

应用于下一代引力波探测器的超低噪声 2 μm 高功率单频光纤激光器 (特邀)

侯玉斌^{1,2}, 卢向文^{1,2}, 张 倩^{1,2*}, 王 璞^{1,2}

(1. 北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;
2. 北京工业大学北京激光应用技术研究中心, 北京 100124)

摘 要: 利用声光调制器 (AOM) 激光反馈回路对泵浦激光的强度噪声进行抑制, 获得了 5 dB 以上的强度噪声抑制 ($@f=1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$)。2 μm 单频光纤激光器的相对强度噪声获得 3~15 dB 的抑制 ($@f=1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$), 且其强度噪声水平接近探测器极限 ($@f=40\sim 400\text{ Hz}$)。同时, 其频率噪声也得到了 3~8.4 dB 的抑制。经过两级掺铥保偏光纤放大器后, 2 μm 单频激光的输出功率提升至 5.2 W 左右, 其频率噪声几乎没有明显增加, 并且频率噪声水平均在 $100\text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($f>13\text{ Hz}$)。实现了频率响应为 45 MHz/V, 频率漂移为 41.4 MHz@1 h, 功率波动 $<0.4\%$ @1 h, 线宽 $<5\text{ kHz}$ 稳定的单频激光输出。该类超低噪声 2 μm 单频光纤激光器将成为下一代引力波探测器的候选光源。

关键词: 低噪声; 相对强度噪声; 频率噪声; 单频; 高功率; 光纤激光器
中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220400

Ultra-low noise 2 μm high power single-frequency fiber laser for next generation gravitational-wave detector (*Invited*)

Hou Yubin^{1,2}, Lu Xiangwen^{1,2}, Zhang Qian^{1,2*}, Wang Pu^{1,2}

(1. Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Beijing Engineering Research Center of Laser Applied Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: An acoustic optical modulator (AOM) laser power feedback loop was used to suppress the intensity noise of the pump laser, and the intensity noise reduction of more than 5 dB ($@f=1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$) was obtained. The relative intensity noise of the 2 μm single-frequency fiber laser obtained 3-15 dB suppression ($@f=1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$), and the intensity noise level was close to the detector limit ($@f=40\sim 400\text{ Hz}$). Meanwhile, its frequency noise is also suppressed by 3-8.4 dB. After the two-stage Thulium-doped polarization-preserving fiber amplifier, the output power of the 2 μm single-frequency laser was increased to about 5.2 W with almost no significant increase in frequency noise, and the frequency noise levels were all at $100\text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($f>13\text{ Hz}$). The frequency response was 45 MHz/V, the frequency drift was 41.4 MHz@1 h, the power fluctuation was less than 0.4%@1 h, and the linewidth was less than 5 kHz. This kind of ultra-low noise 2 μm single-frequency fiber laser will be a candidate laser source for the next generation of gravitational wave detectors.

收稿日期:2022-05-06; 修订日期:2022-05-26

基金项目:国家自然科学基金 (61905006)

作者简介:侯玉斌,男,副研究员,博士,主要从事单频光纤激光器、光纤布拉格光栅制备、双频光纤激光器、低噪声光纤放大器等方面的研究。

通讯作者:张倩,女,助理研究员,博士,主要从事低噪声单频光纤激光技术方面的研究。

Key words: low-noise; RIN; frequency noise; single-frequency; high power; fiber laser

0 引言

2 μm 波段单频光纤激光器 (SFFL) 凭借光谱线宽窄、相干长度长、噪声低、波长可调谐、结构紧凑等优点, 在非线性光学^[1]、大气传感^[2]、高分辨率光谱学^[3]、相干多普勒激光雷达^[4]、引力波探测^[5] 等领域都得到了广泛应用。

在下一代引力波探测领域, 以 LIGO Voyager 为例, 计划将熔融石英腔镜替换为低温单晶硅腔镜^[6]。选择低温单晶硅是因为单晶硅的热膨胀系数曲线穿过零点, 这将消除热噪声中的热弹性分量, 可以有效降低热噪声, 并使得温度梯度引起的曲率变化半径最小^[7]。此外, 低温单晶硅可以允许更高的激光功率 (3 MW), 高激光功率可以降低高频量子噪声 (shot noise)。由于单晶硅对波长在 1100 nm 以下的波长不透明, 因此选择 1.5~2 μm 波长区域的激光光源更合适。此外, 相比于 1.5 μm 波段, 单晶硅的吸收损耗和散射损耗在 2 μm 波段更低, 从而可以获得高腔内循环光功率, 进而探测器可实现高灵敏度^[8]。而激光器的噪声水平则是关乎整个探测装置灵敏度的另一个关键指标, 其决定了系统的整体噪声水平。为此, 需要开发具有超低噪声的 2 μm 高功率单频激光器。

