

基于四波混频效应的 1.5 μm 多波长单频光纤激光器 (特邀)

张 奕^{1,2}, 侯玉斌^{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 北京激光应用技术工程研究中心, 北京 100124)

摘要: 利用笔者自主搭建的双波长单频光纤激光器作为种子, 通过声光调制器以及多级光纤放大后, 将激光注入至 100 m 长的高非线性光纤中, 该光纤的零色散点在 1 550 nm 处。借助高非线性光纤的四波混频效应, 最终在峰值功率 13 W 的泵浦下获得了一系列新的光谱成分, 20 dB 范围内共产生了 46 条新光谱。这些光谱跨越了 1.337 THz, 并且每条光谱中只包含一个纵模。由于新光谱基于四波混频效应产生, 不同光谱之间不存在增益竞争等问题, 因此, 该激光器的多波长单频可以稳定存在, 并且光谱强度接近。该多波长单频光纤激光器不仅具有线宽窄、相干性高、噪声低等优势, 由于其还可以在全光纤结构下同时输出多个波长的单频激光, 这使得其在波分复用光通信、光频率转换、激光雷达、微波光子学等领域具有十分重要的应用。

关键词: 光纤激光器; 单频; 多波长; 四波混频

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220401

1.5 μm multi-wavelength single-frequency fiber laser based on four-wave mixing effect (*Invited*)

Zhang Yi^{1,2}, Hou Yubin^{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: Our self-built dual-wavelength single-frequency fiber laser was used as a seed, and after being amplified by an acousto-optic modulator and multi-stage fiber, the laser was injected into a 100-meter long high nonlinear fiber with the zero-dispersion point of at 1 550 nm. With the help of the four-wave mixing effect of the highly nonlinear fiber, a series of new spectral components were finally obtained under the pumping of the peak power of 13 W, and a total of 46 new spectra were generated in the range of 20 dB. These spectra spanned 1.337 THz and contained only one longitudinal mode in each spectrum. Since the new spectrum was generated based on the four-wave mixing effect, there was no gain competition between different spectra, so the multi-wavelength single-frequency of the laser can exist stably, and the spectral intensity was close to each other. The multi-wavelength single-frequency fiber laser not only has the advantages of a single-frequency fiber laser such as narrow linewidth, high coherence, and low noise, but also can simultaneously output multiple wavelengths of single-frequency lasers in an all-fiber structure, which makes it possible to have very important applications in the fields of multiplexing optical communication, optical frequency conversion, lidar, microwave photonics and so on.

收稿日期:2022-05-07; 修订日期:2022-05-27

基金项目:国家自然科学基金(61905006)

作者简介:张奕,男,硕士生,主要从事光纤激光器研制方面的研究。

导师简介:侯玉斌,男,副研究员,博士后,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: fiber laser; single-frequency; multiple wavelengths; four wave mixing

0 引言

作为激光技术与现代光电探测技术结合的先进探测技术,激光雷达在无人驾驶、环境监测等领域具有重要的应用价值^[1-2],用于产生探测信号的激光器作为激光雷达的重要组成部分一直是研究的重点。多波长单频光纤激光器不仅具备单频光纤激光器光束质量好,结构紧凑,线宽窄等优势,还可以同时输出多个波长的单频激光^[1],这些特点使其成为高精度激光雷达的理想光源。除了激光雷达以外,多波长单频光纤激光器在波分复用光通讯系统^[3]、微波光子学^[4]、太赫兹光谱学^[5]等领域有着广泛的应用。因而,高性能的多波长单频光纤激光器的研制也成为相关领域的研究热点。

串联谐振腔^[6]是最早被用于制作多波长单频光纤激光器的方法,该方法是通过串联多个单频激光谐振腔进而获得多波长单频激光输出。该方案避免了不同波长成分对上能级粒子的竞争,使得激光器得以长期稳定运行。然而,由于激光器输出波长与串联谐振腔的数量相关,且不同谐振腔产生的波长成分相干性不高,采用串联谐振腔的方法较为有限。

目前,另一个方法是在同一增益光纤中^[7-8]同时实现多波长单频激光输出。由于需要在同一增益介质内产生多个波长,这一方法对增益光纤的掺杂浓度和增益谱宽度都有较高要求。除此之外,还需要在腔内加入特定的波长选择元件,才能实现稳定的多波长输出。在实际操作中,除了使用法布里-珀罗滤波器^[9-10]等精密梳状滤波器^[11],也可使用多个光纤 Lyot-Sagnac 环^[10,12]或是窄带光纤光栅^[13-15]进行选频和滤波。由于所有波长来源于同一增益介质,这使得不同波长之间存在竞争,造成波长的不稳定性,同时受限于增益谱宽度,该方案使得多波长的宽度有限。

