

高效率纤芯同带抽运铒镱共掺光纤放大器

吴武明^{1,2,3} 杨未强³ 肖虎³ 周朴³ 郭少锋³ 许晓军³ 吴毅¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
²中国科学院研究生院, 北京 100049
³国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 搭建了输出 1535 nm 激光的铒镱共掺光纤放大器,通过注入 1064 nm 信号光以抑制 Yb 离子波段处的放大自发辐射光,放大后的 1535 nm 最大功率为 3.2 W。然后利用 1535 nm 激光进行了 1570 nm 种子光纤芯同带抽运铒镱共掺光纤放大实验,研究了在不同功率的抽运光时放大器的输出功率和光谱。当种子光功率为 80 mW,铒镱共掺光纤长度为 5 m,1535 nm 抽运光为 2.1 W 时,放大器最大输出功率为 1.22 W,斜率效率为 58.4%。同时进行了常规的 976 nm 包层抽运 1570 nm 种子光的对比实验。基于同一种子光和相同长度的增益光纤,常规抽运方式的斜率效率为 23.7%。实验结果证明了同带抽运方式具有更高的转换效率。

关键词 光纤放大器;纤芯同带抽运;铒镱共掺光纤;放大自发辐射抑制;斜率效率

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060605

High Efficiency Inband Core-Pumped Erbium/Ytterbium-Codoped Fiber Amplifier

Wu Wuming^{1,2,3} Yang Weiqiang³ Xiao Hu³ Zhou Pu³ Guo Shaofeng³

Xu Xiaojun³ Wu Yi¹

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A cladding-pumped single-mode Er:Yb-codoped fiber amplifier which is seeded by two lasers at 1535 nm and 1064 nm is designed to suppress the harmful Yb emission. An inband core-pumped fiber amplifier is constructed with the 1535 nm laser. The output power and spectrum of the amplifier are measured with different launched pump power. A 1.22 W maximum output power with 58.4% slope efficiency is achieved when the gain fiber is 5 m long, the seed laser power is 80 mW, and the 1535 nm pump power is 2.1 W. The output power and efficiency of a traditional amplifier whose pump source is 976 nm laser diode are also measured. The experimental results indicate that inband-pumped fiber amplifier can achieve higher efficiency than traditional fiber amplifiers.

Key words fiber amplifier; inband core pump; Er:Yb-codoped fiber; amplified spontaneous emission suppression; slope efficiency

OCIS codes 060.2320; 140.3280

1 引言

由于其人眼安全特性,高功率 1.5~1.6 μm 波段激光在空间通讯、远程监控以及医学方面都应用广泛。

收稿日期: 2012-03-13; **收到修改稿日期**: 2012-03-25; **网络出版日期**: 2012-05-05

基金项目: 国防科学技术预先研究基金(513260102)资助课题。

作者简介: 吴武明(1981—),男,博士研究生,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: treewwm@gmail.com

导师简介: 吴毅(1960—),男,硕士,研究员,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: wy@naol.hfcas.ac.cn

(通信联系人)

输出此波段的掺铒光纤要达到高增益,需要有足够的激活离子来吸收抽运能量,在高掺杂浓度下会产生严重的离子聚集,出现浓度淬灭。铒镱共掺光纤(EYDF)解决了上述问题,但当采用 976 nm 的激光二极管(LD)抽运时,由于量子亏损大,高功率放大的斜率效率较低,一般小于 40%,这将产生很大的废热^[1];另外,由于 Yb 离子在约 1 μm 处的放大自发辐射(ASE)存在,一般会导致光纤端面或者 LD 损伤^[2,3]。迄今为止,公开报道最高功率输出的是南安普顿大学的 Jeong 等^[4]在 2007 年研制的 297 W 的 1567 nm 铒镱共掺光纤激光器,当激光输出功率大于 200 W 时,Yb 离子在 1065 nm 左右的 ASE 限制了功率进一步放大,使激光斜率效率从 40%下降到 19%。而韩群等^[5~8]在理论和实验上研究了通过注入与抽运光同向的 1060 nm 左右信号光,可在一定程度上克服 Yb 离子的 ASE,但量子亏损大、废热多的缺点还是存在。

