

窄线宽光纤激光器及其在光纤传感中的应用

宋志强 祁海峰 王 晨 尚 盈 王 昌

山东省光纤传感技术重点实验室 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250014

摘要 简要介绍了窄线宽激光器技术的现状。针对国内市场对进口窄线宽光纤激光器的依赖,研制了具有自主知识产权的分布反馈光纤激光器样机,突破了有源相移光纤光栅制作技术、隔声隔振封装和有效的功率放大等技术问题,样机功率达到 35 mW,线宽小于 3 kHz,相对强度噪声低于 -115 dB/Hz,主要技术指标已基本接近 NKT 和 NP 等先进的国外产品。将样机应用于分布式光纤振动传感系统中,良好地实现了施加信号的解调,信噪比和稳定性完全满足应用要求,并且系统成本远低于进口产品。

关键词 激光器;窄线宽;分布反馈光纤激光器;隔声隔振;分布式光纤传感

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s214005

Narrow Line-Width Fiber Laser and Application in Sensing

Song Zhiqiang Qi Haifeng Wang Chen Shang Ying Wang Chang

Shandong Key Laboratory of Fiber Sensing, Laser Institute of Shandong Academy of Sciences,
Jinan, Shandong 250014, China

Abstract The current situation of narrow line-width lasers is briefly introduced. In view of the domestic market dependence on imports of lasers a homebred distributed feedback fiber laser with narrow line-width is realized by developing active phase-shifting fiber grating fabrication technology, solving the sound insulation and vibration isolation package technology, and designing a power amplification optical path of single pump. The prototype power is 35mW, linewidth is less than 3 kHz, relative intensity noise is less than -115 dB/Hz. The main technical indicators are close to advanced foreign products such as NKT and NP. The prototype is applied to the distributed optical fiber sensing system, it can realize good sensing signal demodulation, and the use system is much lower than imported products.

Key words lasers; narrow line-width; distributed feedback fiber laser; sound insulation and vibration insulation; distributed fiber sensor

OCIS codes 140.3490; 140.3510; 140.4480

1 引 言

窄线宽激光器具有极强的相干性和单色性,在激光雷达、相干探测、光纤传感和光谱学等领域都有着重要的应用。实现激光光谱窄线宽输出的方法有多种,如分布反馈(DFB)结构^[1]、短腔分布布拉格反射(DBR)结构^[2]和腔外滤波法^[3]等等,此外还有环形腔结构等更为复杂的方案,但基于上述结构的窄线宽激光器产品最为成熟并已占领市场,如丹麦 NKT Photonics、美国 NP Photonics 和美国 RIO 等公司的光纤激光器和半导体激光器产品。

目前,国内无论在科研还是工业中所采用的窄线宽激光器大多依赖进口产品,而随着相关技术领域的迅猛发展,尤其是光纤水听器、管道监测和周界安防等应用领域对窄线宽激光器的国产化提出了越来越迫切的需求,越来越多的机构已投入到此项研究^[4-6]。2004年,华南理工大学研发了一种高增益的磷酸盐玻璃光

收稿日期: 2015-01-07; 收到修改稿日期: 2015-02-15

基金项目: 山东省科技发展计划项目(2015GGC01024)

作者简介: 宋志强(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤光栅和光纤激光器方面的研究。

E-mail: szq821214@163.com

纤^[7],深圳飞米激光公司利用此技术开发了一系列短腔 DBR 光纤激光器,并获得了广泛应用。此外,多家单位也开展了 DFB 光纤激光器和环形腔光纤激光器的研究,但大都没有进行产品化开发和应用。

本文介绍了一种国产化窄线宽 DFB 光纤激光器及其在分布式光纤振动传感中的应用,采用自主研发的掺铒相移光纤光栅作为激光谐振腔,对其进行隔声隔振封装消除其灵敏的环境敏感性,通过合理的光路设计实现激光功率的优化,最终研制了性能指标与国外产品相当的窄线宽光源。经过在分布式光纤振动传感系统中与 NKT C15、NP Rock 等国外产品进行使用对比,自主研发的窄线宽光纤激光器可完全满足应用要求,替代进口产品。

