

doi: 10.3788/gzxb20174608.0814003

# 1064 nm 超短腔 DBR 单频掺镱硅酸盐光纤激光器

黄金<sup>1,2</sup>, 孙博<sup>1,2</sup>, 贾静<sup>1,2</sup>, 张学强<sup>1,2</sup>, 白晋涛<sup>1,2</sup>

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710069)

(2 西北大学 陕西省光电子技术重点实验室, 西安 710069)

**摘 要:**提出了一种基于高掺杂硅酸盐增益光纤、输出波长为 1 064 nm 的超短腔单频光纤激光器. 该单频光纤激光器采用分布布拉格反射式腔型结构, 有效腔长为 2 cm, 其增益介质为 1.1 cm 长的高浓度掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤. 通过恰当的温度控制, 获得了线宽为 4.8 kHz 的稳定单频激光输出. 当注入泵浦光为 378 mW 时, 输出功率为 13 mW, 斜效率为 3.4%. 在频率大于 1 MHz 时, 测得该光纤激光器的相对噪声强度值约为 -132 dB/Hz. 采用主振荡功率放大结构, 对该单频光纤激光器的输出功率进行放大. 当放大增益光纤长度选取为 56 cm 时, 得到了 325 mW 的最大输出功率, 其斜效率为 52.8%.

**关键词:** 光纤激光器; 单频; 分布布拉格反射式; 掺镱硅酸盐光纤; 超短腔; 主振荡功率放大

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0814003-6

## 1064 nm Ultrashort Cavity Single-frequency Distributed Bragg Reflector Yb-doped Silica Fiber Laser

HUANG Jin<sup>1,2</sup>, SUN Bo<sup>1,2</sup>, JIA Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xue-qiang<sup>1,2</sup>, BAI Jin-tao<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Photonics and Photon-technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

(2 Key Laboratory of Opto-electronic Technology of Shaanxi Province, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** An ultrashort cavity single-frequency Distributed Bragg Reflector (DBR) laser operating at 1064 nm was proposed with a cavity length of 2 cm, and the gain medium is a 1.1 cm long highly Yb-doped silica fiber. With a proper temperature control, the stable single-frequency laser with a linewidth of 4.8 kHz was achieved. The maximum output power of the DBR fiber laser is 13 mW with a slope efficiency of 3.4% relative to the launched pump power of 378 mW. The measured relative intensity noise is about -132 dB/Hz at frequencies of over 1 MHz. The master oscillator power-amplifier structure was used to amplify the output power of the DBR laser. When the length of the amplification gain laser is given as 56 cm, the output power is scaled up to 325 mW with a slope efficiency of 52.8%.

**Key words:** Fiber laser; Single-frequency; Distributed Bragg reflector; Yb-doped silica fiber; Ultrashort cavity; Master oscillator power amplifier

**OCIS Codes:** 140.3615; 060.2320; 060.3510; 060.2430

## 0 引言

单频光纤激光器凭借其出色的单色性、相干性以及低噪声等特点, 在光纤传感、光纤通信、激光雷达、太赫兹波源、超快光谱分析等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>. 在过去的三十年中, 研究人员为改善单频光纤激光器的单频输出性能, 提出了许多技术方法. 目前, 为获得光纤激光器的单频输出常用的技术方法主要有: 1) 利用偏振非相干技术消除空间烧孔效应以实现光纤激光器的单模运转<sup>[5]</sup>, 但这种技术对光纤长度的选取, 以

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目 (No. 12JS095) 资助

第一作者: 黄金 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为单频光纤激光器. Email: jhuang1121@163.com

导师: 白晋涛 (1959-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光技术与应用、非线性光学. Email: baijt@nwu.edu.cn

通讯作者: 孙博 (1979-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤激光器技术、太赫兹波技术. Email: sunbo\_xt@163.com