利用非线性效应^[16]实现多波长单频光纤激光器则可以有效解决增益谱宽度,以及增益竞争的问题。其基本原理是将获得的单/双频激光输出作为种子,借助非线性介质产生新的频率成分,进而获得多波长输出。这一过程中发挥作用的非线性效应一般是受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)^[17-18]或四波混频(four wave mixing, FWM)^[18-21]。河北工业大学的吕志伟课题组^[18]采用金刚石晶体作为非线性

介质,利用空间光腔实现布里渊光学频率梳振荡器,利用 SBS 与 FWM 获得了带宽 1.5 THz、最高 23 阶的 1.2 μm 光学频率梳。然而,该方案的阈值较高,达到了 50 W,产生的不同波长的强度差距较大,同时空间结构的使用也在一定程度限制了其应用。

鉴于 SBS 效应的阈值较高,并且泵浦光和斯托克斯光的强度差距较大等问题,借助高非线性光纤模场直径小、作用距离长等优势,利用该光纤中 FWM 效应来实现多波长单频的产生,可以有效减小新波长产生的阈值功率,并且光谱强度接近。为此笔者课题组利用保偏双波长单频光纤激光器作为种子光源,该光源的两个波长分别为 1552.2 nm 与 1552.43 nm,并且强度相近。再通过声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)强度调制与多级光纤放大器,获得具有一定峰值功率输出的双波长单频激光。最终将输出激光注入至一段长度为 100 m 的高非线性光纤中,该光纤在 1550 nm 处为零色散。借助光纤中的 FWM 效应最终在峰值功率 13 W 的情况下,在 20 dB 范围内产生了 46 个新的光谱成分,并且每个光谱均只包含一个纵模。光谱宽度跨越 1.337 THz,光谱信噪比达到 35 dB。笔者确信这一多波长单频光纤激光器可在激光雷达、太赫兹光谱学等领域发挥重要作用。

1 保偏双波长单频光纤激光器

文中的保偏双波长单频光纤激光器采用分布式布拉格反射(distributed Bragg reflection, DBR)结构,其中的低反光栅为笔者自主制备的保偏双波长光纤光栅。该光栅通过两次曝光的方式在同一段栅区形成两个反射波长,二者的中心波长差别为 0.23 nm,反射率约 85%。另外的高反双波长光纤光栅反射率 >99%,两个反射波长与低反光栅相匹配^[15]。谐振腔中的增益光纤为一段 5 cm 长的掺铈石英光纤(Nufern, PM-ESF-7/125),其吸收系数为 ~ 55 dB/m@1530 nm。为了防止端面反射,高反光栅的另一端被切割成 8°。该谐振腔最终被固定在具有恒温控制的热沉上,从而保证激光器的长期稳定运转。974 nm 单模半导体激光器作为泵浦源,经保偏波分复用器(wavelength division multiplexing, WDM)与激光谐振腔对接后对其进行反向泵浦。实验装置如图 1 所示。

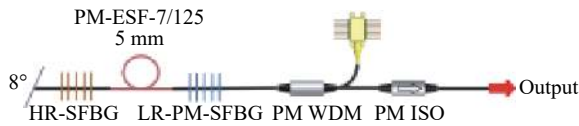


图 1 保偏双波长单频光纤激光器示意图

Fig.1 Schematic diagram of polarization-maintaining dual-wavelength single-frequency fiber laser

笔者利用一台光谱分析仪 (AQ6373, Yokogawa) 对该双波长单频激光器的输出光谱进行测量, 光谱仪设置的分辨率为 0.02 nm, 输出光谱如图 2 所示。激光输出的中心波长分别为 1552.2 nm 与 1552.43 nm, 间距 0.23 nm(相当于频域 28 GHz), 光谱信噪比约 60 dB。两个波长的光谱强度基本一致, 并且两个波长可以长时间稳定存在, 没有出现模式竞争现象。

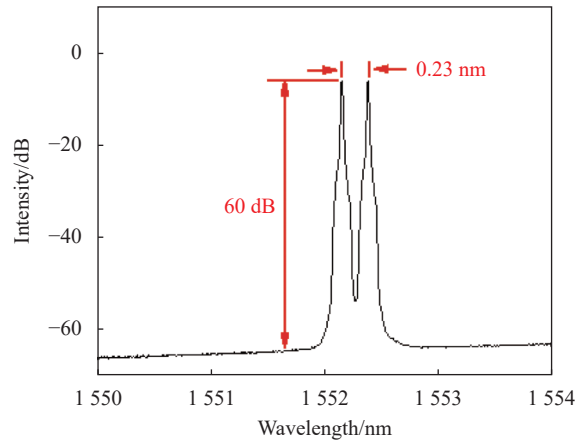


图 2 保偏双波长单频光纤激光器的光谱图

Fig.2 Spectrum of polarization-maintaining dual-wavelength single-frequency fiber laser