2 分布反馈光纤激光器关键技术

同传统激光器一样,DFB 光纤激光器也由抽运源(LD)、谐振腔和增益光纤等构成,而用作实用化产品,还需要考虑控制电路、抗环境噪声封装和功率放大等功能模块。图 1 为激光器的结构方案,它由掺铒相移光纤光栅(Er-PS-FBG)作为窄线宽种子光源,由腔外铒纤(EDF)和剩余抽运光构成功率放大器,通过驱动控制电路和比例积分微分(PID)电路进行抽运驱动、温控(TEC)以及激光噪声的负反馈抑制,另外对 Er-PS-FBG 和整个光路进行了隔声隔振封装,以保持其环境稳定性。

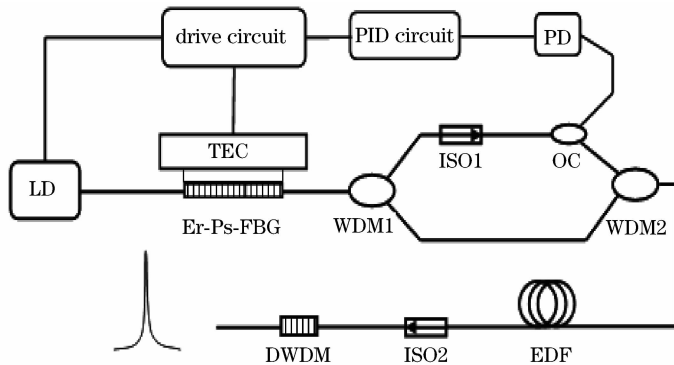


图 1 分布反馈光纤激光器结构

Fig.1 Structure of the DFB-FL module

2.1 有源相移光纤光栅

分布反馈光纤激光器采用刻写在有源光纤上的单一光栅作为增益介质和谐振腔,这使激光器结构极其简单,并且不会发生跳模的问题,但另一方面,这也要求有源光纤光栅具有极高的品质。相关的理论研究已经很多^[8-9],一般认为光栅因子 kl 在 10 左右的 $\lambda/4$ 相移光栅具有最低的抽运阈值和稳定的单纵模运转性能。

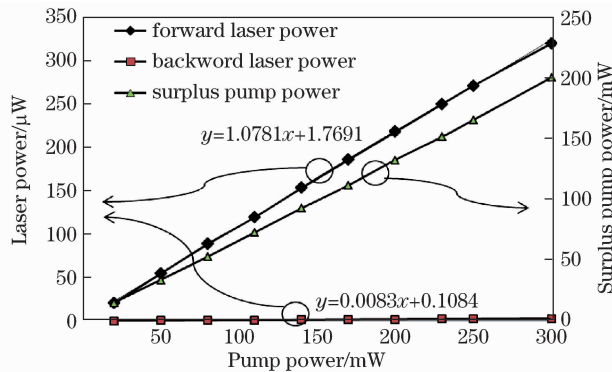


图 2 DFB-FL 功率曲线

Fig.2 Power curves of DFB-FL

采用动态相位掩模板法和扫描曝光法制作相移光纤光栅^[10],通过纳米精度的压电促动器控制相位掩模板的位置,能够精确地在光栅任意位置引入相移。一般所用 Er-PS-FBG 的铒纤长度为 45 mm,刻写其上的相移光栅长度为 42 mm,光栅因子 kl 在 10~12 之间,相移点将光栅分成 4:6 两部分,相移量基本为 π 。由此

构成的DFB-FL功率特性如图2所示,激光阈值很低,前后向功率输出比大于120:1,靠近相移点的前向输出端斜率效率大于1%,并且在激光器尾端有将近70%的抽运光剩余输出,这为激光功率的单抽运放大提供了可能。通过自行研制的零差法激光参数测量系统,测得DFB-FL洛伦兹线宽约2.3 kHz,相对强度噪声(RIN)低于-105dB/Hz。