收稿日期: 2017-02-24; 录用日期: 2017-03-28

<http://www.photon.ac.cn>

及偏振控制器的精确调节要求较高,容易受到外界环境的干扰;2)在谐振腔内加入一段可饱和吸收体<sup>[6]</sup>,使其在内部形成干涉产生窄带滤波窗口,进而实现压窄线宽的目的,但这种方法也同样会使整个光纤激光器的结构变得复杂,不利于小型化、集成化;3)采用分布反馈式(Distributed Feed Back,DFB)超短腔结构<sup>[7]</sup>,可以实现光纤激光器的单纵模运转且结构较为简单、易于实现集成化,但在增益光纤上刻蚀相移光栅技术难度较高,增加了其制作成本;4)用两个光纤布拉格光栅和增益光纤组成的布拉格反射式(Distributed Bragg Reflector,DBR)结构的超短线型腔<sup>[8]</sup>,其结构简单、易于小型化、集成化、成本较低。

实现全光纤超短线型 DBR 结构的光纤激光器的关键技术之一,是要选取对泵浦光吸收系数较高的高浓度稀土掺杂增益光纤。目前,国内外许多课题组主要利用基于多组分玻璃基底(例如磷酸盐玻璃、氟磷酸盐玻璃)的稀土掺杂光纤,来开展多种波段的 DBR 单频光纤激光器的研究工作。2004 年 C. Spiegelberg 等报道了一种基于  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺的磷酸盐 DBR 单频光纤激光器,其输出功率大于 200 mW,线宽小于 2 kHz<sup>[9]</sup>;2011 年,华南理工大学的杨中民课题组成功研制出了以掺  $\text{Yb}^{3+}$  磷酸盐为基础的 1 064 nm DBR 单频光纤激光器,其输出功率超过 400 mW,线宽小于 7 kHz<sup>[10]</sup>;2012 年,NP 公司报道了一种掺  $\text{Tm}^{3+}$  的氟磷酸盐(ZBLAN) DBR 光纤激光器,其工作波长为 1200 nm,输出功率超过 10 mW<sup>[11]</sup>;同年,天津大学的史伟课题组用 2 cm 长的掺  $\text{Yb}^{3+}$  磷酸盐光纤组成了 976 nm DBR 结构的单频光纤激光器,其输出线宽小于 3 kHz,功率超过 100 mW<sup>[12]</sup>;2013 年,杨中民课题组又成功研制出了工作波长在 1 083 nm、输出功率超过 100 mW、线宽小于 2 kHz 的 DBR 单频光纤激光器,所用增益为 1.8 cm 的掺  $\text{Yb}^{3+}$  磷酸盐光纤<sup>[13]</sup>。虽然基于多组分玻璃制成的光纤可以实现较高浓度的稀土掺杂,但也存在一些缺点:相对于常见的硅酸盐玻璃光纤,多组分玻璃制成的稀土掺杂光纤的熔点较低,物理、化学性能不稳定,且它在与传统硅酸盐玻璃制成的光纤器件进行熔接时,具有较高的熔接损耗。除此之外,由于多组分玻璃的稀土掺杂光纤的制作技术难度较大,还未实现大规模商品化生产,因此产品价格较为昂贵。这些不足在一定程度上限制了基于多组分玻璃增益光纤在光纤激光器领域中的实际应用。

本文采用基于硅酸盐基底的高掺杂  $\text{Yb}^{3+}$  增益光纤,实现了 1 064 nm 超短腔 DBR 结构单频光纤激光器的振荡输出。该单频光纤激光器以 1.1 cm 长的高浓度单模掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤为工作介质,有效腔长为 2 cm,获得了输出线宽为 4.8 kHz、最大输出功率为 13 mW 的单频 1 064 nm 激光输出。相对于 378 mW 的注入泵浦功率,该光纤激光器斜效率为 3.4%,采用主振荡功率放大的方式对该单频光纤激光器进行了功率放大。当所采用放大增益光纤长度为 56 cm 时,可以得到 325 mW 的输出功率,其放大功率斜效率为 52.8%。

