

文章编号 1004-924X(2013)05-1110-06

超低噪声单频可调谐光纤激光器

陈月娥^{1,2*}, 王 勇²

(1. 燕山大学 理学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 浙江嘉莱光子技术有限公司, 浙江 宁波 315336)

摘要:研制了一款超低噪声单频可调谐高抗振激光器,介绍了它的工作原理和设计方案。该激光器工作波长为 1 550 nm,主要由单频激光谐振腔、保偏光纤放大器以及监控反馈光路组成。采用了精密稳定的闭环温控技术,使得激光器的工作温度极其稳定,温度控制分辨率达 0.001 °C。使用了鉴频部件及配套闭环系统锁定激光器的输出频率和功率,由此不仅保证了波长和功率的稳定性能,而且大大降低了激光器的低频噪声,同时制备的激光器光学膜也有效地提高了激光损伤阈值。与同类激光器的性能相比,设计的光纤激光器可保证功率稳定性优于 1%,相对强度噪声优于 -130 dBc/Hz;选择不同类型的种子光源谐振腔,激光器的线宽可控制在 1~400 kHz。另外,激光器的最大波长调谐范围为 3 nm,输出功率可达 1 W。在频率为 1 Hz 时,其相位噪声低于 $10 \mu\text{rad} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}/\text{m OPD}$;抗振动能力可达到 0.1g(g 为重力加速度)。

关键词:保偏光纤激光器;可调谐激光器;低噪声;抗振;单频

中图分类号: TN248.1; TN242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1110

Ultralow-noise tunable single-frequency fiber lasers

CHEN Yue-e^{1,2*}, WANG Yong²

(1. College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. CanaLaser Technologies Co., Ltd., Ningbo 315336, China)
* Corresponding author, E-mail: chen Yue-e2001@yahoo.com.cn

Abstract: A tunable single frequency laser with ultralow-noise and high vibration resistance is developed, and its working principle and structure design are introduced. The laser worked at 1 550 nm is consisted of a single frequency laser resonant cavity, a polarization containing optical fiber amplifier and a monitoring feedback optical path. By using a closed-loop temperature control technology, the laser shows a higher precision and stability, and its extremely temperature control resolution is up to 0.001 °C. Using frequency components and a matched closed-loop system, the locked output frequency and power of the laser are implemented. The closed loop system not only gives the stability of wavelength and power, but also greatly reduces the low frequency noise of the laser system and effectively improves the laser damage threshold. As a result, the fiber laser can provide the long-term power stability better than 1% and the relative intensity noise better than -130 dBc/Hz. By selecting different types of seed light source cavities, the laser line-width can be controlled in the 1—400 kHz. Furthermore, the output power of fiber laser is 1 W and tunable wavelength is 3 nm. At 1 Hz, the phase noise is less than $10 \mu\text{rad} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}/\text{m OPD}$; anti-vibration capability can reach 0.1g (g is gravity acceleration).

收稿日期:2012-10-28;修订日期:2012-12-24.

基金项目:浙江省博士后基金资助项目(No. Bsh1202006)

$\mu\text{rad} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}/\text{m}$ OPD and the shock resistance ability is $0.1g$ (g for the acceleration of gravity).

Key words: polarization maintaining fiber laser; tunable fiber laser; ultralow noise; high vibration resistance; single frequency

1 引言

光纤激光器是光纤通信中最具前途的一种光源。其中,单频光纤激光器在过去的20年中得到了长足发展,并在分布式传感、相干光通信、雷达等领域有着广泛的应用^[1-2]。在获得单频光纤激光输出的众多方法中,分布布拉格反射方法是较为常用的一种,由该方法获得的单频光纤激光器具有窄线宽、频率可调、相干长度长以及噪声低等性能。

