

doi: 10.3788/gzxb20144302.0206005

自放大结构分布反馈光纤激光器输出特性

宋志强¹, 祁海峰¹, 郭健¹, 王昌¹, 彭纲定²

(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, 济南 250014)

(2. 新南威尔士大学 电子工程与通信学院, 澳大利亚 悉尼 2052)

摘 要:在光敏性掺铒光纤上制作了 45 mm 长非对称相移结构光纤光栅, 构成前后向功率输出比大于 100 : 1 的分布反馈光纤激光器. 利用一定长度的掺铒光纤吸收有源相移光栅后的剩余泵浦光, 实现了对前向输出激光信号的放大, 并采用 OptiSystem 软件模拟了掺铒光纤长度与增益的关系. 为了保持输出激光的窄线宽和低噪声特性, 利用布喇格波长与激光相同的光纤光栅和光纤环形器构成光窄带滤波器, 对放大后激光信号的 ASE 噪声进行滤除. 研究表明: 所设计的激光器结构充分利用了泵浦光, 在 300 mW 的 (980 nm) 泵浦功率下获得了功率为 32.5 mW, 线宽为 11.5 kHz, 相对强度噪声为 -87 dB/Hz 的激光输出.

关键词:分布反馈光纤激光器, 相移光纤光栅, 光纤放大器, 窄线宽, 低噪声

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0206005-4

Characteristics of Self-amplified Distributed Feedback Fiber Laser

SONG Zhi-qiang¹, QI Hai-feng¹, GUO Jian¹, WANG Chang¹, PENG Gang-ding²

(1 Key Lab of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong, Jinan 250014, China)

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

Abstract: A distributed feedback (DFB) fiber laser with a ratio of backward to forward output power of 100 : 1 was composed by a 45mm length asymmetrical phase-shifted fiber grating fabricated on erbium-doped photosensitive fiber. Forward output laser was amplified and population inversion was got by using a certain length of Nufern EDFL980-Hp erbium-doped fiber to absorb surplus pump power after the active phase-shifted fiber grating. Using OptiSystem software, the best fiber length of the EDFL to get the highest gain was simulated. In order to keep the amplified laser with narrow line-width and low noise, a narrow-band light filter consisted of a fiber grating with the same Bragg wavelength as the laser and an optical circulator was used to filter the ASE noise of the out-cavity erbium-doped fiber. The designed laser structure sufficiently utilized the pump power, and a fiber laser of 32.5 mW output power, 11.5 kHz line width, and -87 dB/Hz relative intensity noise (RIN) at 300 mW of 980 nm pump power was gave.

Key words: Distributed feedback fiber laser; Phase-shifted fiber grating; Fiber amplifier; Narrow-linewidth; Low-noise

OCIS Codes: 060.2310; 060.3510; 060.3715

0 引言

分布反馈光纤激光器(Distributed Feedback Fiber Laser, DFB-FL)是直接 在 稀 土 掺 杂 光 纤 上 刻 写 光 纤 光

栅构成的一种激光器, 由于采用单独的有源相移光纤光栅作为激光谐振腔, 因此具有窄线宽、低噪声和稳定单模运转等优点, 在高灵敏度声波、振动信号检测技术中作为传感器, 有着重要的应用价值^[1-5]. 另一方面, 由

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205083)、国家国际科技合作项目(No. 2012DFA10730)和山东省中青年科学家科研奖励基金(No. BS2010DX030)资助

第一作者: 宋志强(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为光纤光栅及窄线宽光纤激光器. Email: sqz821214@163.com

收稿日期: 2013-06-09; 录用日期: 2013-08-07

<http://www.photon.ac.cn>

于DFB-FL谐振腔长很短,而光纤稀土离子掺杂浓度不宜过高,因此其输出功率一般很小,这使得它尽管有上千米的相干长度,却无法完全满足在激光雷达、相干探测等方面的应用要求.采用铒/镱共掺光纤^[6]是有效提高光纤激光器转换效率的方法,但目前此类光纤产品的光敏性很弱,难以制作出合适参量的相移光纤光栅,无法保证激光信号的线宽和噪音性能.MOPA放大结构^[7-8]也是一种可行的方法,将窄线宽激光器作为种子光源进行多级放大,已可实现上百mW的功率输出,但这使得系统结构复杂,成本增加.考虑到DFB-FL中增益光纤的长度很短,绝大部分泵浦光并不会被吸收利用而浪费,本文设计了一种自放大结构的DFB-FL,无需另加泵浦光源,只利用一段合适长度的掺铒光纤熔接在单向输出的DFB-FL后端,吸收剩余的泵浦光实现粒子数反转,并将DFB-FL的激光信号进行放大.利用布喇格波长与激光相同的光纤光栅和光纤环形器构成光窄带滤波器,消除了腔外掺铒光纤ASE噪音对放大后激光性能的影响,最终实现了30mW功率的窄线宽低噪音光纤激光输出.