图 3 为扫描干涉仪 (Thorlabs, Model SA210-8 B) 测得的纵模的图像。该扫描干涉仪的自由光谱范围和分辨率分别为 10 GHz 和 67 MHz。通过图 3 可以观察到在一个扫描周期内只出现两个峰。由于两个纵模的频率间隔为 28 GHz, 扫描干涉仪的自由光谱范围为 10 GHz, 所以两个纵模在扫描干涉仪中的间隔应该约为 2 GHz, 这也与上图的情况相符。再结合输出光谱可知每个波长只存在一个纵模, 且纵模强度与光谱强度相对应。

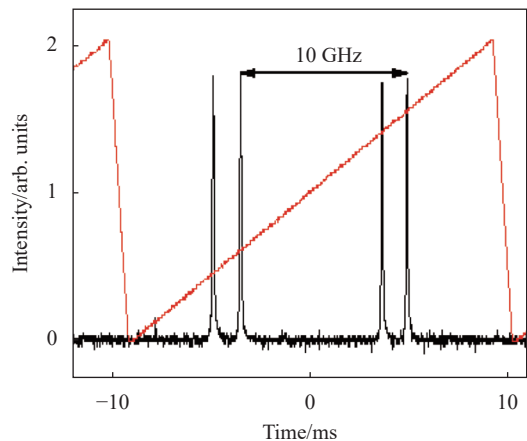


图 3 双波长单频光纤激光器的扫描干涉仪图像

Fig.3 Scanning interferometer image of dual-wavelength single-frequency fiber laser

用高速探头 (Finisar, XPDV2120 RA-VF-FP, Bandwidth > 50 GHz) 和频谱仪 (Agilent N9030 A PXA) 对两个纵模拍频产生的微波信号进行测量, 在频谱仪中观测到一个 28 GHz 左右的信号, 如图 4 (a) 所示。信号两边的边带是由弛豫振荡造成的。对该信号进行了 1 h

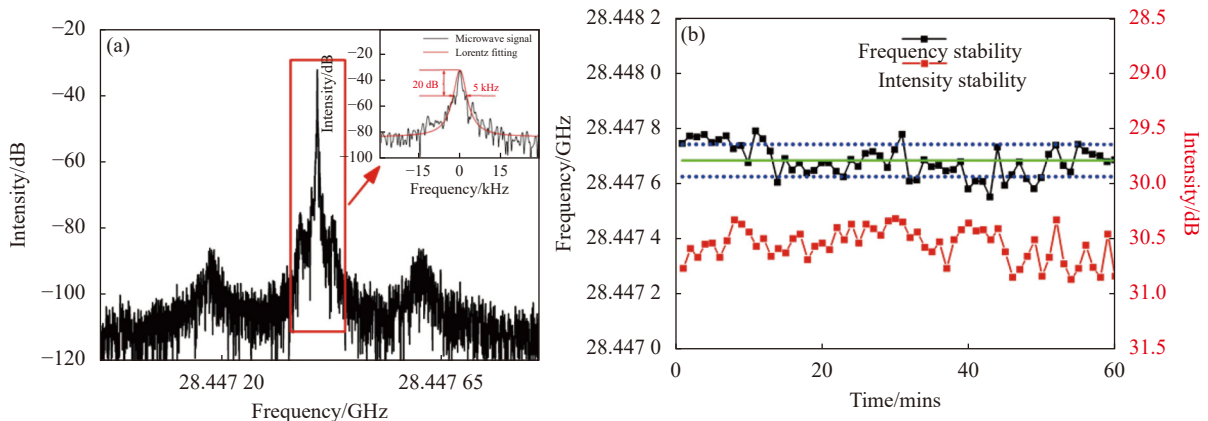


图 4 (a) 双波长单频光纤激光器拍频信号的频谱图; (b) 该拍频信号的中心频率以及强度稳定性的测量

Fig.4 (a) Frequency spectrum diagram of the beating signal of the dual-wavelength single-frequency fiber laser; (b) Stability measurement of the center frequency and the intensity of the beating signal

