

## 单频光纤激光器相位噪声的影响因素

宋昭远,姚桂彬,张磊磊,张雷,龙文

(辽宁石油化工大学理学院,辽宁抚顺 113001)

**摘要:**单频光纤激光器是光纤通信中最具前途的一种光源,在光纤传感、激光雷达和激光测距等方面具有重要的应用,而相位噪声是衡量其性能的关键指标之一。采用示波器和动态信号分析仪方法对单频光纤激光器的相位噪声进行测量。利用功率谱、积分谱对不同泵浦源功率、种子源功率和波长的光纤激光器的相位噪声进行定性分析,结果表明:泵浦功率越大,低频相位噪声所占比重越大;而对于不同种子源功率,相位噪声在测试频段的比例基本处于同一水平;对于测试的不同种子的波长,相位噪声高频段所占比例不同,其中种子波长为 1560.48 nm 比例最大。

**关键词:**相位噪声; 单频光纤激光器; 泵浦功率; 积分谱

中图分类号: TN248; TN253 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0305005

## Influence factors of phase noise of single frequency fiber laser

Song Zhaoyuan, Yao Guibin, Zhang Leilei, Zhang Lei, Long Wen

(College of Science, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

**Abstract:** Single frequency fiber laser is the most promising optical source in fibre optic communication, which plays an important role in fibre optic sensor, laser radar and laser range finder. Generally, the performance of the single frequency fiber laser was evaluated by the phase noise. The oscilloscope and dynamic signal analyzer method were adopted to design phase noise of single frequency fiber laser. Using power spectrum and the integral sources of different pump power, seed source power and wavelength of the fiber laser phase noise were analyzed qualitatively, the results show that, the greater pump power can get the low frequency phase noise. For the different seed source powers, phase noise is in the proportion of basic test frequency at the same level. For testing seeds of different wavelengths which is different proportions of high frequency phase noise, the biggest percentage of seed wavelength is 1560.48 nm.

**Key words:** phase noise; single frequency fiber laser; pump power; integral spectrum

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(21403101); 辽宁省自然科学基金(2013020151)

作者简介: 宋昭远(1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事特种光纤及稀土掺杂光电材料方面的研究。Email: zysong815@163.com

## 0 引言

单频光纤激光器作为光纤通信中最具前途的一种光源,具有窄线宽、频率可调、相干长度超长以及噪声超低等独特性能<sup>[1-3]</sup>。而窄线宽单频光纤激光器的出现使超远距离、超高精度和超高敏感度市场应用成为可能,例如石油勘探、军事国防、管道监控、激光雷达和海底通信等,借用微波雷达上的 FMCW (frequency modulated continuous wave) 技术可对超远距离的目标进行超高精度的相干探测<sup>[4-6]</sup>,从而会改变传统市场对光纤传感、激光雷达和激光测距等固有观念。单频光纤激光器扩大了光纤激光器的应用领域,并相应提高了竞争优势,具有重要的现实意义。文中主要考虑到光纤激光器的相位噪声是衡量激光器性能的关键指标之一,而引起光纤激光相位噪声的因素较多,如泵浦源功率不稳定、周围环境的机械振动等均会影响光纤激光相位噪声的随机变化<sup>[7]</sup>。参考文献[8-10]报道了强泵浦下,大功率(1, 10, 30, 260 W) 光纤激光器相位噪声的测量结果,并认为泵浦源功率的变化是引入相位噪声的主要原因。文中针对设计的功率为几十毫瓦量级的光纤激光器,采用实验的方法研究泵浦功率( $P_p$ )、种子源功率( $P_i$ )、种子源波长( $\lambda$ )等因素对相位噪声( $P_N$ )的影响,计算了不同  $P_p$ 、 $P_i$  和  $\lambda$  情况下,相位噪声的功率谱和积分谱并给出相应的定性分析,得到不同波长种子源相位噪声在高频段所占比例不同的结论。