## 1 实验装置

基于 DBR 结构 1 064 nm 超短腔单频光纤激光器的实验结构如图 1。采用带单模尾纤输出的 976 nm 激光二极管作为光纤激光器的泵浦源,其最大输出功率为 600 mW。为了防止该 DBR 光纤激光器回返光对泵浦源的影响,在泵浦源之后熔接一个单模 976/1 064 nm 的波分复用器  $\text{WDM}_1$ ,起保护泵浦源的作用。该 DBR 单频光纤激光器的谐振腔由一段长 1.1 cm 的高浓度硅酸盐掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤和一对光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)组成。其中,高浓度硅酸盐掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤(Fibercore,DF1100)在 975 nm 处的增益吸收系数为 1 500 dB/m。两个 FBG 的中心波长都为 1 064 nm,其中一个 FBG 刻写在普通单模光纤上,其反射率大于 99%,反射带宽为 0.3 nm(称为 HR-FBG);另一个 FBG 为刻写在单模保偏光纤上,其反射率为 85%,带宽为 0.06 nm(称为 PMOC-FBG)。由于单模保偏光纤

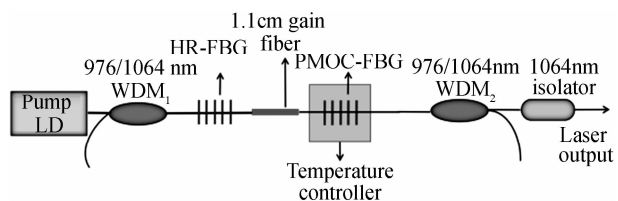


图 1 1 064 nm DBR 结构单频光纤激光器实验装置  
Fig. 1 Experimental setup of the 1064 nm single-frequency DBR fiber laser

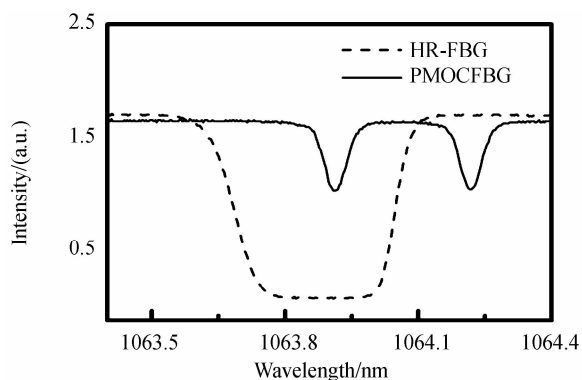


图 2 HR-FBG 与 PMOC-FBG 透射光谱  
Fig. 2 Transmission spectra of the HR-FBG and PMOC-FBG

中存在双折射现象,因此 PMOC-FBG 的光谱会出现两个波峰,分别对应保偏光纤的快轴和慢轴.为了实现单频激光在该光纤激光器谐振腔中的振荡,实验中使 PMOC-FBG 的快轴对应的反射峰与 HR-FBG 的反射峰相互重叠.两个 FBG 的透射光谱如图 2.基于两个 FBG 的反射率,以及增益光纤的物理长度,根据参考文献[14],可计算出该 DBR 光纤激光器谐振腔的有效腔长约为 20 mm.该谐振腔所对应的纵模间隔为 5.17 GHz,而 PMOC-FBG 的 3 dB 反射带宽为 15.9 GHz.可以看到,只有几个纵模模式可以存在于谐振腔中.因此,为了确保光纤激光器稳定的单模输出,利用温度控制系统(温控精度为 0.01℃)对该 DBR 单频光纤激光器进行严格的温度控制.为了避免该 DBR 谐振腔结构受到损坏,将谐振腔放入一段由石英制成的毛细玻璃管中.在 PMOC-FBG 的激光输出端后熔接了一个单模的 976/1 064 nm WDM<sub>2</sub>,用以分离残余的 976 nm 泵浦光和产生的 1 064 nm 激光.同时,为了防止光纤输出端面的反射光对单频光纤激光器输出稳定性的影响,在 WDM<sub>2</sub> 的 1 064 nm 输出端熔接了一个单模 1 064 nm 隔离器,用以获得稳定的单频激光输出.

