窄线宽单频单偏振环行腔掺铒光纤激光器

欧 攀 贾豫东 张春熹 魏兴春

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了获得稳定的窄线宽单频单偏振掺铒光纤激光器输出,对采用饱和吸收体的环行腔结构掺铒光纤激光器进行了研究.实验中采用未抽运掺铒光纤作为饱和吸收体形成窄带滤波器,并选用高反射率的光纤光栅作为波长选择元件,同时采用具有高消光比的保偏环行器来获得单偏振激光.窄线宽单频单偏振环行腔掺铒光纤激光器的峰值波长可以通过拉伸光纤光栅进行调谐,调谐的范围为 1548～1552 nm.当抽运功率为 275 mW 时获得的输出最大功率 55.4 mW.通过采用光纤延迟自外差法的线宽测试技术测量出该环行腔掺铒光纤激光器的 20 dB 线宽为 3 kHz,光纤激光器的输出光偏振态长时间稳定在偏振度 99.9%.这种窄线宽单频单偏振掺铒光纤激光器可以作为相干激光雷达的稳定信号源.

关 键 词: 激光器; 光纤激光器; 环形腔激光器; 偏振

中图分类号: TN 248

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)11-1258-03

Narrow-linewidth single-frequency single-polarization Er-doped fiber ring laser

Ou Pan Jia Yudong Zhang Chunxi Wei Xingchun

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to acquire a stable narrow-linewidth single-frequency polarized Er-doped fiber laser, the ring fiber laser with a saturable absorber was studied. In the experiments, an un-pumped Er-doped fiber was used as saturable absorber to form an optical narrow-bandwidth filter, a fiber bragg grating with high reflectivity was adopted as coarse wavelength selective component, and a polarization-maintaining optical circulator with high extinction ratio was applied to acquire single polarization laser. The peak wavelength of the Er-doped ring fiber laser can be tuned from 1548 nm to 1552 nm by pulling the fiber bragg grating. The maximum output power was 55.4mW when the pump power arrived at 275mW. The 20dB linewidth of the Er-doped ring fiber laser was measured to be 3kHz with the fiber delayed heterodyne method. It was found that the polarization of the Er-doped ring fiber laser was very stable for a long term, and the degree of polarization was 99.9%. This narrow-linewidth single-frequency single-polarization Er-doped fiber laser can be used as stable signal source for coherent laser radar.

Key words: lasers; fiber lasers; ring laser; polarization

掺铒光纤激光器在光通信、传感、光谱学等领域有着广泛的应用.早在上世纪 60年代, E. Snitzer就发现了 Nd^{3+} 掺杂的玻璃波导中的激光发射现象, 80年代英国 Southampton大学成功地解决了 Er^{3+} 掺杂有源光纤的热淬灭问题,使得光纤放大器成为可能.光纤放大器的成功和走向成熟,极大地带动了各种各样的光纤激光器的研究. 1978年 Hill发现了光纤光敏光栅现象,直至上世纪 90年代,用紫外线写入光纤光栅技术的不断成熟,使得光纤光栅成为光纤激光器极佳的选频器.从此光纤激光器摆脱了用体光学元件作为选频器的局面,使得光纤激光器小型化成为可能,其可靠性得

收稿日期: 2007-11-16

作者简介: 欧 攀 (1977 -),男,湖南郴州人,讲师, oupan23@gmail.com.

到极大地提高.

以铒元素作为光纤内增益介质的掺铒光纤激光器已经被广泛研究.其中单频掺铒光纤激光器是一种极窄线宽的单频工作激光光源,作为一种单纵模工作激光器,线宽可以达到 kHz量级,具有很长的相干长度,适用于高端测试、传感器、科学研究等领域.

获得窄线宽单纵模光纤激光输出的方法很多,例如采用光纤光栅构成分布反馈或者分布布拉格反射的线性腔结构、单向运转的环形腔结构以及复合腔结构[1-2].为获得大功率的激光输出,人们常常采用长腔环形腔结构.但是由于激光器的腔长与自由光谱范围成反比,因此长腔环形腔的纵模间隔很窄,这就给单纵模激光输出带来了困难.基于可饱和吸收体的光窄带滤波器可以很好的解决输出功率和单纵模之间的矛盾.自 1992年首次提出瞬态光窄带滤波器以来[3],人们进行了大量的理论和实验研究[4-6].基于可饱和吸收体光窄带滤波器的光纤激光器的线宽普遍在 kHz量级,与广泛使用的半导体激光器相比,大大体现了光纤激光器的窄线宽优点.本文采用环行腔结构对单频单偏振掺铒光纤激光器进行了实验研究,采用未抽运掺铒光纤作为饱和吸收体,选用高反射率的光纤光栅作为选频元件,同时采用具有高消光比的保偏环行器,获得了 1 550 nm的窄线宽单频单偏振掺铒光纤激光器.该单频单偏振掺铒光纤激光器在光纤传感以及激光雷达等领域具有很好的应用前景.