阵列式及分布式的光纤传感技术通常可以满足各种民用监测的需求,故在桥梁、建筑物、公路和石油化工等领域得到了广泛的应用^[3]。使用该技术可制作出专门针对超远距离、超高精度和超高敏感度应用市场的窄线宽单频光纤激光器,再利用微波雷达上的连续波调频(Frequency Modulation Continuous Wave, FMCW)技术可对超远距离目标进行高精度的相干探测^[4-5],从而改变市场对光纤传感、激光雷达和激光测距等的固有观念。利用光纤本身直接传感可以构建低成本的分分布式传感网络,具有巨大的经济效益和现实意义。

目前,国际上有多家公司正在开发此类面向分布式传感,低噪声的单频激光器。经过十多年的努力,已开发出了多种形式的低噪声激光器,但这些激光器仍未完全达到应用系统对激光器噪声、抗振性、波长调谐范围的要求。在国际市场上,所有商用单频激光器在低频段都存在高噪声问题,例如在1 Hz频率,其相位噪声大多超过 $50 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}/\text{m}$ OPD,而1~100 Hz是声波探测的最重要的频率段^[6]。用户切换通道时,希望激光器波长调谐范围宽、波长转换时间短,而多数窄线宽单频激光器无法达到满意的调谐范围或调谐速度(波长调谐范围多数小于0.2 nm)。

基于单频光纤激光器巨大市场的需求,在目前主流产品在噪声、抗振性、波长调谐范围方面均不能满足用户需求的背景下,本文自主研发了一

款中心波长为1 550 nm的超低噪声单频可调谐高抗振保偏光纤激光器。

2 激光器的设计

2.1 激光器原理与结构

如图1所示,单频噪声可调谐光纤激光器(Tunable Single Frequency Fiber Laser, TSF-FL)主要由单频激光谐振腔和保偏光纤放大器以及监控反馈光路组成。激光谐振腔输出的信号光按一定比例进入到反馈光路中。反馈光路有两条

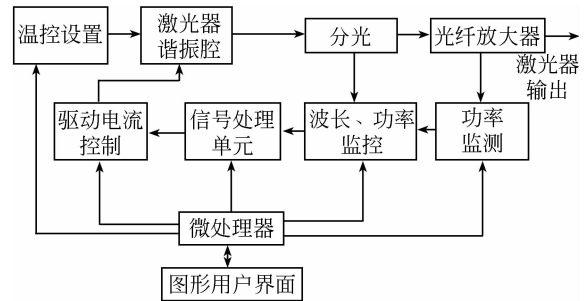


图1 激光器总体设计图

Fig.1 Schematic diagram of TSF-FL

支路,一路检测光功率,另一路检测光波长(频率)。利用光电探测器测量功率,鉴频器检测波长(频率),主要是一个法布里-珀罗标准具。利用反馈光路以及相应的电路,通过反馈控制使激光器的出光功率和波长处于稳定状态。功率反馈回路同时作用于激光谐振腔和光纤放大器,以保证激光器输出光的功率稳定。整个光路中采用的是单模保偏光纤,单频光纤激光器的输出既是单纵模又是单横模。通过控制谐振腔温度,激光器输出波长的可调谐范围最大为3 nm。为了保证输出波长、功率稳定,噪声超低的激光,本文采用了精密稳定的闭环温控技术,使得激光器的工作温度极其稳定,温度控制分辨率达 $0.001 \text{ } ^\circ\text{C}$;使用了鉴频部件及配套闭环系统实现激光的输出频率和功率锁定。该闭环系统既保证了波长和功率的稳定输出,也大大降低了激光器的低频噪声水平,同时

制备的激光器光学膜还有效地提高了激光损伤阈值^[7]。

通常来说,获得单频激光器的方案主要有环形腔,短腔法,腔内插入选模元件,扭转模,预激光,种子注入等。TSFLL 主要采用种子注入再放大的方式,而种子光采用光栅反馈及外腔耦合的方式保证单频输出。

