

文章编号:1004-4213(2011)05-0694-5

双程前向近高斯型掺铒超荧光光纤光源的实验研究

叶薇薇^{1,2}, 房鸿¹, 刘承香², 吴旭², 阮双琛², 张力³

(1 西安工业大学 数理系, 西安 710032)

(2 深圳市激光工程重点实验室, 深圳大学 电子科学与技术学院, 深圳 518060)

(3 深圳大学 信息工程学院, 深圳 518060)

摘 要:研究了输出谱型为近高斯型的掺铒超荧光光纤光源,分析了高斯型光谱的自相干函数和影响平均波长稳定性的因素.采用双程前向光源结构,通过选择铒纤长度获得高斯型光谱输出,同时调节泵浦功率来优化铒纤的本征温度系数对光源的影响,得到铒纤长度 10.05 m,泵浦功率为 172 mW 时,整体光路(除半导体泵浦激光器及其驱动电源)在全温 -40 °C ~ 60 °C 测试条件下平均波长稳定性为 66.651 ppm 的近高斯型掺铒光纤光源.

关键词:掺铒超荧光光纤光源;近高斯型;双程前向;自相干函数;平均波长稳定性

中图分类号:U666.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114005.0694

0 引言

掺铒超荧光光纤光源(Erbium-Doped Super-Fluorescent Source, EDSFS)也称之为放大的自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)光源,它具有输出光谱稳定性好、输出功率高、带宽宽、相干度低、受环境影响小、使用寿命长、易于与单模光纤耦合等优点,被广泛应用于光纤陀螺传感器、光纤通信、光学层析成像、光纤探测等领域中^[1-4].

目前国内外对掺铒超荧光光纤光源的研究主要集中在提高平均波长温度稳定性、增加光谱带宽、增大输出功率及转换效率等方面^[5].宽光谱可以降低瑞利散射、偏振交叉耦合和克尔效应等引起的相干误差;高的平均波长稳定性可以保证光纤陀螺标度因子的线性度和稳定性,使光纤陀螺的灵敏度及准确度大大提高^[6].但铒离子的吸收谱和发射谱决定了它具有双峰结构,输出光谱中包含 1 530 nm 和 1 560 nm 处的两个波峰,在铒纤长度固定的情况下,改变泵浦功率会使 1 530 nm 和 1 560 nm 峰的功率谱密度发生变化,对光谱稳定性和光谱平坦化上都有很大的影响^[7].

高斯型光谱牺牲了部分带宽,为单峰输出,输入功率的改变在一定范围内不改变它的输出功率谱密度,保证了光源平均波长的稳定性.它的优点主要

有:平均波长受功率变化影响小、温度稳定性高、输出光功率大、无需滤波和结构简单等.同时高斯型光谱相比其他光谱谱型的自相关度更低,相干长度更短^[8],有效地减少了陀螺的相位误差,提高了陀螺的准确度.

本文采用双程前向结构,通过优化掺铒光纤长度和泵浦功率大小,实验获得了近高斯型掺铒光纤光源.

1 高斯型光谱主要特性分析

在干涉式光纤陀螺中,如果陀螺中的瑞利背向散射光波与主光波完全相干,在进行干涉时将产生一个很大的相位误差,影响对旋转速率信号的检测.而光源光谱的相干函数直观地反映了光谱的时间相干性,所以分析光谱的自相干函数有着重要意义.

自相干的基本定理,称为维纳-欣钦(Wiener-Khinchin)定理.公式为

$$\Gamma(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha^2(f) e^{2i\pi f\tau} df \quad (1)$$

式中功率谱密度 $\alpha^2(f)$ 是以平均频率为中心的一个“中心型”谱.根据式(1)定义的归一化的中心型自相关函数: $\gamma(\tau) = \Gamma(\tau)/\Gamma(0)$ ^[9].图 1 给出高斯型、矩形和三角形等三种典型光源光谱的归一化自相干函数模拟图.