与常规 976 nm 抽运光注入增益光纤不同的是,同带抽运采用接近输出激光波长的抽运光,一般两者处于激活离子的同一能带内。其优点是在放大时量子损耗小,斜率效率高,废热少^[9,10];另外,因不需要考虑 Yb 离子能量的传递,从而在高功率放大时无 1 μm 附近的寄生振荡^[1]。2011 年,南安普顿大学的 Lim 等^[11]报道了利用 1535 nm 纤芯同带抽运铒镱共掺光纤放大器,其 1562.5 nm 激光最高输出功率为 18.5 W,斜率效率达 80%。

本文对全光纤结构的同带抽运铒镱共掺光纤放大器进行了实验研究。首先分别搭建了 1535 nm 和 1570 nm 激光器。然后以铒镱共掺光纤为增益介质,利用 976 nm 抽运光对 1535 nm 激光进行了放大。在放大器中注入与抽运光同向的 1064 nm 信号光,有效抑制了 Yb 离子波段处的后向 ASE,1535 nm 的最大输出功率为 3.2 W,斜率效率为 22.3%。最后以 1535 nm 激光作为抽运光,对 1570 nm 种子光进行放大。测试了不同 1535 nm 抽运光功率下的放大器输出功率和光谱特性。当抽运光功率为 2.1 W 时,获得了 1.22 W 的 1570 nm 输出,此时斜率效率为 58.4%。为比较同带抽运方式与常规 976 nm 抽运方式的优劣,把抽运光换成 976 nm 的 LD 光。当最大抽运功率为 3.5 W 时,1570 nm 放大器的最大输出功率为 880 mW,斜率效率为 23.7%。实验结果表明,在其他参数相同的情况下,同带抽运方式的光光效率明显优于常规抽运方式。

2 实 验

2.1 1535 nm 和 1570 nm 种子光

实验中用作 1535 nm 和 1570 nm 种子光的是实验室搭建的线型驻波腔激光器,腔体结构相同,如图 1 所示,均由一台 976 nm 尾纤输出的 LD、一对中心波长为输出激光波长的光纤布拉格光栅(FBG)和长度为 8 m 的单包层掺铒光纤组成。两个 FBG 的中心反射率分别约为 99%和 10%。经隔离器后,1535 nm 和 1570 nm 激光器的最大输出功率分别为 27 mW 和 80 mW,输出光谱如图 2 所示。



图 1 1535 nm 和 1570 nm 光纤激光器结构图
Fig. 1 Schematic diagram of the 1535 nm and 1570 nm seed lasers

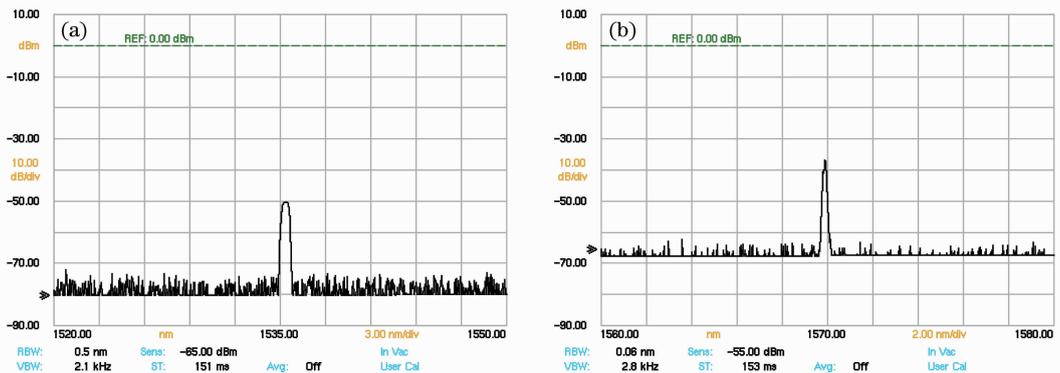


图 2 (a) 1535 nm 和(b) 1570 nm 光纤激光器输出光谱
Fig. 2 Spectra of (a) 1535 nm and (b) 1570 nm fiber lasers