## 1 实验

### 1.1 实验系统搭建

光纤激光器链路如图 1 所示,种子光源(Seed source)出射的单频激光经光隔离器(Isolator)进入波

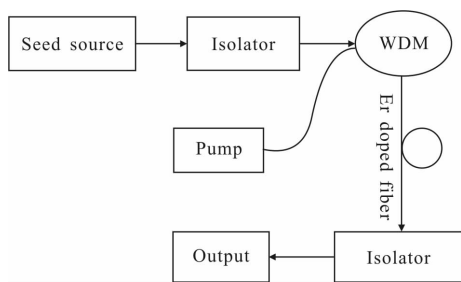


图 1 光纤激光器实验示意图

Fig.1 Fiber laser experimental schematic diagram

分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM), 泵浦采用前端泵浦方式,经 WDM 进入掺杂光纤,后经隔离器出射。

种子光源采用参考文献[1]中的自制的窄线宽单频激光器,泵浦源采用美国 Oclaro 公司的型号为 so940543.001 的 LD 激光器模块,中心波长为 974.11 nm,功率范围 100~400 mW。掺杂光纤为加拿大 Coractive 公司的型号为 ER35-7-PM 的 Er 掺杂石英基玻璃光纤,波长 1530 nm 处芯吸收为 30~40 dB/m,长度 7 m。需要说明的是,文中实验目的是研究不同泵浦功率、不同种子功率和不同波长等情况下,对相位噪声的定性关系,由于光纤长度非最优等因素的限制,光纤激光器的斜率效率偏低,最大输出功率为 1 W。采用光库公司的双极隔离器,隔离度 40 dB 以上,采用光库公司的带宽为 100 G 的 WDM。

### 1.2 相位噪声测试

相位噪声测量系统如图 2 所示。输出的激光信号经过光隔离器,光衰减器后进入到 10 m 光程差迈克尔逊光纤干涉仪,干涉仪输出端的拍频信号经过光隔离器(可选)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拍频电信号。测量相位噪声时,通过调节光衰减器使示波器显示的最高直流电压值为 40 mV,在示波器曲线位于 20 mV 时,从动态信号分析仪上读取噪声值。通过换算获得中心频率下的频率噪声或相位噪声。

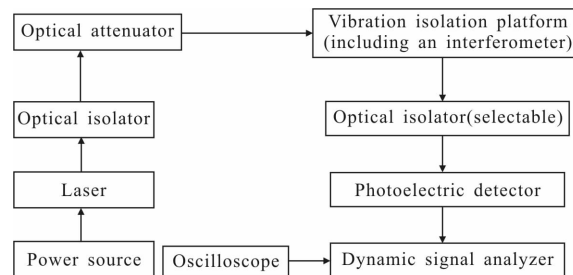


图 2 相位噪声测试系统示意图

Fig.2 Phase noise test system schematic diagram

## 2 结果和讨论

首先在室温下,种子波长  $\lambda$ , 输入功率  $P_i$ , 通过改变泵浦电流进而改变泵浦功率,测试其对相位噪声的影响。重复上述过程得到不同种子输入功率  $P_i$

情况下,对相位噪声的影响关系。然后改变波长  $\lambda$ , 再次重复上述实验, 测试种子波长对相位噪声的影响。功率谱和积分谱是比较常用的相位噪声分析方法<sup>[10-11]</sup>。用示波器和动态信号分析仪测量的相位噪声的功率谱密度后经变换得到相位噪声的功率谱  $s(w)$ , 积分谱(Integrated Phase Noise, IPN)可以表示为:

$$IPN = \left( \int_f^{f_{max}} s^2(w) dw \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中:  $s(w)$  表示相位噪声的功率谱;  $f_{max}$  为实验中所测得的最大相位噪声变化频率, 从积分谱图上可以直观的看出不同因素对相位噪声的影响频段。

### 2.1 不同泵浦功率对单频光纤激光器相位噪声的影响

选取三种不同泵浦功率(139.9、192.5、300 mW), 种子波长和功率分别为 1 550.38 nm、4 mW。在 1~100 kHz 范围内, 相位噪声功率谱和积分谱如图 3 所示, 从图中可以看出, 不同泵浦功率条件下, 由低频到高频相位噪声变化趋势基本相同。另外, 从积分谱