## 2 实验结果及讨论

外界环境的干扰,尤其是外界温度的变化,会对单频光纤激光器的单频输出有较大的影响.因此,为了获得稳定的单频激光输出,对该超短腔 DBR 光纤激光器采取精密温控措施.由于所采用的 FBG 和高掺杂 Yb<sup>3+</sup> 增益光纤都以硅酸盐玻璃为基底,具有相同的热膨胀系数和热光系数<sup>[15]</sup>,因此在实验过程中,只对 PMOC-FBG 所处的毛细石英管部分进行温度控制,而对谐振腔其余部分则不进行温控.用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(Yokogawa, AQ6370C)采集该 DBR 单频光纤激光器的输出光谱,其中心波长为 1 063.94 nm,如图 3(a).同时,通过精密的温控,对该单频光纤激光器中心波长的变化进行观测,测量结果如图 3(b),其中心波长在 30 min 内的平均漂移量为 60 pm.中心波长漂移量较大的原因一方面是由于在实验过程中仅对 PMOC-FBG 进行严格的温度控制,而谐振腔的其余部分依旧会受到温度改变的影响,从而导致中心波长的不稳定;另一方面,泵浦源自身输出中心波长的不稳定或是光纤激光器中任意光纤器件受到外界环境的干扰都有可能都会导致光纤激光器输出中心波长产生漂移.此外,为了验证光纤激光器的纵模输出特性,用法布里—珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪(Thorlabs, SA210)和示波器(Agilent Technologies, DSO9104)对其输出激光纵模特性进行观测,测量结果如图 4.该 F-P 干涉仪的分辨率为 67 MHz,自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)为 10 GHz.在实验过程中,通过精确的恒温控制,DBR 单频光纤激光器可以始终保持稳定的单纵模输出,且随着泵浦功率的变化,也没有出现跳模或模式竞争的现象.

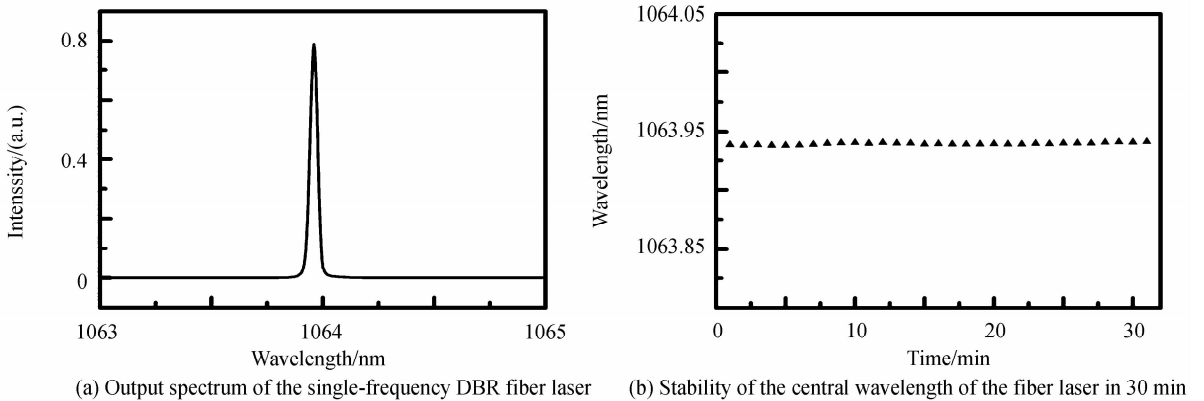


图 3 DBR 单频光纤激光器输出光谱特性

Fig. 3 Characteristics of output spectrum of the single-frequency DBR fiber laser

利用延迟自外差法测量了该单频光纤激光器的输出线宽.基于延迟自外差法的测量装置包括 30 km 单模光纤延迟线、150 MHz 频移的声光调制器、光电探测器以及频谱分析仪(KEYSIGHT, NA9000A)(RBW: 1 kHz).图 5 为泵浦功率为 200 mW 时,测量的输出激光谱线的频宽.图中两条曲线分别为扫描到的自外差信号和自外差信号经过洛伦兹拟合得到的曲线.可以看出,在低于拍频信号峰值的 20 dB 处的线宽为 96 kHz,该数值是激光输出真实线宽的 20 倍<sup>[16]</sup>.因此,对应的激光输出线宽为 4.8 kHz.