2.2 1535 nm 放大器

1535 nm 种子光和 1064 nm 信号光经隔离器后功率分别为 27 mW 和 15 mW, 然后经 1064 nm/1535 nm 的波分复用器(WDM)一起注入放大器, 如图 3 所示。需要说明的是, 1064 nm 信号光直接使用了实验室现有线宽约 20 kHz 的单频光, 而实际中并不需要单频光。放大器所用的增益光纤为单模铒镱共掺光纤, 纤芯和内包层直径分别为 $6\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$; 包层对 976 nm 光的吸收系数约 3.87 dB/m, 光纤长度为 7 m。种子激光和 976 nm 抽运光经 $(1+1)\times 1$ 的耦合器注入增益光纤, 放大器输出首先经 1064 nm/1535 nm 的 WDM 分光, 其中 1064 nm 激光输出端口制作成约 8° 的斜角。

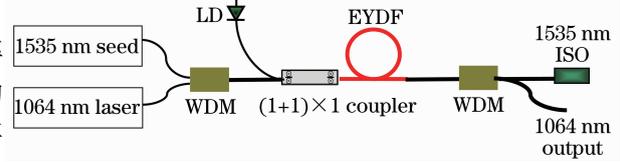


图 3 1535 nm 光纤放大器结构示意图

Fig. 3 Experimental setup of the 1535 nm fiber amplifier

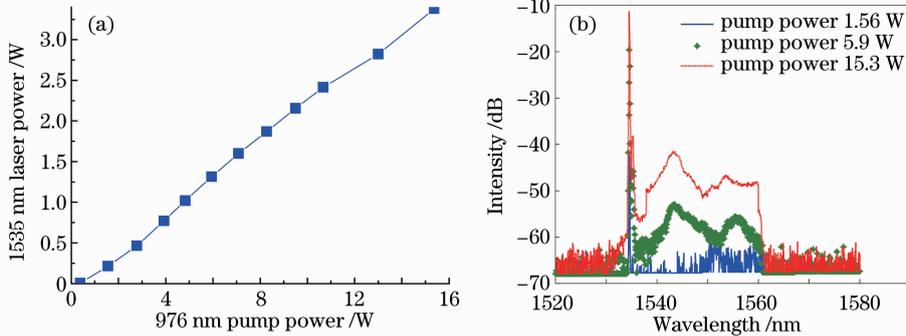


图 4 (a) 1535 nm 激光输出功率随 976 nm 抽运功率变化; (b) 1535 nm 激光在不同抽运功率下的光谱

Fig. 4 (a) 1535 nm output power as a function of launched 976 nm pump power; (b) 1535 nm output spectra with different launched pump powers

1535 nm 激光经隔离器(ISO)后其输出功率及光谱随抽运光功率的变化如图 4 所示, 最大输出功率为 3.2 W, 斜率效率约为 22.3%。从图 4(b)可以看出, 随着抽运功率的增大, 放大器输出中的 1540~1560 nm 波段 ASE 光较多, 但仍与信号光相差约 30 dB。单频 1064 nm 激光的输出功率随抽运光功率的变化如图 5 所示, 最大输出功率为 0.98 W, 斜率效率较小, 约 9.5%。这说明注入 1064 nm 信号光对铒镱共掺光纤的 Yb 和 Er 离子之间能量转换的影响很小。