3 激光器的性能测试和结果

3.1 性能测试

3.1.1 相位噪声测试

相位噪声(或频率噪声)测量采用间接测量的方式,通过高稳定性的光纤干涉仪将波长(或频率)漂移转化为强度变化。如图 2 所示,激光信号经过光隔离器,光衰减器后进入到 10 m 光程差的迈克尔逊光纤干涉仪,干涉仪的输出信号经过光隔离器后输入到光电探测器中,光电探测器将光信号转换成电信号,使用示波器及动态信号分析仪测量干涉信号。测量相位噪声时,从动态信号分析仪上读取噪声值,通过换算获得频率噪声或相位噪声。

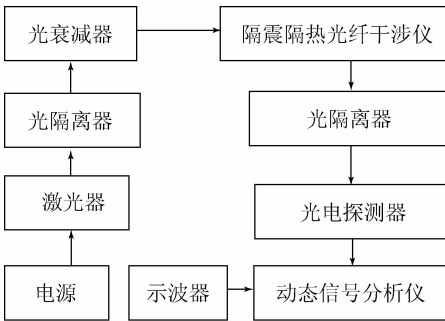


图 2 相位噪声测试系统

Fig. 2 Testing system for phase noise

3.1.2 相对强度噪声测量

激光器的相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)测量是通过探测器直接测量光功率及其功率谱密度来实现的。如图 3 所示,输出激光经过光隔离器、光衰减器后输入到光电探测器中,光电探测器将光信号转换成电信号,使用动态信号分析仪测量激光的相对强度噪声,从频谱分析仪上读取噪声值,再通过转换获得相对强度噪声值。

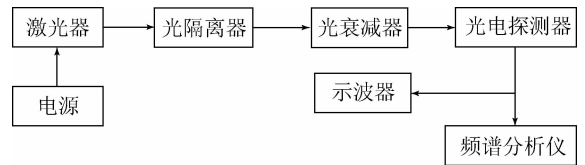


图 3 相对强度噪声测试系统

Fig. 3 Testing system for relative intensity noise

3.1.3 线宽测量

线宽测量采用延时自外差零拍法。激光信号经过光隔离器和光衰减器后输入到由 2×2 的 3 dB 光纤耦合器、42 km 延时光纤和两个反射镜组成的迈克尔逊光纤干涉仪,通过干涉仪形成的干涉信号输入到光电探测器中。干涉信号经光电探测器后,接入频谱仪读取频谱密度分布。从测得的谱密度分布曲线,可以得到激光线宽的信息。不同延时光纤长度的测量结果如图 5 所示,其中 τ 为光纤延迟时间, τ_c 为被测激光的相干长度。可见,当延时光纤长度与被测激光器的相干长度接近时(τ 与 τ_c 接近),功率谱密度显著提升,线宽测量的精度较高,由此认为此延时光纤可以用来测量相应的激光线宽。根据计算可知,使用 42 km 长光纤可以测量的 Lorentzian 型线宽达到 5 kHz 以下。如需要测量线宽更窄的激光器,则需要用更长的延时光纤。