1　光纤激光器实验装置

环行腔单频单偏振掺铒光纤激光器光路结构如图 1所示.实验中采用了波长为 974 nm的半导体激光器作为抽运源,其尾纤加入光纤光栅以稳定输出波长,并且采用 IXL Lightwave公司的 LDC-3744B作为其驱动,能够对半导体激光器提供非常稳定的驱动电流和芯片温度控制;抽运光经过 974/1550波分复用器耦合进入掺铒光纤,长度为 4.8m的单模掺铒光纤作为增益有源光纤,在 974 nm的吸收系数为 8.5 dB/m,1 550 nm的吸收系数和增益系数分别为 8.3 dB/m和 11.7 dB/m.掺铒光纤的另一端与 1 550 nm的光隔离器相连,一方面光隔离器可以抑制环形腔中的反向传输光,以提高光路的反向隔离度,增加环行腔掺铒光纤激光器的单频输出稳定性,另一方面也可以滤除残余的抽运光.隔离器后加入一个 1 550 nm的单模耦合器来获得激光输出,分光比为 50/50,其中一端用于激光输出,另一端的尾纤直接绕在偏振控制器上,然后与环行器的 1端口相连.

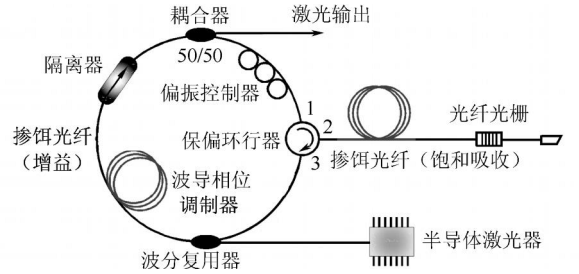

图 1　环行腔单频单偏振掺铒光纤激光器光路结构

环行器为保偏型,3个端口的尾纤均为熊猫型保偏光纤,并且具有较高的消光比,其中端口 1到端口 2的消光比为 38 dB,端口 2到端口 3的消光比为 32 dB.在光纤传感和激光雷达应用中,偏振态稳定输出的激光光源非常重要.该保偏光纤环行器是环形腔光纤激光器中偏振态控制的关键器件,其确保了环形腔光纤激光器获得稳定输出的单偏振激光输出.

环行器的 2端口与未抽运的掺铒光纤相连,该光纤与环行腔中的增益有源光纤型号相同,长度为 3.6m,该未抽运的掺铒光纤作为饱和吸收体和高反射率的光纤光栅共同作用形成超窄带宽的滤波器,使得环行腔掺铒光纤激光器获得单频输出.光纤光栅的性能对于光纤激光器获得稳定的单频激光非常重要,首先它决定了光纤激光器的激射波长,并且带宽越窄所能容纳的纵模数越少;其次光纤光栅的反射率越高,在作为饱和吸收体的掺铒光纤中正反两方向传输的激光形成的驻波效应就越强,超窄带宽的滤波效果也就越好.

2　实验测量结果和分析

实验中,环形腔光纤激光器光路中光器件的尾纤之间采用光纤熔接机熔接.光纤光栅的两端分别用光纤夹具固定在两个一维平移台上,调节其中的一个平移,使光纤拉紧,这样能够调整光纤光栅的反射峰波长,进而调节光纤激光器的波长.通过调整偏振控制器,可以使光纤激光输出达到最佳状态.整个实验装置放入一个有机玻璃罩中,能够较为有效的隔离外界振动和空气流动对光纤激光器的影响 (有机玻璃罩中的温度在 25 ℃左右),增加光纤激光器的输出的稳定性.

图 2为采用 AQ6319光谱分析仪测量到的光纤激光器输出功率为 55.4mW时的输出光谱,光谱仪的分辨率为 0.01nm,此时激光器的峰值波长

为 1549.975 nm,输出光谱平滑,没有观察到跳模发生.实验中通过拉伸光纤光栅,可以获得峰值波长在 1548～1552 nm之间的光纤激光器输出.