1 实验及讨论

1.1 非对称结构DFB光纤激光器

相移光纤光栅(PS-FBG)是DFB-FL的核心器件,它的制作方法有多种,常用的有遮挡法、二次曝光法等,本文采用相移更准确的相位掩模板移动法曝光制作了非对称结构PS-FBG^[9-10].所用光纤长度为50mm的Nufern PS-ESF-3/125光敏性掺铒光纤,光栅长度 L_g 为45mm.为了提高激光的单向输出性, π 相移引入在 $0.4L_g$ 的位置,相移光栅透射窗口波长为1536.1nm,光栅耦合系数约 150 m^{-1} ,所构成的DFB-FL如图1.

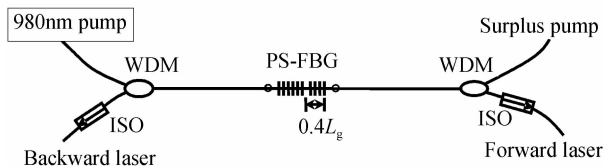


图1 非对称结构DFB-FL
Fig. 1 Structure of asymmetric DFB-FL

采用300mW的980nm半导体激光器作为泵浦源,将PS-FBG远离相移点的一端作为泵浦输入端,另一端作为激光的输出端,测量记录激光器的前后向输出功率和剩余泵浦功率随泵浦功率的变化,如图2.从图中可以看出,所制作的DFB-FL前后向激光功率输出比大于100:1,具有良好的单向输出性,300mW泵浦功率下前向激光功率达 $320\text{ }\mu\text{W}$,激光斜效率为0.1%,并且泵浦光通过PS-FBG后仍有大量剩余,最多有近200mW的泵浦功率未被吸收利用.采用延迟零差法^[11-12]测量了DFB-FL的线宽和相对强度噪音(RIN)分别为6.7kHz和 -102 dB/Hz ,激光信噪比约

65dB,相关数据在表1中作进一步讨论.

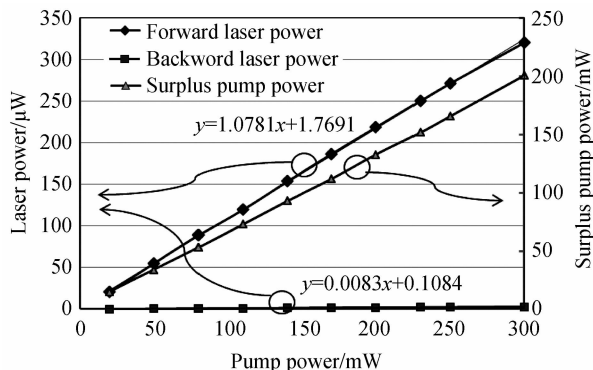


图2 DFB-FL功率曲线
Fig. 2 Output power of DFB-FL

1.2 放大铒纤长度优化

1.1节所述DFB-FL无法充分利用泵浦光,若在PS-FBG后熔接一定长度的掺铒光纤,则可构成如图3所示的同向泵浦结构光纤放大器^[13-14],对激光信号进行放大.由于光纤放大器的信号光和泵浦光均从DFB-FL输出,功率值对应图2中一定泵浦功率下的前向激光功率和剩余泵浦功率,因此放大器的信号光功率和泵浦功率都不可单独的变化,而是按照DFB-FL的功率曲线同步变化.

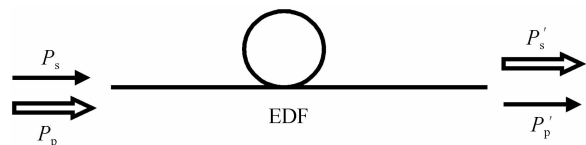


图3 DFB-FL放大等效模型
Fig. 3 Model of DFB-FL amplification

采用OptiSystem软件模拟了不同泵浦功率下激光信号增益随掺铒光纤长度的变化情况,结果如图4.所用掺铒光纤参量参照Nufern EDFL980-Hp光纤产品指标, Er^{3+} 掺杂浓度为4000ppm.