2.3 1570 nm 激光放大器

1570 nm 放大器结构如图 6 所示。经放大后的 1535 nm 激光和 1570 nm 种子激光首先经一个 1535 nm/1570 nm 的 WDM 合束, 然后和 976 nm 抽运光一起经 $(1+1)\times 1$ 的耦合器注入单模铒镱共掺光纤, 其内包层直径分别为 $7\ \mu\text{m}$ 和 $130\ \mu\text{m}$, 纤芯数值孔径为 0.17, 纤芯对 1535 nm 光的吸收系数约 38 dB/m。同带抽运时, 976 nm 抽运光不开启, 而 976 nm 常规包层抽运时, 1535 nm 激光关闭。在实验中, 经 WDM 后的 1570 nm 种子光功率恒定为 80 mW, 增益光纤长 5 m。

2.3.1 1535 nm 同带抽运

同带抽运时, 由于 WDM 的最大承受功率为 2 W, 用作抽运光的 1535 nm 激光最大功率调至 2.1 W, 此时放大后的 1570 nm 输出功率为 1.22 W, 斜率效率约为 58.4%。1570 nm 的输出功率及光谱随 1535 nm

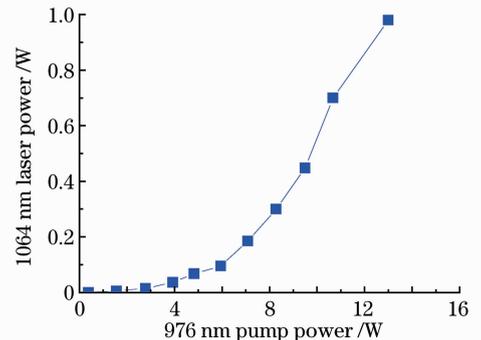


图 5 1064 nm 激光输出功率随抽运功率的变化

Fig. 5 1064 nm output power as a function of launched pump power

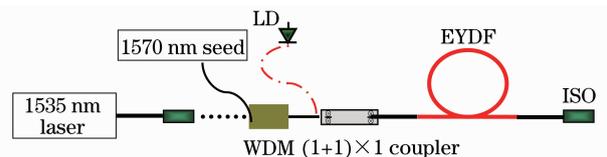


图 6 1570 nm 光纤放大器结构图

Fig. 6 Experimental setup of 1570 nm fiber amplifier

抽运光的变化如图 7 所示。从图 7(b)可看出,随着 1535 nm 抽运光功率的增大,输出光谱在 1545~1560 nm 的 ASE 光也随之变大,这是由于抽运光中此波段的 ASE 本来就相对较强。在最大功率输出时,ASE 光与信号光相差大于 30 dB。

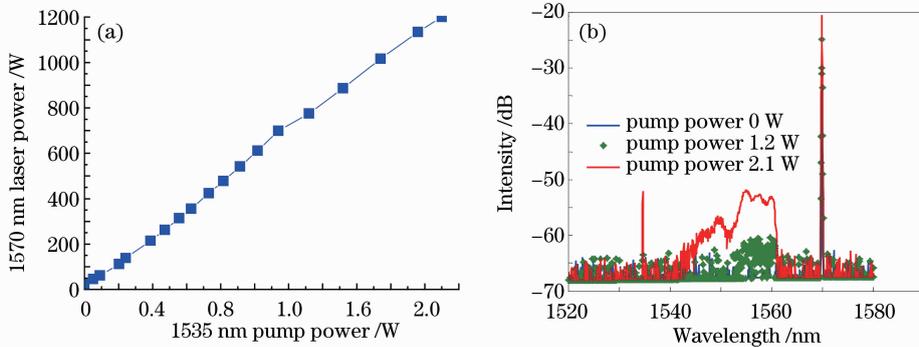


图 7 (a) 1570 nm 激光输出功率随 1535 nm 抽运光功率的变化;(b) 1570 nm 激光在不同 1535 nm 抽运光功率下的输出光谱

Fig. 7 (a) 1570 nm output power as a function of launched 1535 nm pump power; (b) 1570 nm output spectra with different launched 1535 nm pump powers

2.3.2 976 nm 常规抽运

常规包层抽运时,输出功率随 976 nm 抽运光变化如图 8 所示。当最大抽运功率为 3.4 W 时,放大器最大输出功率为 880 mW,光谱中未观测到抽运光,此时斜率效率为 23.7%,远低于 1535 nm 激光同带抽运时的斜率效率。