2.2 输出功率放大

掺铒DFB-FL的效率和输出功率都很低,作为光源是远远不够的。尽管可以选择利用高增益的铒镱共掺光纤制作DFB-FL,但要同时满足高输出功率和窄线宽、低噪声的性能要求,光纤材料的获取是非常困难的。而受益于Er-PS-FBG较弱的抽运吸收效率,剩余的抽运光完全能够将窄线宽激光功率放大。经过不同光路结构的放大对比实验^[11],可认为如图1所示的同向抽运放大光路ASE噪声低、结构简单,更有利于整体光路的隔声隔振封装。另外,由于不同Er-PS-FBG的实际功率特性不同,这导致构成光放大器的种子光和抽运光功率都有所不同,因此需要对腔外铒纤的增益进行优化。

所构建的窄线宽光纤激光器所用976 nm抽运源功率为300 mW,腔外增益光纤掺杂离子数分数为 4000×10^{-6} ,长度为3.5 m,滤波后的窄线宽激光输出功率为35 mW,相比于单纯的DFB-FL,获得了20 dB的功率增益,而同时激光线宽和RIN相比于放大前并未明显劣化。窄线宽激光器样机的指标测量结果分别如图3所示。

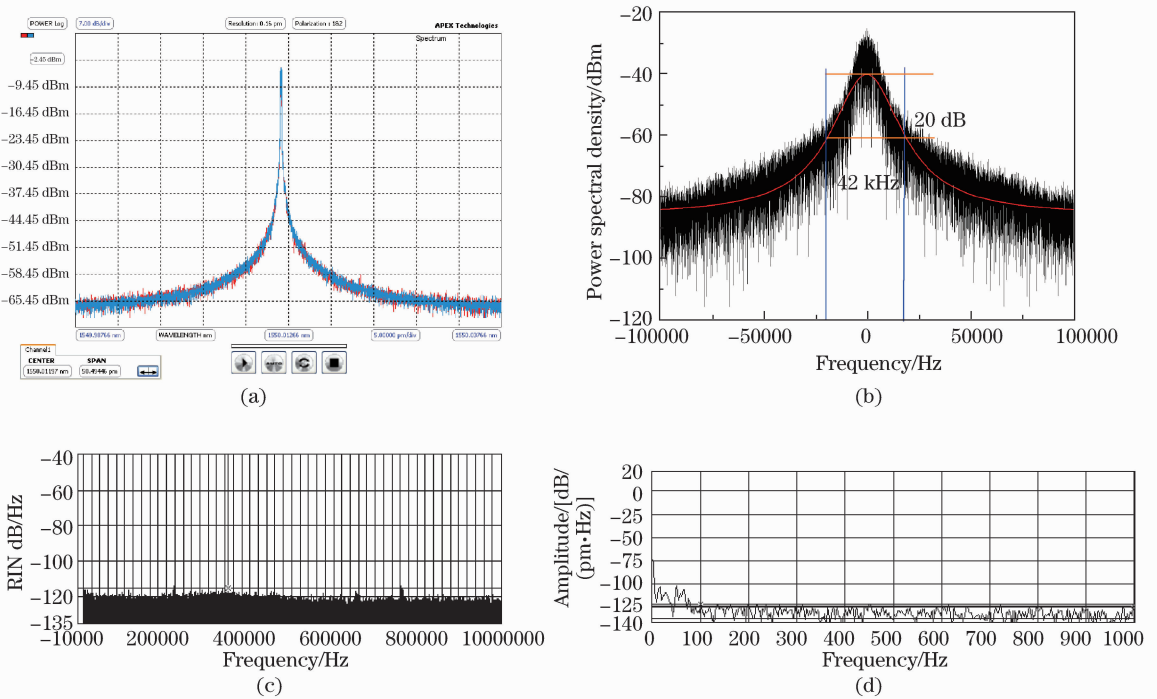


图3 窄线宽激光器参数图。(a)光谱;(b)洛伦兹线宽谱;(c)RIN谱;(d)相位噪声谱

Fig. 3 Parameters of narrow linewidth lasers. (a) Spectrum; (b) linewidth of Lorenz fitting; (c) RIN spectrum; (d) phase noise spectrum