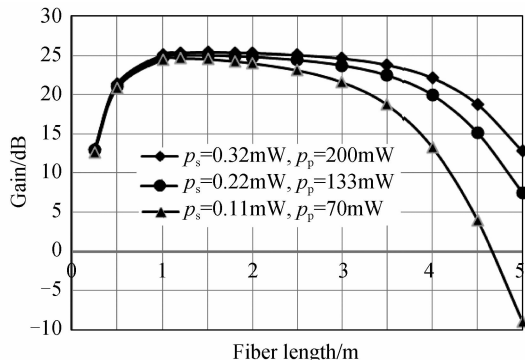


图4 放大增益随光纤长度变化
Fig. 4 Gain changes with the fiber length

图4中分别给出了980nm泵浦功率为100mW、200mW和300mW时对应产生的激光信号功率和剩余泵浦功率下的放大增益随光纤长度的变化情况.可以看出,一定泵浦功率下,随着掺铒光纤长度的增大,

信号增益并非持续变大,而是存在最佳光纤长度使增益最大化;而在一定的光纤长度下,泵浦功率越大,输出激光增益也越大,并且最佳光纤长度有变大的趋势.根据模拟结果,所制作的DFB-FL获得最佳放大增益的EDFL980-Hp光纤长度为1.5 m,当泵浦功率为300 mW时可在320 μW输出功率的基础上获得25 dB左右的增益.

1.3 放大滤波结构DFB-FL

尽管通过增加腔外铟纤可实现DFB-FL激光信号的有效放大,但光纤放大器自发辐射噪音会严重影响放大信号的噪音性能^[15].为了消除掺铟光纤ASE噪音对放大后激光性能的影响,可以利用布喇格波长与激光相同的光纤光栅和光纤环行器对放大信号进行滤波.本文所设计的具有自放大和滤波结构的DFB-FL如图5所示,模拟分析结果表明,采用1.5 m Nufern EDFL980-Hp光纤作为DFB-FL的腔外增益光纤,与激光同波长的FBG与PS-FBG放置在同一块散热片上,FBG具有0.2 nm反射带宽,15 dB边模抑制比大于99%的反射率.

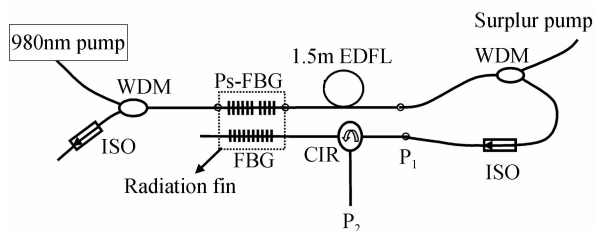


图5 自放大结构DFB-FL

Fig. 5 Structure of self-amplified DFB-FL

如图5所示,分别从图中P₁和P₂处测量DFB-FL功率放大后,经过滤波前后的功率曲线和光谱变化,如图6和图7.相比于原始的DFB-FL,经腔外铟纤放大后,激光器的斜率效率获得明显提升.未滤波时300 mW泵浦功率下激光器输出45.5 mW,而滤除ASE后仍有超过32.5 mW的激光输出,并且斜率效率未出现变小的趋势,若继续提高泵浦功率,激光器输出功率仍可增大.相比于0.32 mW的原始激光信号,自放大激光器获得了20 dB的增益,实际获得的增益值远小于模拟结果,这是由于模型中未考虑损耗和ASE

噪音的影响,只考虑了理想的光光转化过程.从图7可以看出,未滤波时放大激光的噪音很高,信噪比仅为50 dB,而通过光栅滤波后激光信号噪音得到了有效抑制,略高于原始DFB-FL噪音谱.

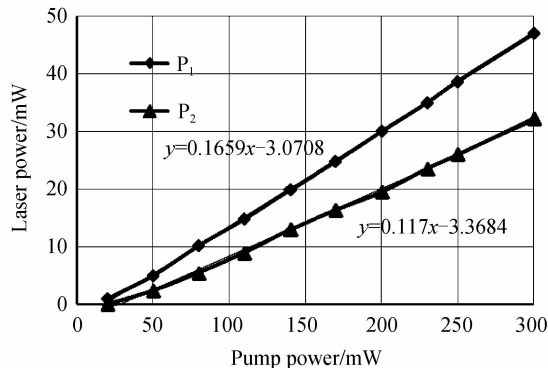


图6 自放大结构DFB-FL功率曲线

Fig. 6 Output power of self-amplified DFB-FL

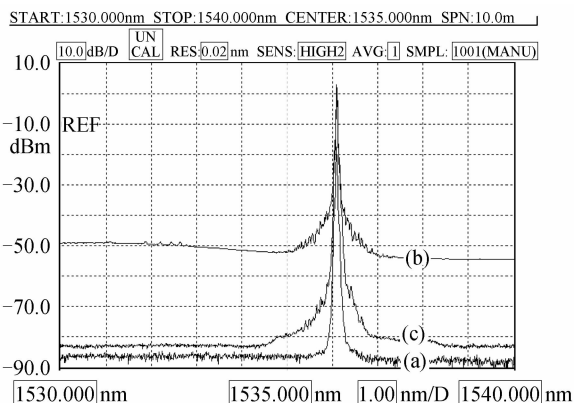


图7 激光光谱变化

Fig. 7 The change of the laser spectrum spectrum of (a) original DFB-FL; (b) amplified DFB-FL; (c) filtered DFB-FL

进一步测量自放大激光器的线宽和RIN,放大前后的指标对比情况如表1.除了功率和效率获得明显提高以外,激光线宽和RIN都有所恶化,线宽展宽了近一倍,RIN降低了15 dB,而受惠于输出功率的提升和噪音的抑制,激光信噪比提高了近10 dB.另外,尽管采取增加腔外铟纤的方法吸收泵浦光,优化长度的铟纤并没有完全吸收泵浦功率.