目前, 实现 2 μm 光纤激光器单纵模运转 (单频) 的主要方式有分布式布拉格反射腔 (DBR)、分布反馈腔 (DFB) 和嵌入滤波器的环形腔^[9-11]。从激光模式纯度、激光强度噪声和频率噪声、结构简单等性能特点来看, 短腔 DBR 单频光纤激光器具有更大的潜力。2007 年, J. Geng^[12] 等人通过与 NASA 的合作, 首次在 2 μm 波段 DBR 结构的单频光纤激光器研究方面取得突破, 获得 50 mW 单频激光输出。其频率噪声水平由 $3 \times 10^4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@10 \text{ Hz}$ 下降到 $2 \times 10^2 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@10 \text{ kHz}$ 。2015 年, Q. Yang^[13] 等人在 1950 nm 波段获得了低噪声、窄线宽的单频激光输出。相对强度噪声 (RIN) 在 0~50 MHz 频率范围内, 由 -70 dB/Hz 下降到 -135 dB/Hz。并且, 其频率噪声水平在 50 Hz~4 kHz 范围内约为 $3 \times 10^5 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2017 年, S. Fu^[14] 等人首次利用商用掺铥光纤在 1950 nm 波段实现了线偏振单频光纤激光器, 输出功率大于 50 mW, 线宽约为

36 kHz。在 0~5 MHz 范围内, RIN 水平约为 -112~-145 dB/Hz。2018 年, S. Xu^[15] 等人采用同带泵浦技术与 DBR 短腔结构相结合的方式, 在 1950 nm 波段获得了单频激光输出。当频率在 8.4 MHz 以上时, 输出激光的 RIN 水平低于 -150 dB/Hz。同时, 测量得到输出激光的线宽小于 12.55 kHz。上述 2 μm 单频光纤激光器的报道中关于强度噪声的研究很多, 而关于频率噪声的研究鲜少提及。然而, 频率噪声是决定引力波探测器干涉仪灵敏度最重要的因素之一, 因此需要尽可能地降低激光频率噪声。

文中报道了一种应用于下一代引力波探测器的超低噪声 2 μm 高功率单频光纤激光器。利用声光调制器 (AOM) 激光反馈回路对泵浦激光的强度噪声进行抑制, 2 μm SFFL 的 RIN 获得了 3~15 dB 的噪声抑制, 同时其频率噪声也获得最大 8.4 dB 的噪声抑制。利用超低噪声激光器作为种子源, 结合低噪声全保偏光纤放大技术, 在激光频率噪声水平保持不变的情况下, 实现输出功率大于 5.2 W, 频率响应为 45 MHz/V, 频率漂移为 41.4 MHz@1 h, 功率波动 <0.4%@1 h, 线宽 <5 kHz 稳定的单频激光输出。

1 实验装置

超低噪声 2 μm 单频光纤激光器如图 1(a) 所示。泵浦源是 1550 nm 单频激光器 (SFL), 其中由一个分布式布拉格反馈 (DFB) 单频半导体激光器和一级掺铥光纤放大器组成。掺铥光纤放大器采用正向泵浦方式, 以 1550 nm DFB 为种子源, 由一个中心波长 976 nm 的 9 W 半导体激光器作为泵浦源, 一段 4 m 长的 6 $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ (纤芯直径/包层直径) 的双包层铥镱共掺光纤 (Nufern, EYDF-6/125) 作为增益光纤。1550 nm SFL 经过声光调制器 (AOM: 50 MHz) 后进入一个 95/5 光学耦合器 (Coupler), 其中 5% 信号端入射到光电探测器 (PD: Thorlabs, 600~1700 nm), 经过光信号到电信号的转换后进入 PID 数字电路中进行信号处理后, 通过 AOM 的驱动器反馈给 AOM, 形成光反馈回路。而耦合器 95% 信号端则通过 2 μm 波段的保偏波分复用器 (PM WDM: 1550 nm/2000 nm) 进入 PM DBR

短腔结构。PM DBR 结构是由一对光栅和 1.5 cm 长的保偏掺铥商用光纤 (Nufern, PM TSF 5/125) 组成。宽带高反光栅 (HR-BW-FBG) 和保偏低反光栅 (LR-PM-FBG) 是由实验室自主刻写的, 作为谐振腔的高反射镜和输出镜。HR-BW-FBG 的中心波长为 1989.74 nm, 带宽为 0.18 nm, 反射率为 99%。LR-PM-FBG 的中心