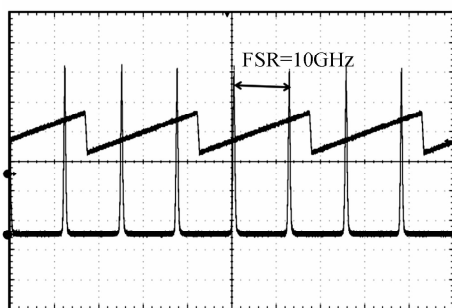


图 4 DBR 单频光纤激光器纵模特性

Fig. 4 Longitudinal mode characteristics of the DBR fiber laser

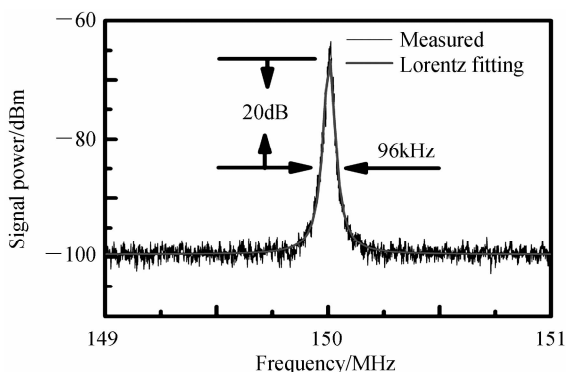
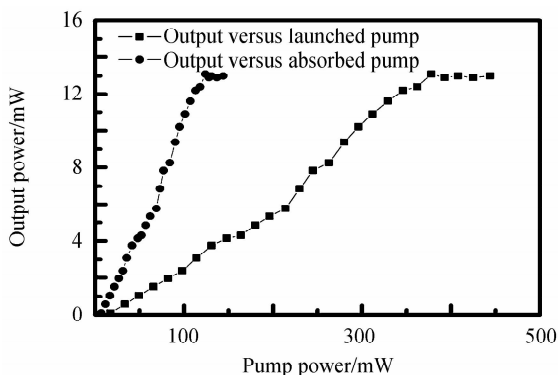


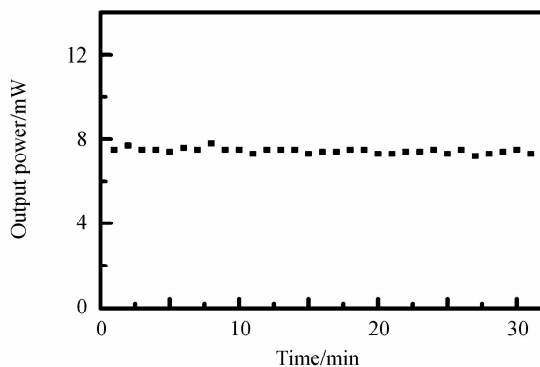
图 5 测量得到的 DBR 单频光纤激光器自外差信号频谱

Fig. 5 Measured self-heterodyne signal for the single-frequency DBR laser

图 6(a)为该 DBR 超短腔单频光纤激光器输出功率的输入—输出关系图. 该光纤激光器的振荡阈值约为 10 mW. 当注入泵浦功率为 378 mW 时, 输出激光功率达到 13 mW, 斜率效率为 3.4%. 如果只考虑谐振腔吸收的泵浦光功率, 即注入泵浦功率与在 WDM<sub>2</sub> 后 976 nm 端所测得的残余泵浦光功率之差, 则该光纤激光器的斜效率为 9%. 从图中还可以看出, 当泵浦光功率高于 378 mW 时, 该光纤激光器会出现输出功率饱和的现象. 该激光器之所以输出功率较低, 一方面因为该谐振腔中的高掺杂 Yb<sup>3+</sup> 单模增益光纤与 PMOC-FBG 的保偏光纤在熔接过程中存在固有的熔接损耗, 另一方面是由于在实验中所选取的 PMOC-FBG 反射率较高所导致. 此外, 对该光纤激光器的输出功率的稳定性进行测量, 测量结果如图 6(b). 在 30 min 内, 连续测量了该光纤激光器的输出功率变化, 得到其输出功率波动性约为 ±1.3%.