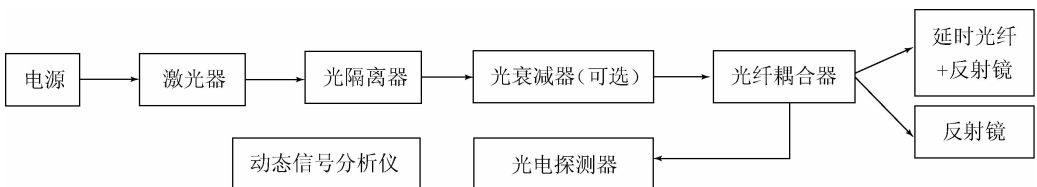


图 4 线宽测试系统

Fig. 4 Linewidth measuring system

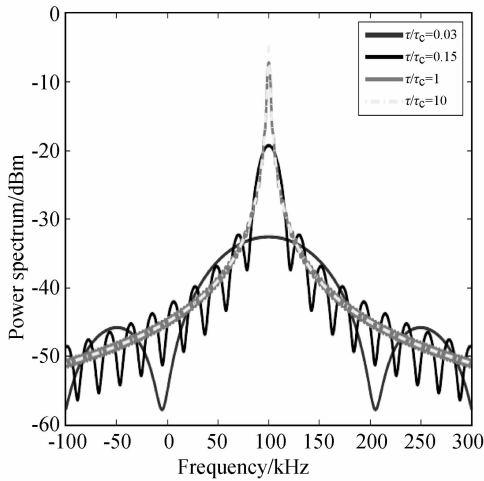


图 5 不同 τ/τ_c 时的功率谱

Fig. 5 Power interferometric spectra with different τ/τ_c

3.2 测试结果

基于前文所述的测试方法, 本文对激光器的相位噪声、相对强度噪声以及线宽进行了测量。

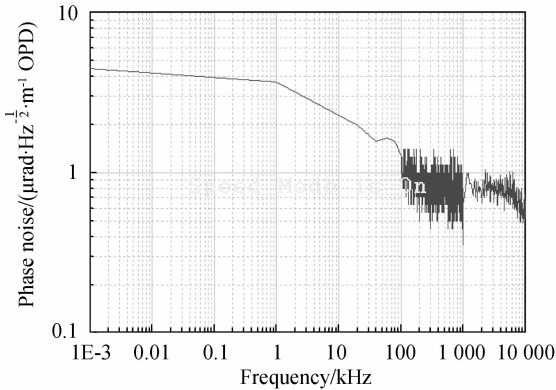


图 6 激光器的相位噪声

Fig. 6 Phase noise of TSFFL

如图 6 所示, 激光器的相位噪声随频率的增长呈下降的趋势。因此, 低频段的相位噪声就成为衡量一个激光器性能好坏的重要指标。从图 6 可以看到, 在 1 MHz 以上频段激光器的相位噪声小于 $1 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{m OPD}$; 在 100 kHz~1 MHz, 相位噪声接近 $1 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{m OPD}$, 而在 100 kHz 以内, 特别是在 1 Hz 附近相位噪声小于 $5 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{m OPD}$ 。与目前国际上流行的商用单频激光器相比, TSFFL 的相位噪声在低频段具有绝对的优势。

种子光源的 RIN 的测试结果如图 7 所示。在

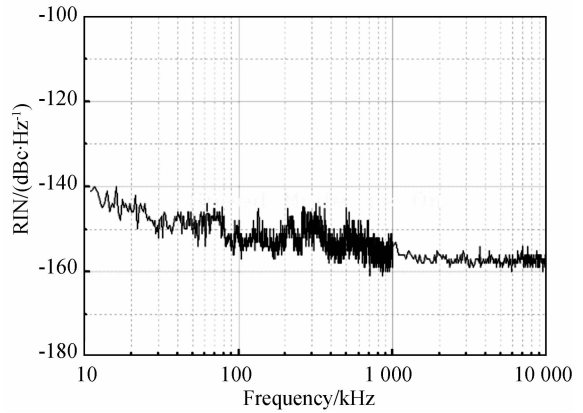


图 7 激光器的相对强度噪声

Fig. 7 Relative intensity noise of laser

整个测试频率范围内(直到 10 MHz), RIN 均小于 $-140 \text{ dBc}/\text{Hz}$, 在 1 MHz 以后 $\text{RIN} < -155 \text{ dBc}/\text{Hz}$ 。加入放大器后, RIN 会有一些的恶化(4~5 dB), 因为 RIN 反映的是激光器输出功率的稳定性。以上这些指标说明, TSFFL 可以满足绝大多数精密测量对激光器功率稳定性的要求。