波长为 1989.76 nm, 带宽为 0.09 nm, 反射率为 90%。并且, PM DBR 谐振腔与压电陶瓷 (PZT) 固定在一起, 通过改变压电陶瓷的伸长量改变 DBR 谐振腔的腔长, 最终实现对激光器输出频率的扫频。最后, 2 μm 输出激光通过 PM WDM 的信号输出端后, 再经过 2 μm 保偏光隔离器 (PM ISO, 2 000 nm) 后输出。

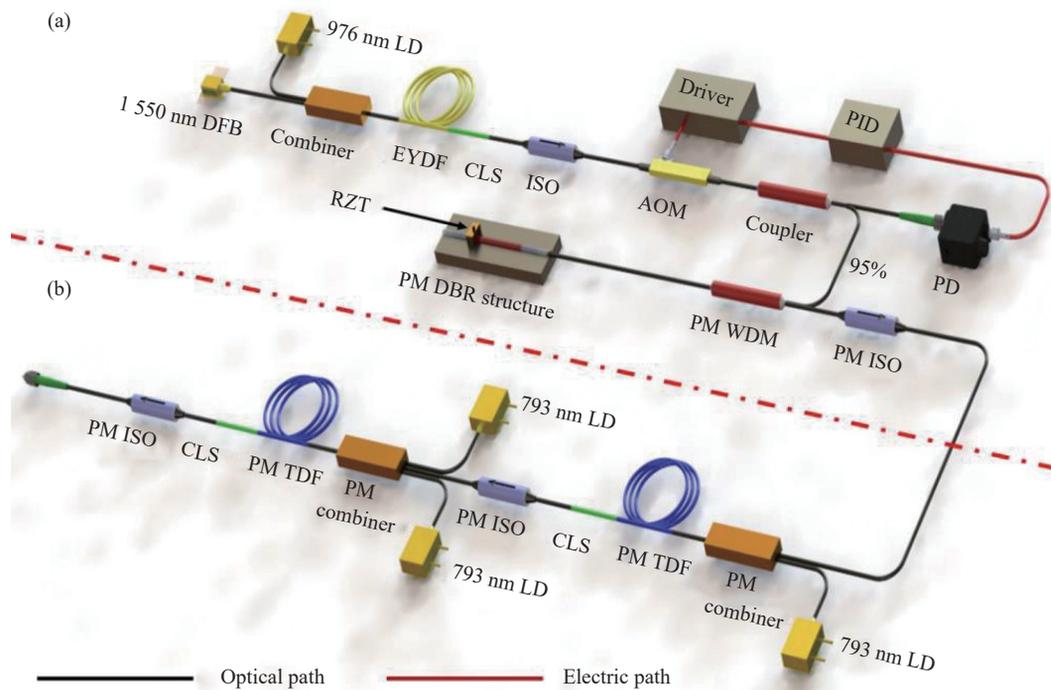


图 1 超低噪声 2 μm 单频保偏光纤激光器的实验装置

Fig.1 Experimental setup of the ultra-low noise 2 μm single-frequency PM fiber laser

图 1(b) 为两级掺铥保偏光纤放大器的结构图。第一级保偏光纤放大器采用 793 nm 半导体激光器 (BWT, LD, 8 W) 作为泵浦源, 并通过 (2+1)×1 保偏光纤合束器 (PM combiner) 耦合进入放大器的增益光纤中。增益光纤是 Nufern 公司的双包层掺铥光纤 PM-TDF-10 P/130-HE, 光纤纤芯直径为 10 μm, 第一包层直径 130 μm, 纤芯数值孔径 0.15, 包层吸收系数为 9.60 dB/m@793 nm。采用 20 cm 长剥除涂覆层的 PM1550 单包层光纤并涂覆高折射率胶对双包层增益光纤中残余的泵浦光进行剥离 (CLS)。第二级放大器与第一级的放大器相似, 其增益光纤为 3 m 长的 PM-TDF-10 P/130-HE, 泵浦光源为 2 个输出功率 8 W 的 793 nm LD。最后放大的 2 μm 单频激光通过保偏隔离器 (PM ISO) 输出。

2 实验结果与讨论

2.1 1550 nm SFL 的 RIN

泵浦的 RIN 是光纤激光器 RIN 和频率噪声最主要的噪声来源。因此, 利用反馈回路抑制泵浦的 RIN 可以有效抑制单频激光噪声水平^[16]。实验中采用 Thorlabs 公司的铟镓砷放大光电探测器 (PDA, 10 CF-EC, 800~2600 nm) 和 HEWLETT PACKARD 公司的频谱分析仪 (PSA, 89441 A, DC-2650 MHz) 进行测量。当输出激光的直流电压被衰减为 5 V 时, 测量得到的 1550 nm 单频激光器抑制后的 RIN 如图 2 所示。