基金项目:武器装备预研基金项目(9140A * * * T5101)、深圳市科技计划配套和深圳市南山区科技项目配套基金资助

第一作者:叶薇薇(1983-),女,硕士研究生,主要研究方向为掺铒超荧光光源. Email: vonzen@163.com

通讯作者:刘承香(1976-),女,副教授,博士,主要研究方向为光纤光源. Email: chxliu@szu.edu.cn

导 师:房鸿(1964-),男,副教授,主要研究方向为物理电子与光电子.

收稿日期:2010-10-01;修回日期:2010-12-10

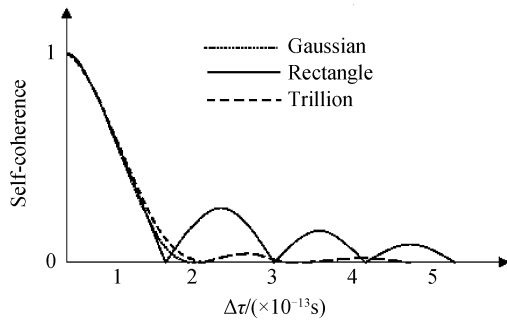


图1 三种光谱归一化自相干函数对比

Fig. 1 Normalized self-coherence function contrastive diagram of three different spectrums

从图1可以看出,在带宽相同的情况下,高斯型光谱的自相干函数包络面积最小,其它两种光谱均具有多个极值,它们的自相干函数不随相干时间增加而单调减小,这样会在长时间内造成不稳定因素,由此可以判断:抑制相干性方面高斯形光谱较另外两种谱型要好^[6]。

2 光源平均波长温度稳定性

平均波长是衡量掺铒光纤光源的一项重要指标,定义为

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n p(\lambda_i) \lambda_i}{\sum_{i=1}^n p(\lambda_i)} \quad (2)$$

式中 $p(\lambda_i)$ 是波长 λ_i 处的光功率密度^[10]。

掺铒光纤光源在环境温度变化时,影响平均波长的主要因素之间的关系可表示为^[11]

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dT} = \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial T} + \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial P_p} \frac{\partial P_p}{\partial T} + \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial \lambda_p} \frac{\partial \lambda_p}{\partial T} \quad (3)$$

式(3)中第一项是由铒纤的本征温度特性决定,取决于光纤的拉制工艺、掺杂浓度及不同温度下铒纤的吸收发射谱;第二项和第三项则是泵浦功率和泵浦波长在温度变化下对光源平均波长的影响,即泵浦源也是影响平均波长稳定性的重要因素。因此通过优化光纤长度、泵浦功率等各项参量,可使光源平均波长更稳定。

3 实验装置及介绍

实验中选用双程前向(Double-Pass Forward, DPF)结构^[12-13]实现近高斯型光谱的输出,实验装置如图2。

图2中泵浦激光器(Laser Diode, LD)注入驱动电流后,产生974 nm的泵浦光,经波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)进入增益介质掺铒光纤(Erbium-doped Fiber, EDF),同时在复用器后端加入法拉第旋光反射镜(Faraday

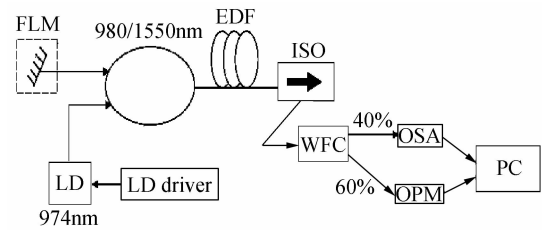


图2 双程前向(DPF)光源实验结构

Fig. 2 Experimental setup of double-pass forward SFS

Rotator Mirror, FRM), 反射率为98%,使泵浦光和后向光被反射后再次通过铒纤被充分吸收,进一步提高输出功率和改变输出谱型。当增益光从复用器前端输出到隔离器(Isolator, ISO)时,经分光比为4:6的耦合器(Wideband Fiber Coupler, WFC)分别输出到光谱仪和功率计上,采用 GPIB 卡及数据线与计算机连接,使计算机能够实时采集和记录光谱的平均波长、带宽和光源输出功率。