2.3 隔声隔振封装

DFB-FL具有极强的声波和振动敏感特性,因此被广泛作为光纤激光水听器 and 地震检波器来应用,而用作激光光源时,这种特性会严重影响其稳定性和可靠性,因此必须进行隔声隔振的封装,使其保持窄线宽和低噪声性能。真空封装和吸声材料封装是一些可行的常规方法,但并不完全适宜于模块化的产品。研究中发现,当对Er-PS-FBG栅区进行一定程度的弯曲,并将其自然贴合在平整的物体表面时,DFB-FL对环境噪声的敏感性会明显的减弱^[12]。利用这个现象,将Er-PS-FBG密封在弯曲直径5cm的铜管中,通过导热硅脂贴附在TEC和热沉上,同时对所有器件的尾纤进行固定,实现了DFB-FL隔声隔振的效果。图4为样机与相同结构原理的NKT C15在不同强度噪声和振动影响下线宽展宽情况的对比,结果表明:85dB以下的噪声对两台激光器的线宽几乎没有影响,而95dB和105dB的噪声使得激光线宽都有所展宽;直接施加在激

光器壳体上的机械震动会使线宽都明显展宽,而通过桌体传递的间接震动对激光线宽则都没有明显影响。但就隔声隔振效果来讲,自行研制的窄线宽光源模块已略优于所比较的进口产品。