当 1550 nm SFL 是自由运转时, RIN 水平由 1 Hz 频率处的 $1 \times 10^{-4} / \sqrt{\text{Hz}}$ 下降到 100 kHz 频率处的 $1.3 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。并且, 在 1~50 kHz 频率范围内 RIN 出

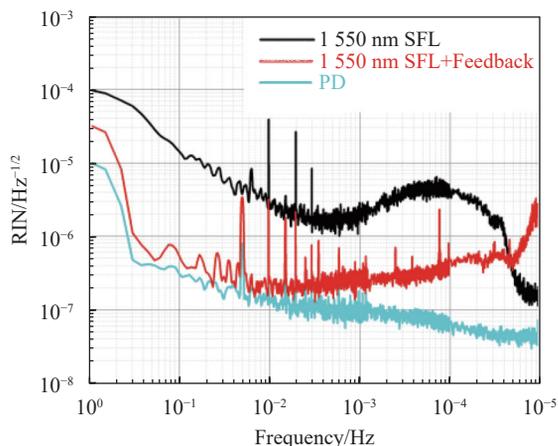


图 2 1550 nm SFL 抑制后的 RIN

Fig.2 RIN of 1550 nm SFL with and without feedback control loop

现了缓慢增加,形成了一个半圆形的凸起,这极大可能是由于铷离子的能级结构引起的^[17]。

当反馈回路工作时,1550 nm SFL 的 RIN 获得了 5~13 dB 抑制,且在 1 Hz~1 kHz 频率范围内,1550 nm SFL 的 RIN 接近探测器的噪声极限。然而,当频率 >50 kHz 时,1550 nm SFL 的 RIN 谱线出现明显的增长,这是由于反馈电路中的 Unity Gain 频率在该频段附近,并且此时的相位发生了突变,同时高频增益不足,无法补偿该高频段的噪声。

2.2 2 μm SFFL 的 RIN 和频率噪声

当泵浦源 (1550 nm SFL) 功率为 345 mW 时,2 μm 单频激光的输出功率为 14.34 mW。图 3(a) 是泵浦 RIN 抑制前后 2 μm 单频光纤激光器的 RIN 谱。当泵浦无反馈时,2 μm 单频光纤激光器的 RIN 由 1 Hz 处的 $4 \times 10^{-5} / \sqrt{\text{Hz}}$ (最大值) 减小到 100 kHz 处的 $1.3 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ (最小值)。当泵浦有反馈时,RIN 在 1 Hz~50 kHz 范围内得到 3~15 dB 的抑制。并且,在 10 Hz~1 kHz 频率范围内,2 μm 单频光纤激光器的 RIN 获得了近光电探测器的暗噪声极限的超低噪声水平,约为 $1.3 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。当频率超过 50 kHz 时,泵浦有反馈时 2 μm 单频光纤激光器 RIN 反而高于泵浦自由运转情况 2 μm 激光器 RIN,这同样是由于 AOM 反馈电路中高频增益不足,不能补偿泵浦在高频区域的强度噪声,从而导致 2 μm 单频激光的 RIN 升高。

采用非平衡的光纤马赫—曾德尔干涉仪 (fMZI)^[18] 测量了泵浦 RIN 抑制前后 2 μm 单频光纤激光器的频率噪声,如图 3(b) 所示。泵浦无反馈时,2 μm SFFL