实验装置中所用的 LD 泵浦模块实测中心波长为 974 nm,最大输出功率为 200 mW。LD 驱动器采用 ILX 的 LDC-3744B 型,图3给出 LD 输出功率与其驱动电流关系图;波分复用器、隔离器的插入损耗均为 0.01 dB,隔离器的隔离度大于 65 dB;铒纤选用 Coractive L1500;光谱仪为中国电子科技集团公司第四十一研究所 AV6362 型,最高扫描准确度达 0.01 nm,测量范围为 600~1 700 nm;光功率计是 FPM-8210H 型,采用裸光纤适配器与光纤耦合。

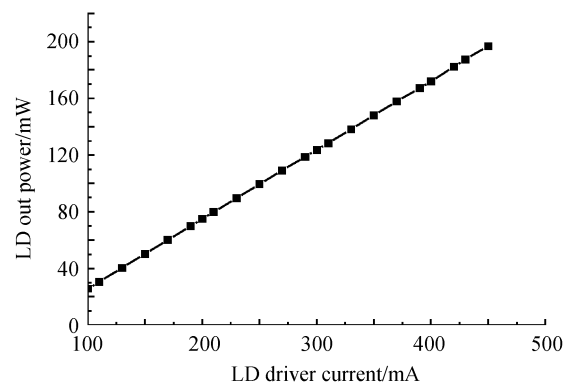


图3 泵浦源输入电流与泵浦输出功率的关系

Fig. 3 LD output power vs LD dirve current

4 实验结果及分析

试验中为了得到高斯型输出谱,对铒纤的长度进行了调节,当光纤长度为 10.05 m 时,输出谱型如图4,光谱测量范围为 1 540~1 580 nm,平均波长 1 560.596 nm。

由图4可以看出,输出谱呈单峰谱,1 530 nm 处短波波峰被完全吸收,平均波长和峰值波长相差仅 0.24 nm,实现了近高斯型光谱输出。

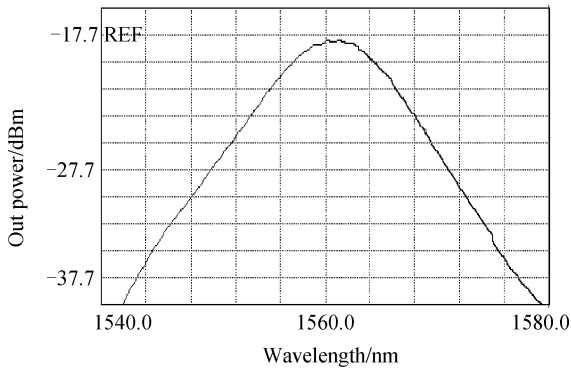


图4 光源输出光谱
Fig. 4 SFS output spectrum

图5和图6给出在该长度下,光源平均波长和输出功率随泵浦驱动电流的关系.从图5可以看出,随着泵浦驱动电流的增大,平均波长逐渐向短波长方向漂移,且关系曲线的斜率也逐渐变小,即平均波长随泵浦驱动电流的变化趋于平缓.由图6可知,光谱输出功率随着泵浦驱动电流的增大线性递增,光-光转换效率为21%,当泵浦驱动电流大于300 mA时,输出功率均在25 mW以上;同时平均波长变化较缓,功率变化对平均波长的影响较小,也即是式(3)中的 $\partial \lambda / \partial P_p$ 较小.因此,为了保证光谱的稳定性和较高的输出功率,实验中分别采用泵浦驱动电流为350 mA、370 mA和400 mA,对应的LD输出