的测量, 信号中心频率的波动的均方差在 60 kHz 以内, 强度的波动在 0.52 dB 以内, 如图 4 (b) 所示^[15]。

2 多波长单频激光输出

在非线性光学领域, FWM 是一种常见的三阶非线性效应。当至少两束不同频率 ($\nu_1, \nu_2, \nu_1 < \nu_2$) 的光一同在非线性介质中传播时, 由于存在差频的折射率调制, 会产生如图 5 所示的两个新的频率分量, 分别为:

$$\nu_3 = \nu_1 - (\nu_2 - \nu_1)$$

$$\nu_4 = \nu_2 + (\nu_2 - \nu_1)$$

通过持续控制非线性介质长度与输入光功率, 则可以将 FWM 效应逐级传递, 进而产生更多的新频率成分。

笔者课题组采用双波长单频光纤激光器输出的 1552.2 nm 与 1552.43 nm 两个单频激光作为起始波长, 借助高非线性光纤中的级联 FWM 效应实现多波长单频产生。为了达到 FWM 效应所需的功率, 采用多级光纤放大器对其进行放大。由于放大过程中产生的自发辐射放大 (amplified spontaneous emission, ASE) 会在后期 FWM 过程中作为噪声严重影响输出光谱的信噪比以及新光谱成分的生成。为此在放大器最后需要添加一个滤波器来滤除多余的 ASE 成分。由于所采用的滤波器的损伤阈值仅为 300 mW, 在放大器中添加了一个 AOM 对激光的强度进行调制, 最终实现高功率、低平均功率的激光输出, 这样既可以保证 FWM 过程所需的功率, 同时还可以避免损伤滤波器。

光纤放大器的实验装置如图 6 所示。由保偏 DBR 光纤激光器输出的双波长单频激光通过保偏隔离器后, 通过一级纤芯放大器进行功率放大。纤芯放大器采用的增益光纤为 2 m 的 PM-ESF-7/125, 其吸收系数为~55 dB/m@1530 nm。作为泵浦的 974 nm 单模

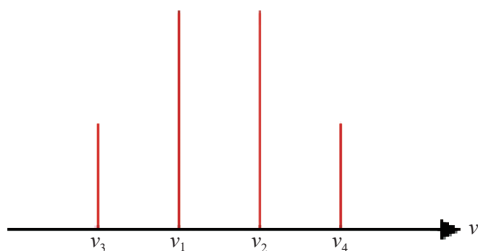


图 5 FWM 原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of four-wave mixing principle

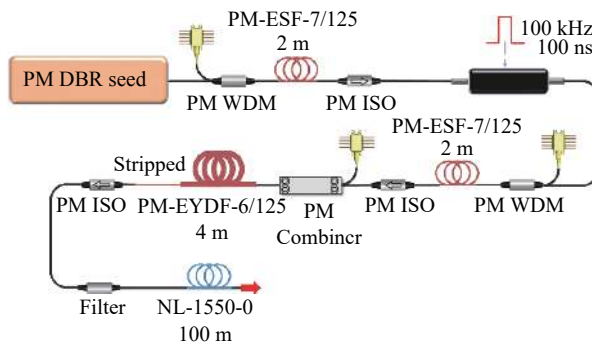


图 6 多波长单频光纤激光器实验示意图

Fig.6 Schematic diagram of multi-wavelength single-frequency fiber laser

半导体激光器最大输出功率为 1 W。继而, 利用 AOM 进行斩波, 将原本的连续光调制为重复频率 100 kHz, 脉宽 100 ns 的脉冲光。在 AOM 后再经过一级纤芯放大器与包层放大器。纤芯放大器的基本参数与前一级保持一致。而包层放大器则使用了 4 m 长的 PM-EYDF-6/125 作为增益光纤, 吸收系数为 40±10 dB/m@1535 nm, 泵浦源则采用中心波长 976 nm, 输出功率 9 W 的多模半导体激光器。放大器输出的激光经过滤波器滤除额外的 ASE 之后进入高非线性光纤, 文中采用的高非线性光纤为长飞公司的 NL-1550-0, 长度为 100 m, 光纤的零色散点在 1550 nm 处。

为了验证由高非线性光纤产生的新光谱成分的确是单频激光, 在包层放大器泵浦功率较低时, 利用光谱仪和扫描干涉仪对其光谱、纵模情况进行了测量, 所得结果如图 7 所示。图 7 (a) 为输出光谱图, 凭借效应 FWM, 输出光谱由原先的 1552.2 nm 和 1552.43 nm 处的两个波长扩展出了等间隔分布的两对新光谱成分。种子激光器产生的 1552.2 nm 与 1552.43 nm 处的光谱信噪比约为 50 dB, FWM 效应产生的第一对新光谱分量的信噪比约 40 dB, 产生的第二对新光谱分量的信噪比约 20 dB。图 7 (b) 为输出光谱的扫描干涉仪图像, 在一个扫描周期内同时出现四个纵模。对比输出光谱的情况可知, 由于扫描干涉仪图像显示的是线性坐标系下的光谱成分, 因此图中四个纵模分别对应光谱中的种子激光以及 FWM 产生的第一对光谱成分。FWM 产生的第二对光谱成分与种子相差 30 dB, 在线性坐标系下的扫描干涉仪图像中无法观察到这组光谱。因此, 通过对比光谱图和扫描干涉仪