(a) Output power of the single frequency fiber laser as a function of the launched pump power and absorbed pump power



(b) Stability of the single-frequency fiber laser measured in 30 min

图 6 DBR 单频光纤激光器输出功率特性

Fig. 6 Characteristics of output power of the single-frequency DBR fiber laser

利用分辨率带宽为 1 kHz 的频谱仪, 对光纤激光器的相对噪声强度 (Relative Intensity Noise, RIN) 进行测量, 测量结果如图 7. 可以看到, 当频率小于 350 kHz 时, 光纤激光器的 RIN 值由 -95 dB/Hz 下降到了 -127 dB/Hz, 这主要是由周围环境的干扰或是泵浦源输出功率的波动等因素造成的. 该光纤激光器的弛豫振荡位于 486 kHz 处, 且其弛豫振荡的峰值幅度为 -114 dB/Hz. 此外, 在频率大于 1 MHz 后, 光纤激光器的 RIN 值会稳定在 -132 dB/Hz 附近, 且随着频率的升高没有再观察到其他噪声成分.

为了获得功率较高的 1064 nm 单频激光输出, 以该超短腔 DBR 光纤激光器的输出作为种子光源,

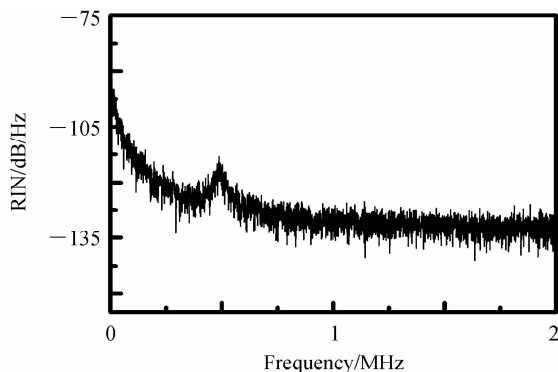


图 7 DBR 单频光纤激光器相对强度噪声测量谱  
Fig. 7 Experimental RIN spectra of DBR single-frequency fiber laser

对其进行了主振荡功率放大 (Master Oscillator Power Amplifier, MOPA) 的研究,实验装置如图 8. 实验装置中使用的泵浦源为带单模尾纤输出的 976 nm 激光二极管,采用的放大增益光纤与 DBR 单频光纤激光器中所使用的掺杂增益光纤相同. 当种子源输出功率为 2 mW 时,分别选取长度为 29.5 cm、40 cm、56 cm 和 71 cm 的增益光纤进行功率放大实验,其放大功率的输入-输出关系如图 9. 从图中可以看出,如果放大增益光纤过长,会发生激光自吸收现象而导致放大功率输出较低,而当增益光纤较短时,泵浦光则无法被增益光纤完全吸收,也会导致功率放大效果不理想. 在该实验条件下,当选取的放大增益光纤长度为 56 cm 时,可以实现较好的功率放大效果. 此时,当泵浦功率为 650 mW 时,1 064 nm 放大输出激光功率可达 325 mW,斜率效率为 52.8%.

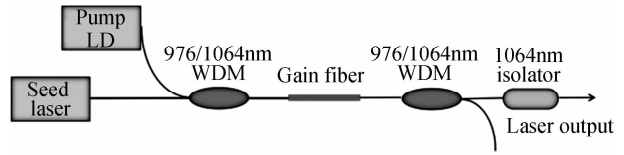


图 8 DBR 单频光纤激光器主振荡功率放大实验装置  
Fig. 8 Experiment setup of the DBR single-frequency MOPA fiber laser

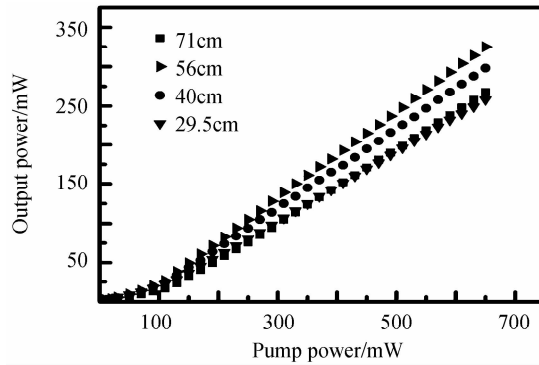


图 9 种子源输出功率为 2mW 时,选取不同长度放大增益光纤时 MOPA 的输入与输出关系  
Fig. 9 Output power versus pump power for given 2 mW signal for different lengths of highly Yb-doped fiber in the amplifier stage