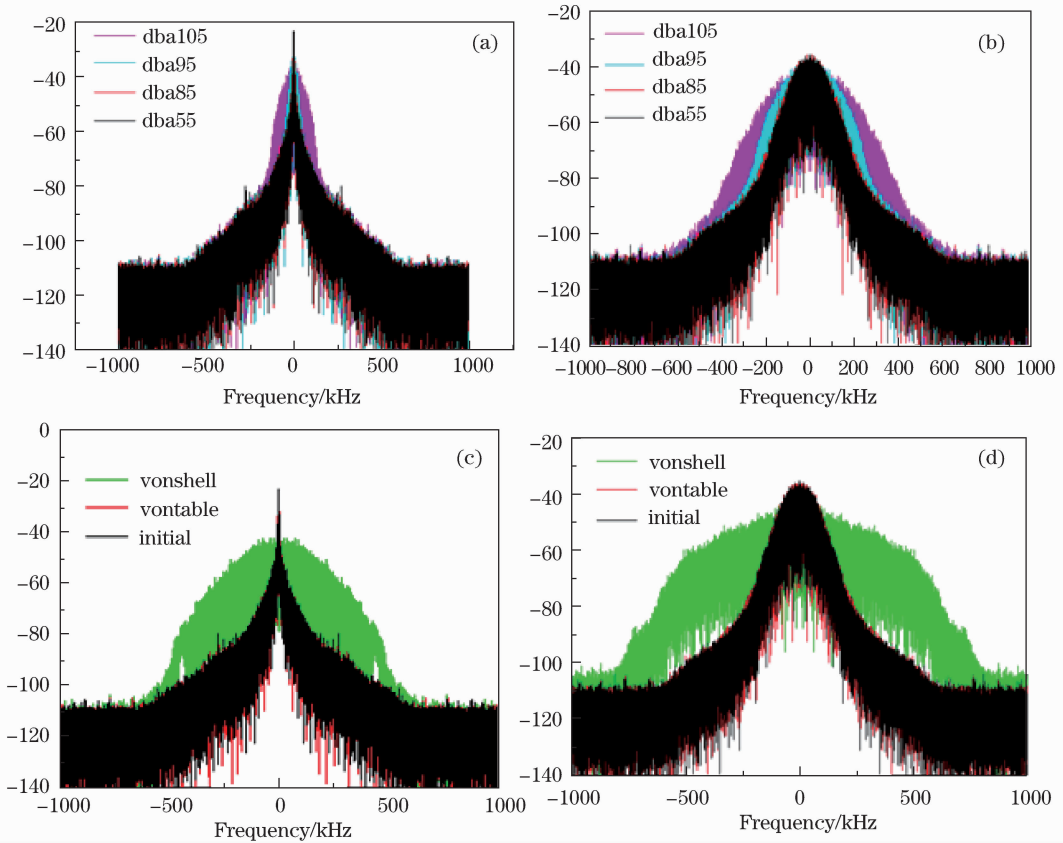


图 4 隔声隔振效果对比。(a)噪声对样机线宽的影响;(b)噪声对 NKT C15 线宽的影响;
(c)震动对样机线宽的影响;(d)震动对 NKT C15 线宽的影响

Fig. 4 Influence comparison of sound insulation and vibration isolation. (a)Sound effect on proto; (b)sound effect on NKT C15; (c)vibration effect on proto; (d)vibration effect on NKT C15

表 1 给出了窄线宽光纤激光器样机与同为 DFB 结构的 NKT C15 和 DBR 结构的 NP Rock 的几项关键参数的对比情况,所有数据均由相同的测量系统实际测得,可以看出,所研制的样机在指标水平上已接近国际先进产品的水平。

表 1 窄线宽激光器关键指标对比

Table 1 Parameters comparison of narrow linewidth lasers

	Power/mW	Linewidth/kHz	RIN@ROF/(dB/Hz)	Phase noise/[dB/(pm · Hz)]	Volume/mm ³
NP Rock	40	1.6	-105@420kHz	-115@1kHz	200×120×26
NKT C15	10	7.5	-115@450kHz	-105@1kHz	240×92×23
Proto	35	2.1	-115@370kHz	-125@1kHz	190×93×24

3 在分布式声波监测中的应用

目前,光纤传感技术正向更高精度、更大动态范围、更长传感距离和更强适用性的方向发展,分布式光纤传感技术获得了更多的研究和关注。其中,相位敏感型光时域反射技术(φ -OTDR)是一种分布式振动传感技术(DVS)可同时测量频率、相位、振幅和位置多个参数,在输油管道监测、周界安防和资源勘探等领域具有重大的应用价值^[13-14],图 5 为分布式声传感器(DAS)系统结构图。与其他分布式振动传感系统相比,DVS 系统要求光源具有足够窄的线宽和极小的频率漂移。

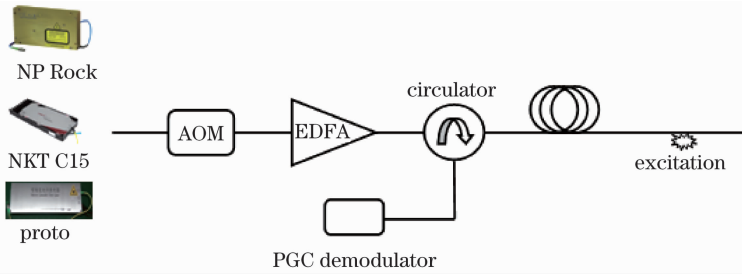


图 5 DAS 系统结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of the DAS system

在此,分别连接 NP Rock、NKT C15 和样机进行信号检测,在对传感光纤某点施加相同频率(600Hz)和幅度的振动扰动时,测试结果如图 6 所示。图 6(a)为光纤某点持续受扰动时,后向瑞利散射信号的相位变化,对其进行快速傅里叶变换(FFT)处理得到如图 6(b)所示的信号谱,三台光源的实验都良好的解调到 600Hz 的振动信号。这说明自行研制的窄线宽激光器产品可用于分布式光纤传感系统,比较而言,采用 NP Rock 和 NKT C15 得到信号的信噪比优于样机,可能是由于它们具有更高的频率稳定性,这也是样机需要进一步改进之处。