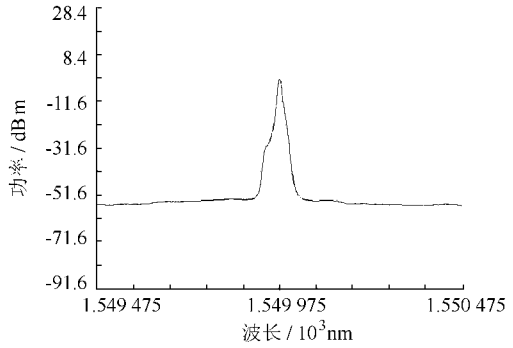

图 2 环行腔单频单偏振掺铒光纤激光器输出光谱

图 3为抽运功率与输出功率关系曲线,实验过程中,相邻数据点之间抽运功率的间隔变化为 0.5 mW.从图上可以看出,光纤激光器输出的最大光功率为 55.4 mW,光纤激光器的输出功率在抽运功率为 40～90 mW之间时,激光器输出功率与抽运功率的变化趋势密切相关.可以通过未抽运的掺铒光纤的饱和吸收效应对这种非线性现象进行解释.

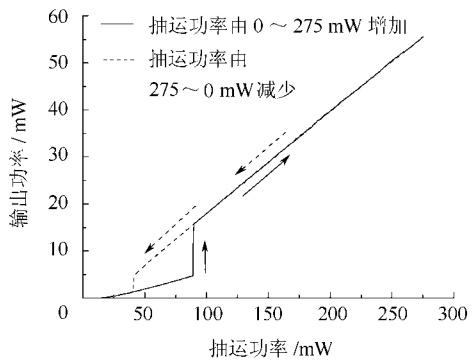

图 3 输出光功率随抽运光功率变化

当没有抽运光时,掺铒光纤对于其中的激光(信号光)作用可以作为图 4所示的二能级系统来考虑,其中 n_1和 n_2分别是铒离子的基态 S_0和激发态 S_1的粒子数密度.当频率为 ν,光强为 I的激光入射掺铒光纤时,基态 S_0的铒离子受激吸收,跃迁至激发态 S_1,吸收截面为 σ_a,再以自发辐射的方式回到基态,上能级寿命为 τ_{21},同时存在发射截面为 σ_e的受激发射.可以得到掺铒光纤饱和吸收体 z位置处的吸收系数为

$$\alpha(z) = \frac{\alpha_0}{1 + \dfrac{I(z)}{I_c}} \qquad (1)$$

式中,$I_c = h\nu/[(\sigma_a + \sigma_e)\tau_{21}]$,为饱和光功率;$\alpha_0$为掺铒光纤的小信号吸收系数.由式(1)可知未抽运的掺铒光纤中的信号光功率越大,则掺铒光纤对其的吸收系数就越小,当信号光功率等于饱和光功率时,吸收系数只有小信号吸收系数的一半,这就是未抽运的掺铒光纤的饱和吸收效应.

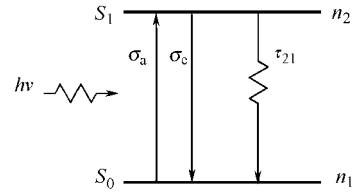

图 4 二能级系统的能级结构与受激吸收过程

抽运功率从 0开始不断增大,当抽运功率较小时,输出为自发辐射光,此时未抽运的掺铒光纤没有达到饱和吸收,因此对其中传输的自发辐射光吸收较大.当抽运光功率达到 90 mW时,开始输出激光,激光的产生使得未抽运的掺铒光纤进入饱和吸收状态,而输出的激光功率远大于自发辐射光功率,因此出现图 3中的输出功率跳变.而当抽运功率由高逐渐降低时,激光信号的存在,使得未抽运的掺铒光纤更容易处于饱和吸收状态,因此直到抽运光功率小于 40 mW时,输出光才减弱为自发辐射光.

光纤激光器单频运转时其线宽达到 kHz量级,超出了光谱仪分辨率.测量激光器线宽常用的方法是用 Fabay-Perot干涉仪,但是测量单频光纤激光器如此窄的线宽,Fabay-Perot干涉仪分辨率显得不够.外差法是测量很窄线宽较理想的方法,可以得到比较满意的分辨率.但是采用这种方法需要 2台频率接近的激光器,同时为了保证信号光和本振光之间的频率差相对固定,要设计差频跟踪模块,成本高且效果还不是很理想.