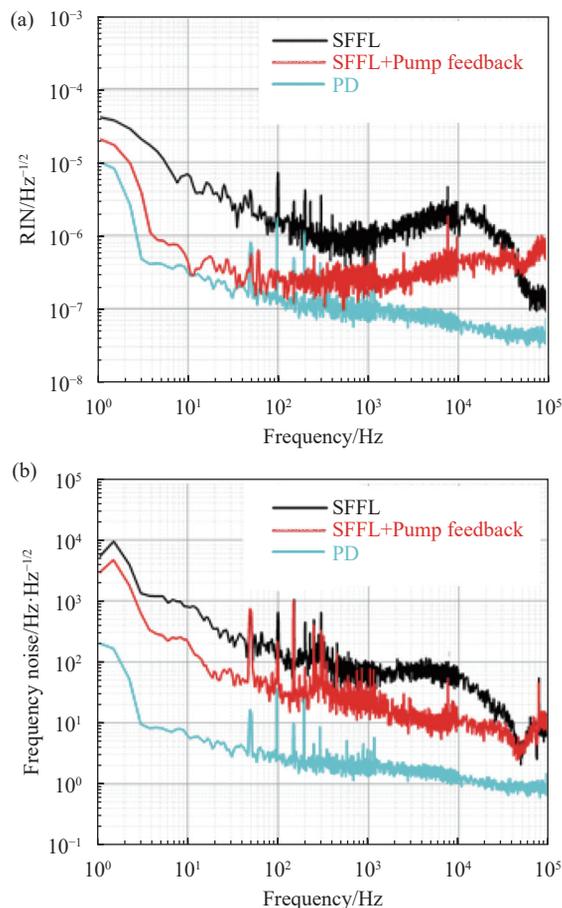


图 3 泵浦有反馈与无反馈时,2 μm SFFL 的 RIN (a) 和频率噪声 (b)
Fig.3 RIN (a) and frequency noise (b) of 2 μm SFFL pumped with and without feedback

的频率噪声在 1 Hz~50 kHz 范围内,频率噪声随频率增加而逐渐减小,并在 50 kHz 频率处获得最小值 $3.4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。而当频率大于 50 kHz 时,2 μm 单频光纤激光器的频率噪声出现了缓慢的增加,最终近似平稳在 $10 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平附近。当泵浦有反馈时,2 μm SFFL 的频率噪声水平,由 1 Hz 处的 $3 \times 10^3 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 下降到 50 kHz 处的 $3.3 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。同样是在频率大于 50 kHz 后,2 μm SFFL 的频率噪声出现了缓慢的增加,最终也近似平稳在 $10 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平附近。

2.3 2 μm 单频放大器的 RIN 和频率噪声

经过两级掺铥的保偏光纤放大器后,2 μm SFFL 的输出功率达到 5.2 W。2 μm SFFL 及两级掺铥保偏光纤放大器的 RIN 对比图,如图 4(a) 所示。当泵浦自由运转时,对比 2 μm 单频激光和经过两级光纤放大器放大后的 RIN 可以发现,在 6 Hz~50 kHz 范围内,2 μm 单频激光的水平几乎没有变化,而当在 6 Hz 以

下和 50 kHz 以上时, 2 μm 单频激光的 RIN 出现不同程度的增长, 其噪声增长的一个原因是 2 μm 单频激光在功率放大过程中会引入额外的自发辐射噪声和热噪声, 另一个原因是放大器的泵浦源 (793 nm LD) 的强度噪声耦合引起的。当泵浦进行反馈时, 2 μm 种子激光经过保偏光纤放大器后 RIN 也出现了增加, 但不会高于泵浦 (1550 nm SFL) 无反馈时放大后 2 μm 激光的 RIN (蓝色曲线)。此时的 2 μm 单频激光 RIN 增加是由放大过程中增益光纤产生的自发辐射噪声和自激振荡引起的。并且, 在 1 Hz~10 kHz 频率范围内, 2 μm 单频激光的 RIN 明显优于自由运转 NPRO 激光器的 RIN。

2 μm SFFL 及其两级掺铥光纤放大器的频率噪声, 如图 4(b) 所示。对比 1550 nm SFL 的 RIN 无反馈

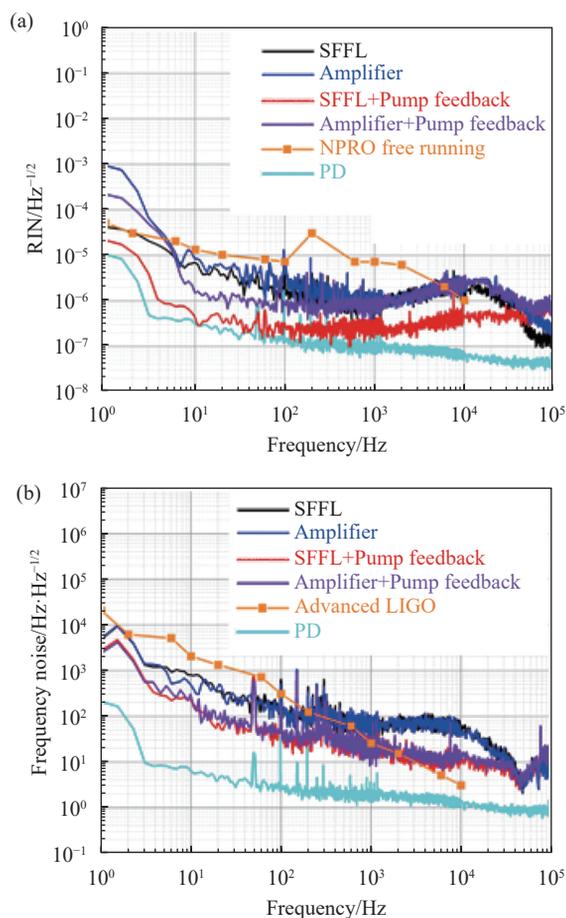


图 4 泵浦有反馈与无反馈时, 掺铥保偏光纤放大器的 RIN (a) 和频率噪声 (b)