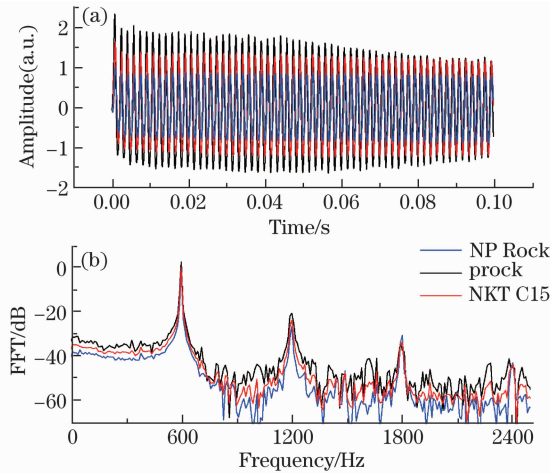


图 6 DVS 对比实验结果

Fig. 6 Results of DVS contrast experiment

4 结 论

在精确有源相移光纤光栅制作技术的基础上,对分布反馈光纤激光器进行了实用化研究。由于 DFB-FL 输出功率低,对环境扰动敏感性强,因此重点研究解决了单抽运功率放大和隔声隔振封装技术。与先进的进口产品相比,所研制样机的指标参数和环境稳定性已基本接近。在分布式声波传感系统中进行测试,用样机作为光源能够良好的检测到施加在光纤上的振动信号。

参 考 文 献

- 1 W H Loh, R I Laming. 1.55 μ m phase-shifted distributed feedback fiber laser [J]. Electronics Letters, 1995, 31(17):1440-1442.
- 2 Y O Barmenkov, D Zalvidea, T P Salvador. Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings [J]. Opt Express, 2006, 14(14):6394-6399.
- 3 D J Thompson, R E Scholten. Narrow linewidth tunable external cavity diode laser using wide bandwidth filter [J]. Rev Sci Instrum, 2012, 83(2):023107.
- 4 Xue Yiyuan, An Honglin, Fu Libin, *et al.*. Narrow-linewidth single-mode DBR fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(9):1251-1254.
薛亦元, 安宏林, 傅立斌, 等. 单频窄线宽分布布拉格反射光纤激光器研究[J]. 光学学报, 2000, 20(9):1251-1254.
- 5 Wang Hongjie, Weng Yujia, Hu Ye, *et al.*. Compact narrow-width distributed feedback fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(6):891-893.
王宏杰, 翁宇佳, 胡野, 等. 紧凑型窄线宽分布反馈光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(6):891-893.

- 6 Xue Lifang, 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.
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.
- 7 Xu Shiqiang, Yang Zhongmin, Wang Guonian, *et al.*. The upconversion luminescence of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped oxyfluorosilicate glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8):1103–1106.
徐时清, 杨中民, 汪国年, 等. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺杂氧氟硅酸盐玻璃的上转换发光[J]. *光学学报*, 2004, 24(8):1103–1106.
- 8 S W Lovseth, E Ronnekleiv. Fundamental and higher order mode thresholds of DFB fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(3):494–501.
- 9 D Sacastru, S Miclos, I Lancranjan. Theoretical analysis of the output noise of a DFB fiber laser sensor [J]. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 2010, 4(4):116–123.
- 10 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Ni Jiasheng, *et al.*. Comparison study on π phase-shifted FBG's fabrication methods [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1):s105002.
宋志强, 祁海峰, 倪家升, 等. π 相移光纤光栅制作方法的比较研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1):s105002.
- 11 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Guo Jian, *et al.*. Characteristics of self-amplified distributed feedback fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(2):0206005.
宋志强, 祁海峰, 郭 健, 等. 自放大结构分布反馈光纤激光器输出特性[J]. *光子学报*, 2014, 43(2):0206005.
- 12 J Guo, J Ni, H Qi, *et al.*. Measurement of acoustic noise induced linewidth broadening of unpackaged distributed feedback fiber laser [C]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 475:838–842.
- 13 C Wang, Y Shang, X Liu, *et al.*. Distributed acoustic mapping based on self-interferometry of phase-OTDR [C]. *Asia Communications and Photonics Conference 2014*:213–215.
- 14 Y Lu, T Zhu, L Chen, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22):3243–3249.

栏目编辑: 苏 岑