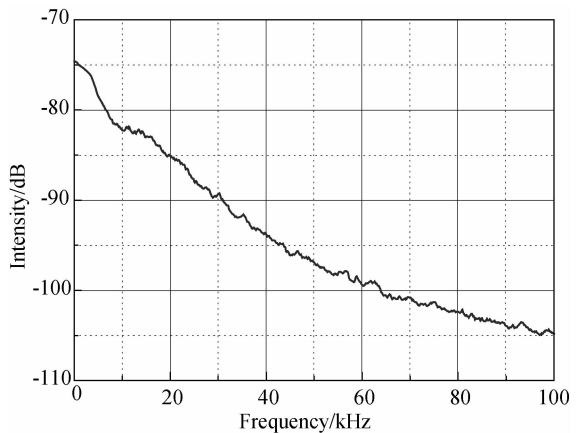


图 8 激光器线宽的测量曲线

Fig. 8 Measurement of laser linewidth

图 8 给出了一个典型的激光器线宽测量结果。从曲线下降 3 dB 点可读出频率为 4 kHz, 再从曲线下降 20 dB 处, 可读出频率为 42 kHz。由此估计, 激光器的线宽近似为 4 kHz。

相位噪声或频率噪声反映的是激光器频率(波长)的稳定性。尽管图 2 中的光纤干涉仪经过了隔振和隔热处理, 但仍难对超低频($< 1 \text{ Hz}$)的频率噪声或频率稳定性进行测量。因此, 本文采用拍频直接测量激光器的频率波动。测量激光器频率漂移 1 h 后, 其测量结果如图 9 所示。与国际上流行

的商用激光器比较可以看到,TSFFL 在 1 h 内的频漂小于 1.5 MHz,而作为对比的激光器的频漂大约是 TSFFL 的 9 倍。因而,TSFFL 展现了极好的频率(波长)稳定性。

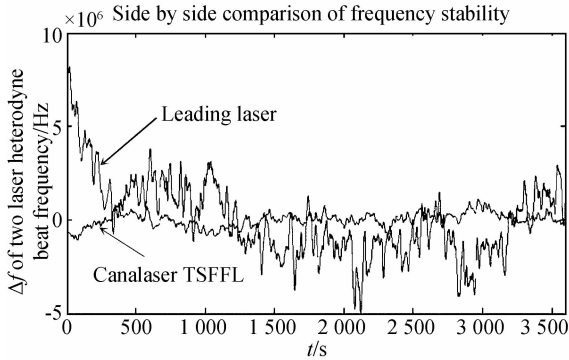


图 9 激光器的频率漂移

Fig. 9 Test for laser frequency stability

打开激光器电源,将激光器波长锁定在对应的 ITU 通道,波长控制误差不超过 ± 1.0 pm,波长调谐范围最大为 3 nm。图 10 为 TSFFL 的典型输出光谱图,由图可见其信噪比优于 60 dB。

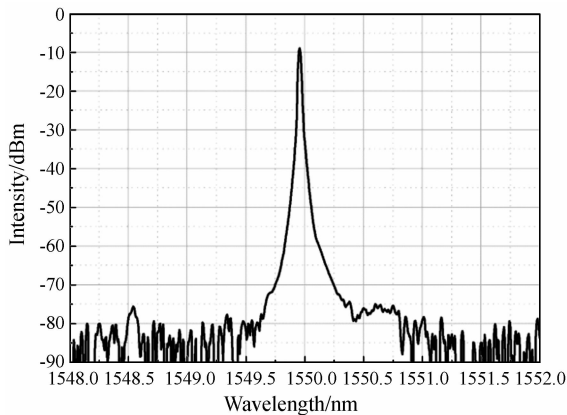


图 10 典型的激光器输出光谱

Fig. 10 Typical optical spectrum of TSFFL

除了噪声特性,激光器的抗振动性能也是一个重要的指标。这是因为外界环境所引起的机械振动会造成激光器的频率变化,进而形成频率噪声。除非是在实验室条件下有很好的隔振、恒温措施,多数实际使用的低噪声激光器都对振动环境有要求。测试结果显示,TSFFL 的抗振动能力已达到 0.1g,而国际市场上的绝大多数商业低噪声单频激光器产品目前都未能达到这一指标。这为低噪声激光器在野外恶劣条件下的使用提供了可能,尤