Fig.4 RIN (a) and frequency noise (b) of the thulium-doped polarization-maintaining fiber amplifier pumped with and without feedback

时 2 μm 种子激光和放大激光的频率噪声, 很容易发现两条谱线的频率噪声曲线几乎是相同的。随后, 比较 1550 nm SFL 的 RIN 有反馈时的 2 μm 种子激光和放大后激光的频率噪声, 发现两条谱线的频率噪声水平也是一样的。两组对比结果表明: 2 μm 单频激光在放大过程中几乎没有引入其他的额外频率噪声, 这是因为种子激光是线偏振的激光, 只存在一个偏振态, 不会引起频率的波动。除此之外, 实验中的 2 μm 波段单频种子和放大器都封装在恒温隔音隔振的盒子里, 也不会引入外部环境噪声。并且, 在频率小于 1 kHz 时, 2 μm 单频激光的频率噪声低于 NPRO 激光器 (Advanced LIGO 高功率激光器的种子源) 的频率噪声。

2.4 PZT 的频率响应与激光的频率漂移

压电陶瓷 (PZT) 的调制频率响应如图 5(a) 所示。在 1 Hz~100 kHz 频率范围内, 频率响应曲线随着

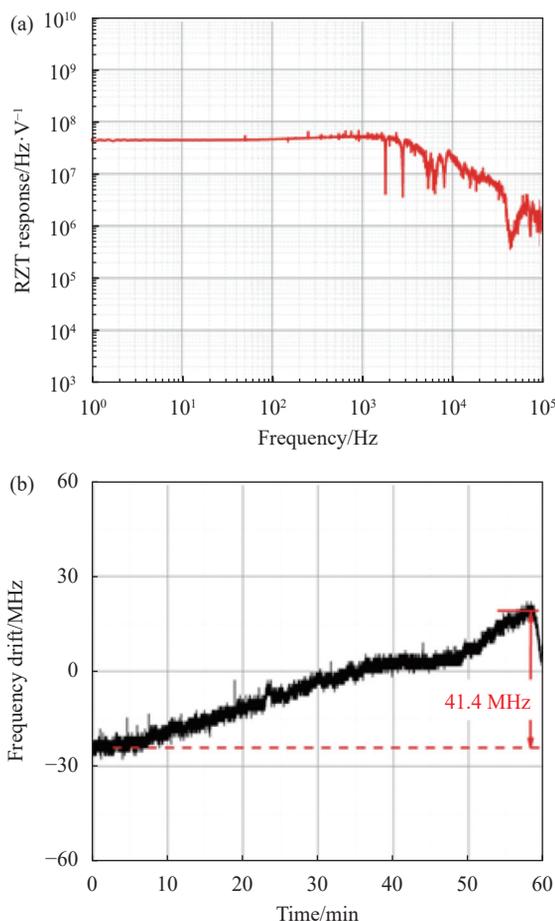


图 5 PZT 的频率调制响应 (a) 和 2 μm SFFL 在 1 h 内的频率漂移 (b)

Fig.5 Frequency response to PZT modulation (a) and frequency drift of 2 μm SFFL in 1 h (b)

频率增加先是保持不变后呈下降趋势,由 1 Hz 频率处的最大值 45 MHz/V 下降到 100 kHz 处的 1 MHz。当频率小于 3 kHz 时,频率响应曲线几乎是一条平坦的直线,其数值大约为 45 MHz 左右。而在 1.8 kHz、2.8 kHz、4 kHz、6 kHz 和 30 kHz 频率附近都出现了振荡峰,这依然是由 PZT 与 PMDBR 结构的封装之间形成共振引起的。另外,由于共振的存在,导致 PZT 的响应带宽限制在 2 kHz,这可以通过 PZT 的不同位置设计得到改善。

图 5(b) 为 2 μm SFFL 在 1 h 内的频率漂移。首先,利用 PDH(Pound-Drever-Hall) 稳频系统将 2 μm 单频激光器频率锁定在高精细度 ($Q=4\times 10^8$) 的 F-P 腔上,并测量了 2 μm 单频激光稳频后的误差信号在 1 h 内的电压漂移,其电压漂移值为 92 mV。根据 PZT 的频率响应值 45 MHz/V,可以计算得到图 5(b),由图可知该单频光纤激光器在 1 h 内的频率漂移为 41.4 MHz。