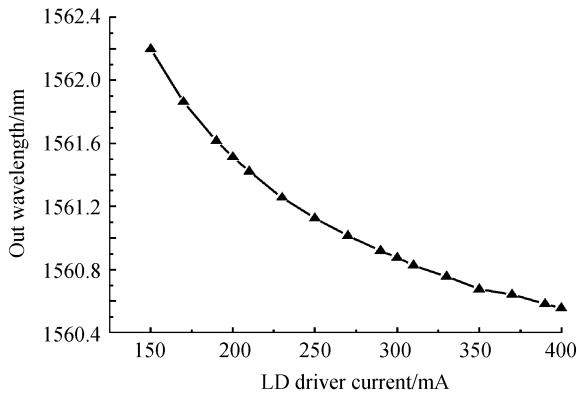


图5 平均波长随泵浦驱动电流的变化
Fig. 5 Mean wavelength vs. LD drive current

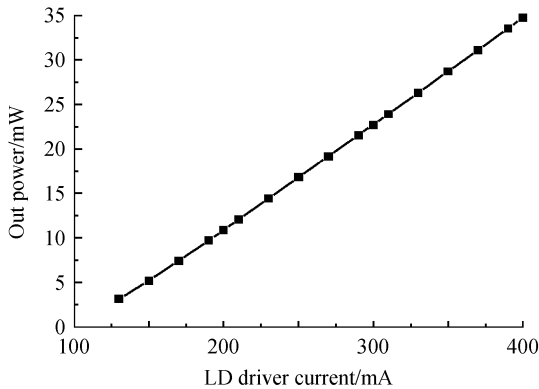


图6 输出功率随泵浦驱动电流的变化
Fig. 6 Output power vs. LD drive current

功率分别为147.9 mW、157.7 mW和172.0 mW,进行光源输出特性测试.

实验中先对光源进行常温测试,测试时室内温度变化在25℃~30℃之间.图7为不同泵浦驱动电流下光源平均波长和输出功率的1 h测试结果,从图中可以看出光源的平均波长变化很小,泵浦驱动电流为350 mA、370 mA和400 mA时,光源的平均波长稳定性分别为1.292 ppm/℃,1.025 ppm/℃和3.098 ppm/℃,输出功率的变化都在1‰以下.因此,光源在常温下具有较好的稳定性.

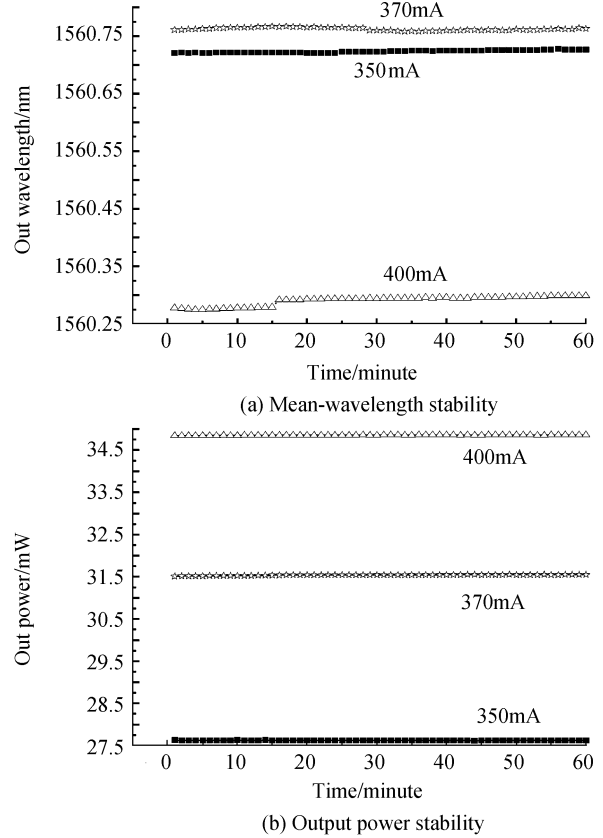


图7 不同泵浦驱动电流下,光源的常温测试结果
Fig. 7 Test results for different LD drive current under room temperature