其是在车载、船载和机载情况下的使用。

TSFFL 的综合性能指标如表 1 所示。通过选择不同类型的种子光源谐振腔,激光器的线宽可以控制在 1~400 kHz,而光纤激光器的输出功率则由保偏掺铒光纤放大器来调节,最大为 1 W。光纤放大器的使用,使得激光器最后输出的强度噪声要高于直接从种子光源谐振腔输出光的噪声。对于三能级的掺铒光纤放大器,其输出光的强度噪声理论上至少要比输入光恶化 3 dB,而实际上通常要恶化 4~5 dB;但即使如此,TSFFL 仍可保证功率稳定性优于 1%,相对强度噪声优于 -130 dBc/Hz,而且这些指标均可在 0~50 °C 环境下得到保证。

表 1 激光器性能参数表

Tab. 1 Specifications of TSFFL

参数	性能
线宽 Δf /kHz	1~400
功率 P_{out} /mW	2~1 000
功率稳定性 ($\Delta P/P_{out}$)/%	≤ 1
波长稳定性 $\Delta \lambda$ /pm	± 1
中心波长调谐范围 $\Delta \lambda_c$ /nm	0~3
相位噪声 PhN/($\mu\text{rad} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{m}^{-1}$) OPD	$< 10 @ 1 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$
相对强度噪声 RIN/dBc $\cdot \text{Hz}^{-1}$	$< -130 @ 1 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$
功耗 PC/W	< 2
中心频率快速调制 FFM/Hz (复重频率)	$\leq 1 \text{ GHz}$ (幅度) $10 \sim 10^5$
工作温度 t_w /°C	0~50
工作电压 P_s /V	110~240 AC (50~60 Hz)

4 结 论

本文介绍了自主研发的中心波长在 1 550 nm 的低噪声单频可调谐高抗振保偏光纤激光器(TSF-FL)。在 1 Hz~10 MHz 频率下,该激光器相位噪声均低于 $10 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{m}$ OPD,抗振能力达到

0.1g(g 为重力加速度),波长调谐范围最大为3 nm,保偏光纤的最大输出功率为1 W。此类激光器特别适合于石油勘探、安防、管道监控、激光雷达和相干光通信等领域的应用。

参考文献:

- [1] FEI Y G, QING Y, ZHENG Q P. 100 mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(2):149-152.
- [2] SUN G Y, MOOM D S, CHUNG Y J. High birefringence fiber ring resonator with an inline reflector for single-frequency fiber lasers [J]. *Optics Communications*, 2007, 280(1):157-160.
- [3] HENAULTA J M, QUIERTANTB M, DELEPINE-LESOILLEC S. Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37(1):916-923.
- [4] EGOROV S A, LIKHACHIEV I G, MAMAIEV A N, *et al.*. Signal recovering in fiber optic sensors based on nonlinear FMCW technique [J]. *Optics Communications*, 1994, 111(6):438-444.
- [5] BREGLIOA G, IRACEA A, CUSANO A, *et al.*. Chirped-pulsed frequency modulation (C-PPM) for fiber Bragg grating sensors multiplexing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, 12(1):71-86.
- [6] RAVISHANKARA S R, JONESB B E. Laser generated acoustic emission in water [J]. *NDT & E International*, 2007, 40(8): 602-608.
- [7] 梅禹珊,付秀华,杨永亮,等. 光纤激光器光学膜设计与制备 [J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 299-304.
- MEI Y SH, FU X H, YANG Y L, *et al.*. Design and preparation of optical films for fiber lasers [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 299-304. (in Chinese)

作者简介:



陈月娥(1978—),女,辽宁本溪人,博士后,副教授,2004年于辽宁师范大学获得硕士学位,2009年于燕山大学获得博士学位,现为浙江宁波杭州湾新区博士后,主要从事激光器的研发。E-mail: chen Yue'er2001@yahoo.com.cn



王勇(1970—),男,陕西西安人,博士,1998年于清华大学获得博士学位,主要从事激光器的研发。E-mail: ywang@canalaser.com

(版权所有 未经许可 不得转载)