2.5 2 μm 单频激光的线宽、功率稳定性和输出光谱

利用延时自外差方法测量了 5.2 W 输出功率下 2 μm 单频光纤激光器的线宽,采用 100 km 长的商用单模光纤 (SMF28) 作为延时光纤。但 SMF28 光纤在 2 μm 波段的传输损耗较大,理论上是 10 dB/km,实际测量时大约为 20 dB/km,因此低功率种子源 (14.34 mW) 的线宽暂时无法测量,所以只能测量放大后的输出激光线宽。为了避免 5.2 W 的 2 μm 单频激光在 100 km 长的 SMF28 光纤中产生受激布里渊散射,将输出功率衰减为 245 mW 再对其线宽进行测量,见图 6(a)。由图可知,在 5.2 W 输出功率下该单频激光的 20 dB 线宽约为 93 kHz,其对应的 3 dB 线宽约为 4.65 kHz。

图 6(b) 是两级掺铥保偏光纤放大器在输出功率为 5.2 W 时的功率稳定性。当 793 nm LD 泵浦源的功率为 15.45 W 时,掺铥保偏光纤放大器的输出功率约为 5.2 W,同时测量得到两级掺铥保偏光纤放大器的输出功率在一小时内的波动 < 0.4%。

图 6(c) 是 2 μm 单频种子源和两级保偏光纤放大器的输出激光光谱图。2 μm 种子激光和两级放大器输出激光的中心波长都是 1989.74 nm,种子的光谱信噪比为 70 dB,放大器的光谱信噪比为 58 dB。此外,笔者还利用偏振消光比测量仪,测得输出激光的偏振消光比为 24 dB。

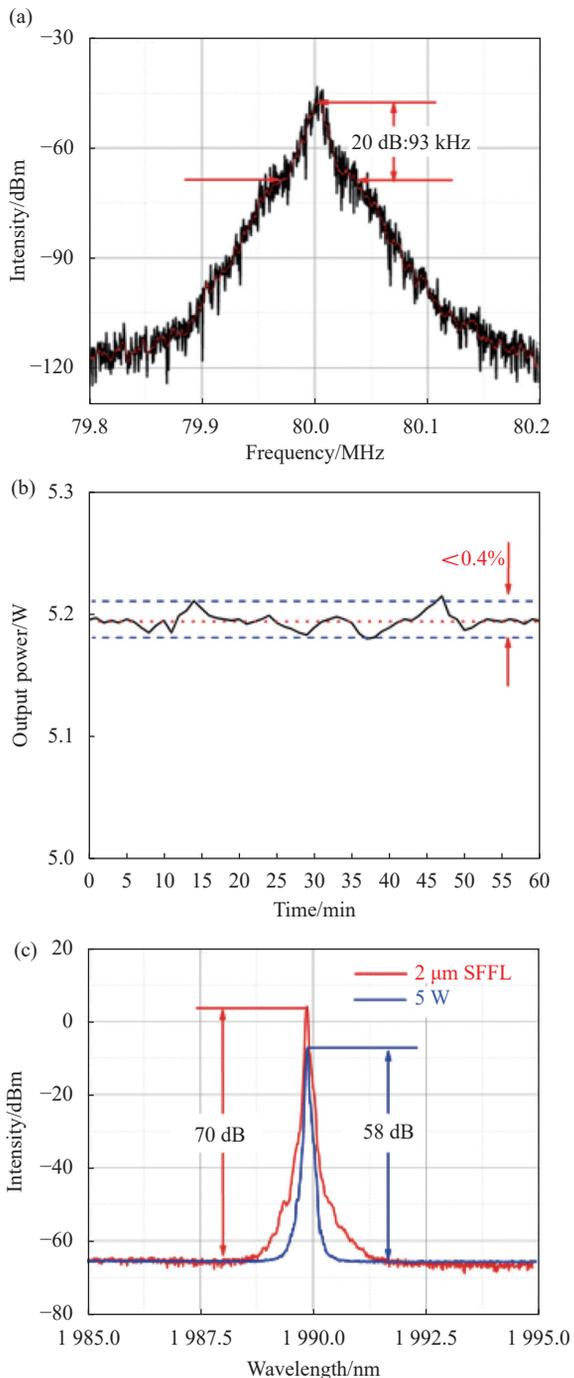


图 6 5.2 W 输出时 2 μm 单频激光的线宽 (a), 在 1 h 内的功率稳定性 (b), 放大前后 2 μm 单频激光的光谱图 (c)