3 结 论

搭建了 1535 nm 放大器,同时注入 1064 nm 信号光来抑制放大器中 Yb 离子波段处的 ASE。利用多模 976 nm 抽运源对 1535 nm 激光进行放大,斜率效率约 22.3%。然后以得到的 1535 nm 激光为抽运光,进行了纤芯同带抽运 1570 nm 铒镱共掺光纤放大器的实验研究。研究了在不同功率的 1535 nm 抽运光下放大器的输出功率和光谱。当抽运光功率为 2.1 W 时,1570 nm 放大器输出功率为 1.22 W,斜率效率为 58.4%。在种子光和增益光纤长度相同时,常规包层抽运的斜率效率仅为 23.7%。虽然两种放大方式分别为纤芯和包层抽运,但相应的实验结果可以证明同带抽运方式的转换效率远远高于常规抽运方式。下一步计划实现更高功率的 1535 nm 激光输出,进行纤芯和包层同带抽运的实验,以详细分析高功率同带抽运铒镱共掺光纤的特性。

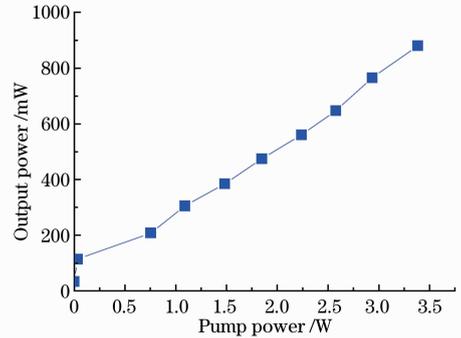


图 8 1570 nm 激光输出功率随 976 nm 抽运光功率的变化

Fig. 8 1570 nm output power as a function of launched 976 nm pump power

参 考 文 献

- 1 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): B63~B92
- 2 D. Y. Shen, J. K. Sahu, W. A. Clarkson. Highly efficient Er, Yb-doped fiber laser with 188 W free-running and >100 W tunable output power[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(13): 4916~4921
- 3 A. Yusim, J. Barsalou, D. Gapontsev *et al.*. 100 watt single-mode CW linearly polarized all fiber format 1.56- μ m laser with suppression of parasitic lasing effects[C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 69~77
- 4 Y. Jeong, S. Yoo, C. A. Codemard *et al.*. Erbium; ytterbium codoped large-core fiber laser with 297 W continuous-wave output power[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 573~579
- 5 Han Qun, Ning Jiping, Zhang Weiwei *et al.*. ASE suppression method for high power pumped Er: Yb co-doped fiber

- amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 252~257
- 韩 群, 宁继平, 张伟毅 等. 高功率抽运钕共掺光纤放大器中放大自发辐射抑制方法的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 252~257
- 6 Q. Han, J. Ning, Z. Sheng. Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding-pumped Er-Yb[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(11): 1535~1541
- 7 Vincent Kuhn, Dietmar Kracht, Jorg Neumann *et al.*. Dependence of Er:Yb-codoped 1.5 μm amplifier on wavelength-tuned auxiliary seed signal at 1 μm wavelength[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(24): 4105~4107
- 8 Qun Han, Yang He, Zhaoxia Sheng *et al.*. Numerical characterization of Yb-signal-aided cladding-pumped[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(9): 1599~1601
- 9 S. U. Alam, A. T. Harker, R. J. Horley *et al.*. All-fibre, high power, cladding-pumped 1565 nm MOPA pumped by high brightness 1535 nm pump sources[C]. CLEO, 2008. CWDJ4
- 10 Jun Zhang, Viktor Fromzel, Mark Dubinskii. Resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped LMA fiber laser with record high power and efficiency[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(6): 5574~5578
- 11 Ee-Leong Lim, Shaif-ul Alam, David J. Richardson. Highly efficient, high power, inband-pumped erbium/ytterbium-codoped fiber laser[C]. CLEO, 2011, CTuI1