### 3 结论

本文采用 1.1 cm 长的高浓度掺 Yb<sup>3+</sup> 硅酸盐光纤,实现了基于 DBR 结构的超短腔单频光纤激光器的振荡输出. 通过精确地温控调节,获得了稳定的单纵模激光输出,其输出激光的中心波长为 1 063.94 nm,输出线宽为 4.8 kHz. 该光纤激光器的振荡阈值为 10 mW,最大输出功率为 13 mW. 在频率大于 1 MHz 时,测得该光纤激光器的相对噪声强度值约为 -132 dB/Hz. 采用主振荡功率放大结构,对该单频光纤激光器的输出功率进行了放大. 当放大增益光纤长度选取为 56 cm 时,获得了 325 mW 的放大功率输出,斜效率为 52.8%.

#### 参考文献

- [1] AHMADA H, DEMAIIKA M. Stabilized single longitudinal mode fibre ring laser based on an inline dual taper Mach Zehnder interferometer filter coated with graphene oxide[J]. *Optics Communications*, 2015, **341**(341):140-146.
- [2] GENG Ji-hong, SPIEGELBERG C, JIANG Shi-bin. Narrow line width fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(9):1827-1829.
- [3] SHI Wei, FANG Qiang, ZHU Xiu-shan, *et al.* Fiber lasers and their applications[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(28): 6554-68.
- [4] LUO Yuan, HE Yan, GAO Min, *et al.* Fiber laser-based scanning lidar for space rendezvous and docking[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(9):2470-2476.
- [5] CHANG D I, GUY M J, CHERNIKOV S V, *et al.* Single-frequency erbium fibre laser using the twisted-mode technique [J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(19):1786-1787.
- [6] HUANG Sheng-hong, QIN Guan-shi, SHIRAKAWA A, *et al.* Single frequency 1083nm ytterbium doped fiber master oscillator power amplifier laser[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(18):7113-7117.
- [7] CHEN Jia-lin, WANG Li, CHANG Li-ping, *et al.* 75 mW robust single frequency Yb-doped DFB fiber Bragg grating laser[J]. *Science Bulletin*, 2008, **53**(17):2729-2732.
- [8] ZHANG Z, BOYLAND A J, SAHU J K, *et al.* High-power single-frequency thulium-doped fiber DBR laser at 1943 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(7):417-419.
- [9] SPIEGELBERG C, GENG Ji-hong, HU Yong-dan, *et al.* Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm [J].

*Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(1):57-62.

- [10] XU Shan-hui, YANG Zhong-min, ZHANG Wei-nan, *et al.* 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(18):3708.
- [11] ZHU Xiu-shan, ZONG Jie, MILLER A, *et al.* Single-frequency Ho<sup>3+</sup>-doped ZBLAN fiber laser at 1200 nm[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(20):4185.
- [12] ZHU Xiu-shan, SHI Wei, ZONG Jie, *et al.* 976 nm single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(20):4167-4169.
- [13] XU Shan-hui, LI Cai, ZHANG Wei-nan, *et al.* Low noise single-frequency single-polarization ytterbium-doped phosphate fiber laser at 1083 nm[J]. *Optics Letters*, 2015, **38**(4):501-503.
- [14] BARMENKOV Y O, ZALVIDEA D, TORRES-PEIRÓ S, *et al.* Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(14):6394-6399.
- [15] ZHANG Yu-ning, LI Cai, XU Shan-hui, *et al.* A broad continuous temperature tunable DBR single-frequency fiber laser at 1064 nm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(2):1501107.
- [16] LI Shu-ran, LIN Peng, HU Zhi-ling, *et al.* Effect of fiber delay line on measurement of laser linewidth and data correction[J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2012, **28**(3):27-29.
- 李舒然, 林鹏, 胡志凌, 等. 光纤延迟线对激光器线宽测量的影响及修正[J]. 天津理工大学学报, 2012, **28**(3):27-29.