全温(-40℃~60℃)测试时,将光纤和部分光学器件波分复用器、反射镜、隔离器、耦合器放入温控箱内,LD及驱动器置于温控箱外,温控箱从-40℃~60℃之间设6个温度点,每20℃一个点,每个温度点稳定30 min后进行一次数据采集.图7给出了光源的平均波长和输出功率随温度的变化情况,图8(a)中,在三种泵浦驱动电流下,光源的平均波长在0℃~20℃之间最大,温度降低或升高,平均波长均向短波方向漂移;泵浦驱动电流350 mA、370 mA和400 mA时,光源平均波长全温变化分别为94.526 ppm、71.128 ppm和66.651 ppm.图8(b)给出光源输出功率的全温变化曲线,总体趋势随温度的增加而减小,输出平均功率分别为

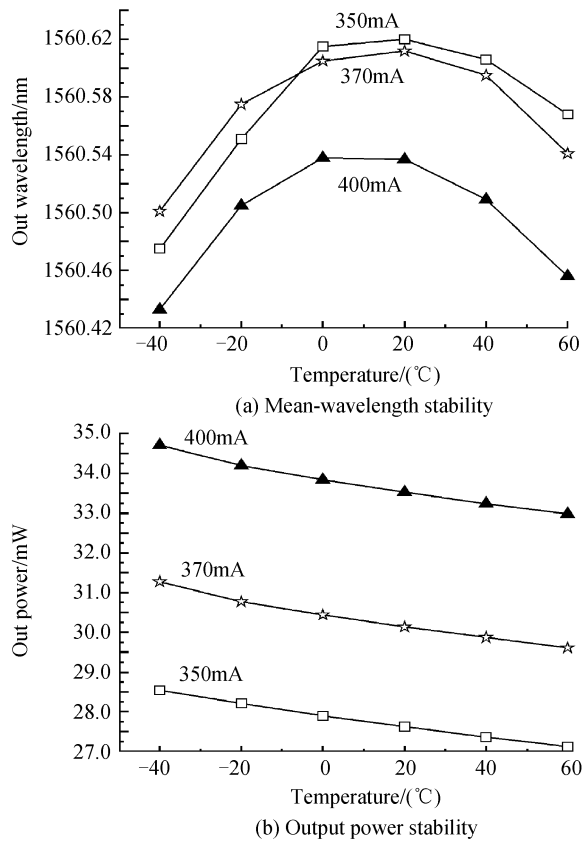


图8 不同泵浦驱动电流下,光源的全温测试结果
Fig. 8 Test results for different LD drive current under temperature

27 mW、30 mW、34 mW,全温稳定性均小于5%。

5 结论

本文对双程前向近高斯型掺铒光纤光源进行了实验研究,分析了高斯型光谱的自相干函数和光源平均波长稳定性受环境温度的影响因素.通过对光源整体的优化,最终获得优化的铒纤长度为10.05 m、泵浦驱动电流400 mA(对应LD输出功率172 mW)双程前向近高斯型掺铒光纤光源.同时测量得到除LD外的整体光路的平均波长全温稳定性达到66.651 ppm,输出功率34 mW、谱宽12.79 nm.

在接下来的工作中,我们还可以对铒纤的长度、泵浦驱动电流进行更细致的优化;也可以在光路上尝试其它的结构进行实验,希望能找到平均波长更加稳定的高斯型掺铒光纤光源.

参考文献

[1] JIA Zhen-an, YANG He-qian, QIAO Xue-guang, *et al.* Research state and application of the Er^{3+} doped optic fiber source[J]. *Optical Communication Technology*, 2006, **30**(12): 7-9.

贾振安,杨和钱,乔学光,等.掺铒光纤光源的研究现状与应用[J]. *光通信技术*, 2006, **30**(12): 7-9.

[2] LIANG Yan-mei, ZHOU Da-chuan, MENG Fan-yong, *et al.* A new broadband fiber light source for optical coherence tomography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(6): 3246-3250.