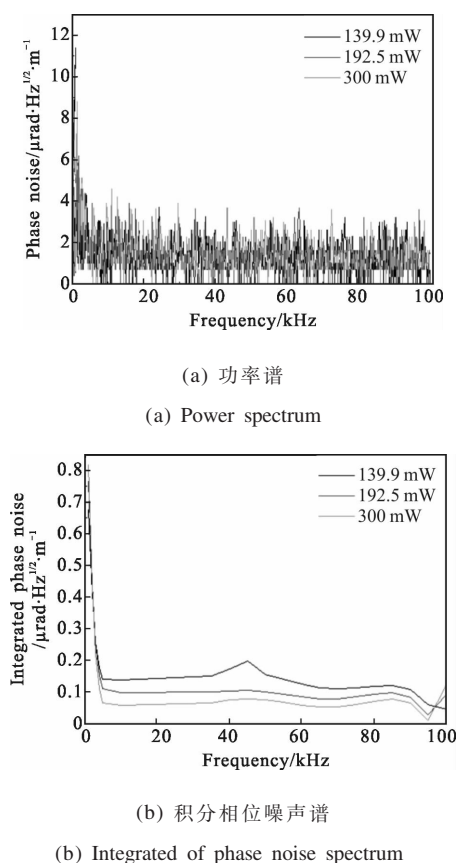


图 3 不同泵浦功率下相位噪声谱

Fig.3 Phase noise spectrum under different pumping power

可看出, 泵浦功率越大, 低频相位噪声所占比例有所增大。而对于单频光纤激光器, 低频相位噪声(10~

100 Hz) 尤为重要, 所以在光纤激光器输出功率满足要求的情况下, 尽可能使用较低的泵浦功率。

### 2.2 不同种子功率对单频光纤激光器相位噪声的影响

泵浦功率为 139.9 mW, 种子波长为 1 560.38 nm, 种子功率分别为 4、6、8 mW 情况下, 光纤激光器相位噪声功率谱和积分谱如图 4 所示, 由图可知, 在 10~80 kHz 范围内, 种子功率为 4 mW 时相位噪声包络较多。而由积分谱可看出, 在整个测试频段范围内, 相位噪声频率组份未发生显著变化, 说明在一定范围内, 种子功率对光纤激光器相位噪声影响较小。所以, 在单频光纤激光器设计时, 在一定程度上可以通过增大种子功率以提高激光器输出功率, 而相位噪声基本不变化。