表1 放大前后DFB-FL性能比较

Table 1 Comparison of performance before and after DFB-FL amplification

	Power/mW	Line-width/kHz	RIN/dB/Hz	Efficiency/%	SNR/dB	Surplus pump power/mW
Original DFB-FL	0.32	6.7	-102	0.1	~65	201
Self-amplified DFB-FL	32.5	11.5	-87	11.9	~75	30

2 结论

窄线宽光纤激光器是光纤激光技术的重点发展方向之一,在保证窄线宽和低噪音特性的同时,获得较高的输出功率将进一步拓宽窄线宽光纤激光器的应用领

域.本文将DFB-FL和光纤放大器结合,设计了自放大结构的DFB-FL,单向输出结构的DFB-FL提供了低噪音窄线宽的激光信号,合理的腔外掺铟光纤有效利用了剩余泵浦功率,对激光信号提供了更大的增益,而光纤光栅滤波器的引入保证了放大后激光的低噪音和窄

线宽输出特性. 这为具有较大功率的窄线宽光纤激光器的实现提供了一种简单可行的结构方案.

参考文献

- [1] TIAN Peng-fei, SUN Xin-xin. Single longitudinal mode and narrow linewidth fiber lasers[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2010, **5**: 16-19.
田鹏飞, 孙欣欣. 单纵模窄线宽光纤激光器的研究[J]. *光纤与光缆及其应用技术*, 2010, **5**: 16-19.
- [2] TIKHOMIROV A, FOSTER S, DFB F L. Sensor cross-coupling reduction[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(2): 533-538.
- [3] JIANG Qi, SUI Qing-mei, XU Yu-chao, *et al.* Experiment and design of distributed feedback fiber laser hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2795-2799.
蒋奇, 隋青美, 徐于超, 等. 分布反馈光纤激光器水听器设计与实验[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2795-2799.
- [4] XIONG Shui-dong, LIU When, YANG Hua-yong, *et al.* Investigation on the coherence collapse characteristics of single-longitudinal-mode DFB fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(2): 161-166.
熊水东, 刘文, 杨华勇, 等. 单纵模分布反馈式光纤激光器的相干坍塌特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(2): 161-166.
- [5] SONG Xiao-yan, ZHANG Wen-tao, LI Fang, *et al.* Experimental investigation of bending characteristics of distributed feedback fiber lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 807-810.
- [6] YELEN K, HICKEY L, ZERVAS M. Experimentally verified modeling of erbium-ytterbium co-doped DFB fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(3): 1380-1392.
- [7] VOO N Y, SAHU J K, IBSEN M. 345-mW 1836-nm single-frequency DFB fiber laser MOPA[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(12): 2550-2552.
- [8] XUE Li-fang, 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): 014213-1-5.
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): 014213-1-5.
- [9] POLADIAN L, ASHTON B, PADDEEN W E, *et al.* Characterization of phase-shifts in gratings fabricated by over-dithering and simple displacement [J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**: 173-188.
- [10] QI Hai-feng, SONG Zhi-qiang, LI Shu-juan, *et al.* Apodized distributed feedback fiber laser with asymmetrical outputs for multiplexed sensing applications[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(9): 11309-11314.
- [11] 孙学慧. 单纵模光纤激光器及其线宽的测量[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [12] NI Jia-sheng, ZHAO Yan-jie, WANG Chang, *et al.* Research on linewidth characteristics and broadening mechanism of distributed feedback fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(8): 084205-1-6.
倪家升, 赵艳杰, 王昌, 等. 分布反馈光纤激光器线宽特性及其展宽机理研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(8): 084205-1-6.
- [13] RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang, LUO Xiao-dong. Theoretical and experimental investigation on erbium-doped fiber amplifiers with long-period fiber grating filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 695-670.
- [14] SONG Mei-mei, FENG Su-juan, MAO Qing-he. Influences of pump schemes on gain properties of L-band double pass erbium doped fiber amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 681-685.
宋梅梅, 冯素娟, 毛庆和. 抽运方案对 L 波段双通掺铒光纤放大器增益特性的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 681-685.
- [15] SHI Ke-bin, SHENG Qiu-qin, GE Chun-feng, *et al.* Studies on the spectrum and the noise of EDFA[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **27**(3): 193-196.
施可彬, 盛秋琴, 葛春风, 等. 掺铒光纤放大器光谱特性和噪声特性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(3): 193-196.