梁艳梅,周大川,孟凡勇,等.一种新型的专用于光学相干层析系统的宽带光纤光源[J]. *物理学报*, 2007, **56**(6): 3246-3250.

[3] BOLSHTYANSKY M, WYSOCKI P, CONTI N. Model of temperature dependence for gain shape of Erbium-doped fiber amplifier[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(11): 1553-1540.

[4] BERKDEMIR C, ÖZSOY S. An investigation on the temperature dependence of the relative population inversion and the gain in EDFAs by the modified rate equations[J]. *Optics Communications*, 2005, **254**(4-6): 248-255.

[5] CHEN Sheng-ping, LU Ke-cheng, LI Yi-gang, *et al.* Experimental research on Erbium-doped superfluorescent fiber source[J]. *Semiconductor Photonics and Technology*, 2004, **10**(2): 122-126.

[6] 曹毓. 宽带光源光谱特性对光纤陀螺性能影响和分析[D]. 北京:国防科学技术大学硕士学位论文, 2006:16-20.

[7] 张春熹,李彦,李立京,等.一种功率可调的近高光谱掺铒超荧光光纤光源:中国,200810103511.0[P]. 2008-09-24.

[8] ZHAO Cheng-juan, YANG Yuan-hong, ZHANG Chun-xi. Simulation research for coherence characteristics of broad-band sources[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2005, **22**(2): 268-272.

赵承娟,杨远洪,张春熹.宽谱光源光谱相干度的仿真研究[J]. *光谱实验室*, 2005, **22**(2): 268-272.

[9] LEFEVRE H C. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才,王巍,译.北京:国防工业出版社, 2002: 206-218.

[10] OU Pan, CAO Bin, ZHANG Chun-xi, *et al.* Analysis of mean-wavelength stability of Er-doped super fluorescent Fiber sources[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(5): 26-31.

欧攀,曹彬,张春熹,等.超辐射掺铒光纤光源平均波长稳定性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(5): 26-31.

[11] LÜ Xiao-qin, GAO Feng, JIA Lu-ning, *et al.* Experimental study on the dependence of DPB SFS' performance on Er-doped fiber length[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1032-1035.

闫晓琴,高峰,贾鲁宁,等.铒纤长度对掺铒光源性能影响的实验研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 1032-1035.

[12] 孙良勇.宽带掺铒光纤超荧光光源的研究[D].天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士学位论文, 2006:41-45.

[13] WU Xu, LIU Cheng-xiang, ZHANG Li, *et al.* Experimental investigation on Erbium-doped fiber source in double-pass forward configuration [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, **18**(1): 106-110.

吴旭,刘承香,张力,等.双程前向结构掺铒光纤光源稳定性的实验研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2010, **18**(1): 106-110.

Experimental Investigation on Near Gaussian-shaped Spectrum Erbium-Doped Fiber Super-flourescent Source in Double-pass Forward Configuration

YE Wei-wei^{1,2}, FANG Hong¹, LIU Cheng-xiang², WU Xu², RUAN Shuang-chen², ZHANG Li³

(1 *Department of Mathematics and Physics, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China*)

(2 *Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

(3 *College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

Abstract: The on near Gaussian-shaped spectrum Erbium-doped fiber super-flourescent source was studied. The self-coherence function of Gaussian-shaped spectrum and the change of mean wavelength under different temperatures were theoretically analyzed. Using the double-pass forward configuration, the Gaussian-shaped spectrum was obtained with certain Erbium-doped fiber length. Meanwhile, pump powers could be adjusted to optimize the intrinsic thermal coefficient of Erbium-doped fiber. Finally, under the condition with erbium-doped fiber length of 10.05 m, LD power of 172 mW, the whole optical path (except pumping LD and the driving) in the environmental temperature from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, the near Gaussian-shaped spectrum Erbium-doped fiber source with 66.651 ppm mean wavelength stability was obtained.

Key words: Erbium-doped fiber super-flourescent source; Near Gaussian-shaped spectrum; Double-pass forward; Self-coherence function; Mean-wavelength stability