对于掺铒光纤激光器的窄线宽测定采用光纤延迟自外差法[7-9].实验中声光移频器的工作频率为 55 MHz;采用 25 km的单模光纤获得约 125μs的延迟时间.图 5是频谱仪测量到的环行腔光纤激光器采用光纤延迟自外差法得到的拍频信号的频谱线形,20 dB线宽为 3 kHz

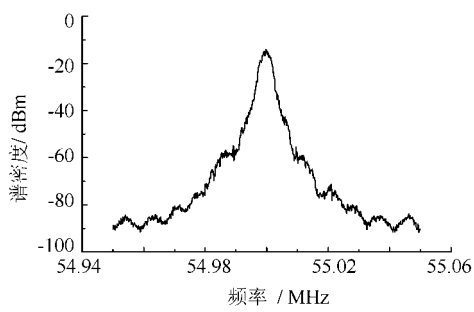

图 5 延时自外差法测量光纤激光器线宽频谱线形

(下转第 1265页)

数据可来源于需求、设计和测试 (不限于可靠性测试)等阶段,可实现全寿命可靠性评价.

本文只是初步的研究成果,有如下几点注意事项: ①特别适用于同一类软件版本进化过程中的软件可靠性评价活动; ②同一类型的软件产品,只需进行一次严格的灰关联分析; ③目前其只能在对可靠性指标不做严格定量要求的决策活动中作为传统定量评估方法的一种有效补充方法.

参考文献 (References)

[1] Alan Wood. Software reliability growth models: assumptions vs reality [C]//Los Alamitos. Proceedings of the 8th International Symposium on Software Reliability Engineering. New Mexico: IEEE Computer Society Technical Council on Software Engineering, 1997: 136 - 141

[2] ISO/IEC 9126-1 2001, Software quality characteristics and metrics-part1: quality model [S]

[3] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 2004
Liu Sifeng. Grey system theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)

[4] 王铁江,郦萌. 软件可靠性的模糊综合评估模型 [J]. 计算机工程与应用, 2002, 20: 23 - 26
Wang Tiejiang, Li Meng. A fuzzy comprehensive evaluation model for software reliability [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 20: 23 - 26 (in Chinese)

[5] 刘斌,陆民燕,阮镰. 基于模糊神经网络的软件可靠性早期预计方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(2): 237 - 240
Liu Bin, Lu Minyan, Ruan Lian. Early software reliability prediction: an approach based on fuzzy neural network [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(2): 237 - 240 (in Chinese)

[6] 梅登华,闵华清. 基于灰色系统理论的软件可靠性分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(7): 1103 - 1105
Mei Denghua, Min Huaqing. Reliability analysis for the software system in grey systems theory [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(7): 1103 - 1105 (in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)

(上接第 1260页)

利用 General Photonics生产的 DOP-101测试光纤激光器输出的偏振度为 99.9%,并且长时间 (30 min测量时间)保持稳定.

3 结　论

本文采用环行腔结构对单频掺铒光纤激光器进行了实验研究,采用较长的未抽运掺铒光纤作为饱和吸收体,并选用高反射率的光纤光栅作为选频元件,获得的环行腔掺铒光纤激光器在抽运功率为 275 mW时,最大输出功率 55.4 mW.通过采用光纤延迟自外差法的线宽测试技术测量出该环行腔掺铒光纤激光器的 20 dB线宽为 3 kHz,光纤激光器输出的偏振度为 99.9%,并且长时间保持稳定.该单频单偏振掺铒光纤激光器在光纤传感以及相干激光雷达等领域具有很好的应用前景.

参考文献 (References)

[1] Ball G A, Morey W W, Glenn W H. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(7): 613 - 615

[2] Zyskind J L, Mizrahi V, Digiovanni D J, et al. Short single frequency erbium-doped fibre laser [J]. Electronics Letters, 1992, 28(15): 1385 - 1387

[3] Frisken S J. Transient bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers [J]. Optics Letters, 1992, 17(24): 1776 - 1778

[4] Spiegelberg C, Jihong G, Yongdan H, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 57 - 62

[5] Zhang Renjie, Yu Benli, Cao Zhigang, et al. Frequency modulated and polarization maintaining fiber laser with narrow linewidth [J]. Optics Communications, 2007, 274(2): 392 - 395

[6] Wang T S, Guo Y B, Wang K. Analyzing longitudinal-mode of single-frequency ring fiber laser [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(6): 1494 - 1497

[7] Richter L E, Mandelberg H I, Kruger M S, et al. Linewidth determination from self-Heterodyne measurements with subcoherence delay times [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, QE-22(11): 2070 - 2074

[8] Chen Xiaopei, Han Ming, Zhu Yizheng, et al. Implementation of a loss-compensated recirculating delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement [J]. Applied Optics, 2006, 45(29): 7712 - 7717

[9] 贾豫东,欧攀,杨远洪,等. 短光纤延时自外差法测量窄线宽激光器线宽 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 568 - 571
Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong, et al. Short fibre delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 568 - 571

(责任编辑:张　嵘)