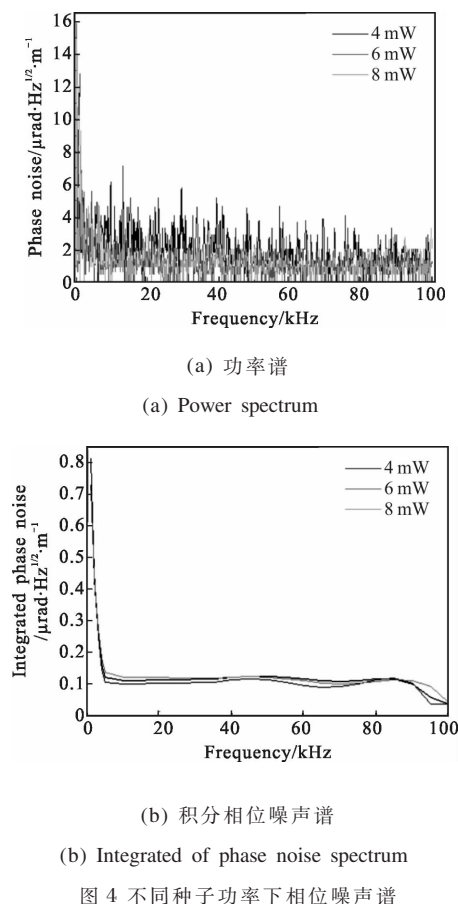


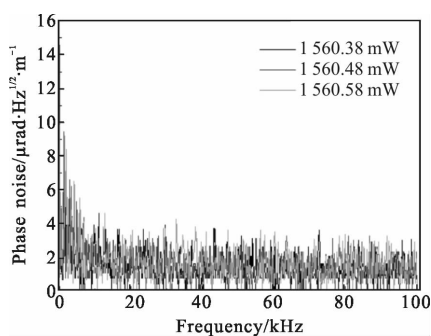
图 4 不同种子功率下相位噪声谱

Fig.4 Phase noise spectrum under the different seed powers

### 2.3 不同种子波长对单频光纤激光器相位噪声的影响

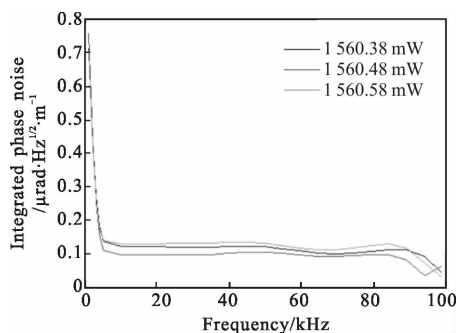
泵浦功率为 139.9 mW, 种子功率为 4 mW, 不同波长下单频光纤激光器相位噪声功率谱和积分谱如图 5 所示。由图中的功率谱可知, 在 0~100 kHz 范围内, 三个波长的相位噪声基本处于统一水平。而由

积分谱可看出,在整个测试频段范围内,三个种子波长相位噪声频率组份未发生显著变化。相比而言,1 560.48 nm 种子波长时相位噪声高频所占比重比其他两个波长要大一些,说明在一定范围内,种子波长对光纤激光器相位噪声影响较小。这说明设计的光纤激光器在一定的调谐范围内相位噪声可处于同一水平。



(a) 功率谱

(a) Power spectrum



(b) 积分相位噪声谱

(b) Integrated of phase noise spectrum

图 5 不同种子波长下相位噪声谱

Fig.5 Phase noise spectrum under different seed wavelengths

### 3 结论

文中搭建了窄线宽单频光纤激光器的光路系统以及相位噪声测试系统,采用示波器和动态信号分析仪对设计的窄线宽单频光纤激光器的相位噪声进行测量。在不同泵浦源功率(139.9、192.5、300 mW)、种子源功率(4、6、8 mW)和波长(1 560.38、1560.48、1560.58 nm)情况下,利用功率谱、积分谱对单频光纤激光器的相位噪声进行定性分析。结果表明:泵浦功率越大,低频相位噪声所占比重越大;而对于不同种子功率,相位噪声在测试高低频段的比重差异并不明显;对于测试的不同种子波长,相位噪声高频段所

占比不同,其中种子波长为 1 550.48 nm 的比例最大。这些结论为单频光纤激光器在具体应用上提供了重要的实验依据。

### 参考文献:

- [1] Chen Yue'e, Wang Yong. Ultralow-noise tunable single-frequency fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1110-1115. (in Chinese)
- [2] Shi Wei, Fu Shijie, Fang Qiang, et al. Single-frequency fiber laser based on rare-earth-doped silica fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1003001. (in Chinese)
- [3] Wang Feng, Bi Weihong, Fu Xinghu, et al. Dual-wavelength Er<sup>3+</sup>-doped photonic crystal fiber laser based on superimposed fiber gratings [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822001.
- [4] Lou Shuqin, Yuan Chujun, Wang Xin. Experiment study on all-fiberized tandem pump broadband superfluorescent fiber source based on single stage Yb-doped fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0802001. (in Chinese)
- [5] Dong Fanlong, Zhao Fangzhou, Ge Tingwu, et al. Optimization of beam quality for all-fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 844-849. (in Chinese)
- [6] Li L, Schuülzgen A, Temyanko V L, et al. Ultracompact cladding pumped 35 mm short fiber laser with 4.7 W single mode output power [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(16): 161106.
- [7] Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing, et al. Measurement of phase noise in strong pumped fiber amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1607-1610. (in Chinese)
- [8] Liang Y, Jin L, Cheng L, et al. Stabilization of microwave signal generated by a dual-polarization DBR fiber laser via optical feedback [J]. *Optics Express*, 2014, 29(5): 474-476.
- [9] Lao Yiqin, Yu Kuanglu, Cheng Linghao, et al. Beat frequency phase noise suppression of dual-polarization fiber laser based on external optical feedback[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2016, 43(6): 0601008. (in Chinese)
- [10] Xiao Rui, Hou Jing, Liu Ming, et al. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 2015-2022.
- [11] Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measures of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(5): 474-476.