb co-doped borate-silicate glass[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(12): 7286-7294.
- 彭 扬, 李善峰, 张庆瑜, 等. Er³⁺/Yb³⁺共掺体系的光致荧光行为及相关物理过程研究[J]. 物理学报, 2007, 56(12): 7286-7294.
- 11 Xiong L Y, Hofmann P, Schülzgen A, *et al.* Deep UV-induced near-infrared photodarkening of Er/Yb-doped and undoped phosphate fibers[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4193-4196.
- 12 Zhao M, Guo Y, Wang T, *et al.* Short cavity single-frequency all-fiber Er/Yb co-doped laser[J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2009, 2(1): 81-85.
- 13 Xu Yuanzhong, Tan Huayao, Du Weichong, *et al.* Short cavity Er/Yb fiber grating laser[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(10): 1327-1231.
- 许远忠, 谭华耀, 杜卫冲, 等. 短腔 Er/Yb 光纤光栅激光器[J]. 光学学报, 1999, 19(10): 1327-1231.
- 14 Wang Hongjie, Weng Yujia, Hu Ye, *et al.* Compact narrow-width distributed feedback fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(6): 891-893.
- 王宏杰, 翁宇佳, 胡 野, 等. 紧凑型窄线宽分布反馈光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(6): 891-893.
- 15 Ma Li'na, Hu Yongming, Luo Hong, *et al.* Acoustic pressure sensitivity of Yb/Er co-doped distributed bragg reflection fiber laser hydrophone[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1473-1478.
- 马丽娜, 胡永明, 罗 洪, 等. 基于钇镱共掺分布布拉格反射式光纤激光器的有源光纤水听器声压灵敏度[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1473-1478.
- 16 Yelen K, Zervas M N, Hickey L M B. Fiber DFB lasers with ultimate efficiency[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 32-43.
- 17 Li Haiqing, Chen Gui, Wang Yibo, *et al.* Study on the photo-darkening in fiber[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(4): 26-30.
- 李海清, 陈 瑰, 王一礴, 等. 光纤中光子暗化效应研究[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(4): 26-30.