Fig.6 Linewidth of 2 μm single-frequency laser at 5.2 W output (a), power stability within 1 h (b) and spectra of 2 μm single-frequency laser before and after amplification (c)

3 总结和展望

文中报道了一个低强度噪声和频率噪声的 2 μm 单频光纤激光器。利用 AOM 激光功率反馈回路对泵

浦源的强度噪声进行抑制, 获得了 5 dB 以上的强度噪声降低 ($@f=1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$)。利用该激光对 2 μm 单频光纤激光器进行泵浦, 获得了超低噪声 2 μm 单频激光输出。2 μm 单频光纤激光器的强度噪声获得了最大 15 dB@10 Hz 的噪声抑制, 且其强度噪声水平接近探测器极限 ($@f=40\sim 400\text{ Hz}$)。同时, 2 μm 单频光纤激光器的频率噪声水平获得最大 8.4 dB 的噪声抑制 ($@f=4\sim 5\text{ kHz}$), 且其频率噪声小于 $100\text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@f>13\text{ Hz}$ 。利用超低噪声激光器作为种子源, 结合低噪声全保偏光纤放大技术, 在激光频率噪声水平保持不变的情况下, 实现输出功率大于 5.2 W, 功率波动 $<0.4\%@1\text{ h}$, 频率漂移为 $41.4\text{ MHz}@1\text{ h}$, 线宽小于 5 kHz 稳定的单频激光输出。该类型的 2 μm 单频光纤激光器有望成为下一代引力波探测器的候选光源。

参考文献:

- [1] Lippert E, Rustad G, Nicolas S, et al. Fibre-laser-pumped mid-infrared source[C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5620: 56-62.
- [2] Chuang T, Litvinovitch S, Engin D, et al. Compact, highly efficient, single-frequency 25 W, 2051 nm Tm fiber-based MOPA for CO₂ trace-gas laser space transmitter[C]//Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring, 2017.
- [3] Henderson S W, Hale C P, Magee J R, et al. Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 μm using Tm, Ho: YAG lasers [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(10): 773-775.
- [4] Li Z, Heidt A M, Daniel J M O, et al. Thulium-doped fiber amplifier for optical communications at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9289-9297.
- [5] Geng J, Wang Q, Jiang S. 2 μm fiber laser sources and their applications[C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8164(1): 3-14.
- [6] Shapiro B, Adhikari R X, Aguiar O, et al. Cryogenically cooled ultra-low vibration silicon mirrors for gravitational wave observatories [J]. *Cryogenics*, 2017, 81: 83-92.
- [7] Karlmann P B, Klein K J, Halverson P G, et al. Linear thermal expansion measurements of single crystal silicon for validation of interferometer based cryogenic dilatometer[C]//AIP Conference, 2006.
- [8] Driggers J C, Harms J, Adhikari R X. Subtraction of Newtonian noise using optimized sensor arrays [J]. *Physical Review D*, 2012, 86(10): 102001.
- [9] Zhang W N, Li C, Mo S P, et al. A compact low noise single frequency linearly polarized dbr fiber laser at 1550 nm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(8): 1028-1032.
- [10] Voo N Y. Development, characterisation and analysis of narrow linewidth, single-frequency DFB fibre lasers in the 1.5 μm -2 μm region[D]. Southampton, Hampshire, UK: University of Southampton, 2006.
- [11] Iwatsuki K, Okamura H, Saruwatari M. Wavelength-tunable single-frequency and single-polarisation Er-doped fibre ring-laser with 1.4 kHz linewidth [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(24): 2033-2035.
- [12] Geng J, Wu J, Jiang S, et al. Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(4): 355-357.
- [13] Yang Q, Xu S H, Li C, et al. A single-frequency linearly polarized fiber laser using a newly developed heavily Tm³⁺-doped germanate glass fiber at 1.95 μm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(9): 62-65.
- [14] Fu S, Shi W, Sheng Q, et al. Compact hundred-mW 2 μm single-frequency thulium-doped silica fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(11): 853-856.
- [15] Guan X, Yang C, Qiao T, et al. High-efficiency sub-watt in-band-pumped single-frequency DBR Tm³⁺-doped germanate fiber laser at 1950 nm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6817-6825.
- [16] Foster S B, Tikhomirov A E. Pump-Noise contribution to frequency noise and linewidth of distributed-feedback fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(5): 734-741.
- [17] Setzler S, Francis M P, Young Y E, et al. Resonantly pumped eyesafe erbium lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 645-657.
- [18] Xu D, Yang F, Chen D, et al. Laser phase and frequency noise measurement by Michelson interferometer composed of a 3 \times 3 optical fiber coupler [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22386-22393.