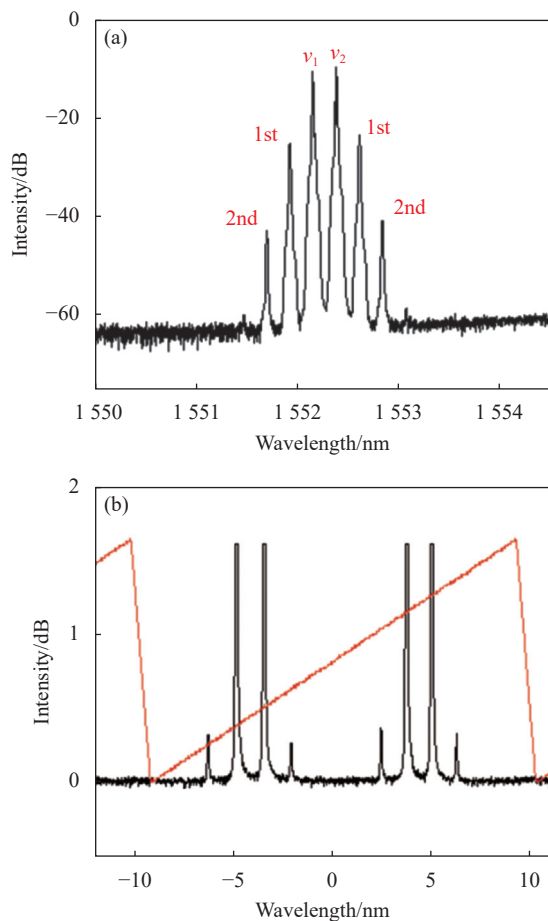


图 7 激光器运行状态测试。(a) 光谱图;(b) 扫描干涉仪图像

Fig.7 State test of laser operating. (a) Spectrum; (b) Scanning interferometer image

图像可知,通过 FWM 产生的新光谱成分依然是单频状态,并且间隔与种子光的间隔一致。随着泵浦功率的提升,基于泵浦激光产生的第一级光谱成分的轻度也会随之升高。第二级光谱成分的产生则是依赖于泵浦激光以及第一级光谱成分的一部分,例如,短波长处的第二级光谱是与 v_2 形成配对光子。随着泵浦光谱 v_1, v_2 能量的提升,第一级光谱成分会不断提高,同时 v_1, v_2 光谱成分分别与新产生的第二级光谱成分形成配对光子。这一系列过程都会不断消耗泵浦激光以及前级光谱的能量,对这些能量较强的光谱成分进行钳制。通过不断级联过程,最终使得产生的梳状光谱呈现平坦的趋势。

为了实现更多新光谱成分的产生,继续增加放大器的泵浦功率,最终获得了平均功率 130 mW 的双波长单频激光输出,对应的峰值功率为 13 W。同时对比了在进入高非线性光纤之前是否经过滤器对于

输出的梳状光谱的影响,如图 8 (a) 所示。通过对比可知,通过滤波器将泵浦激光器的 ASE 过滤之后,可以大幅提高梳状光谱光谱信噪比,同时产生更多的新光谱成分。经过滤波器之后的整体光的信噪比达到了 35 dB。在 20 dB 的光谱范围内,初始光谱 v_1, v_2 两侧分别产生 26 阶和 20 阶新的光谱成分,光谱跨越 1.337 THz。造成短波方向的光谱阶数高于长波方向的光谱阶数的主要原因在于所用高非线性光纤的零色散点在 1550 nm 处,初始激光的光谱在 1552 nm 附近,随着更高阶数光谱的产生,短波方向的光谱相较于长波方向的光谱更靠近光纤的零色散波长,这使得 FWM 效应在短波处产生更多的新光谱成分。图 8(b) 为图 8(a) 梳状光谱中 1549.5 nm 处 1 nm 范围内的放大部分,从该图中可以明显观察到各个波长的峰值处存在明显的缺失,这主要是由于实验所采用的光谱仪在高分辨率情况下的采样点数有限造成的,由此可以证明实际光谱强度的均匀性更好。

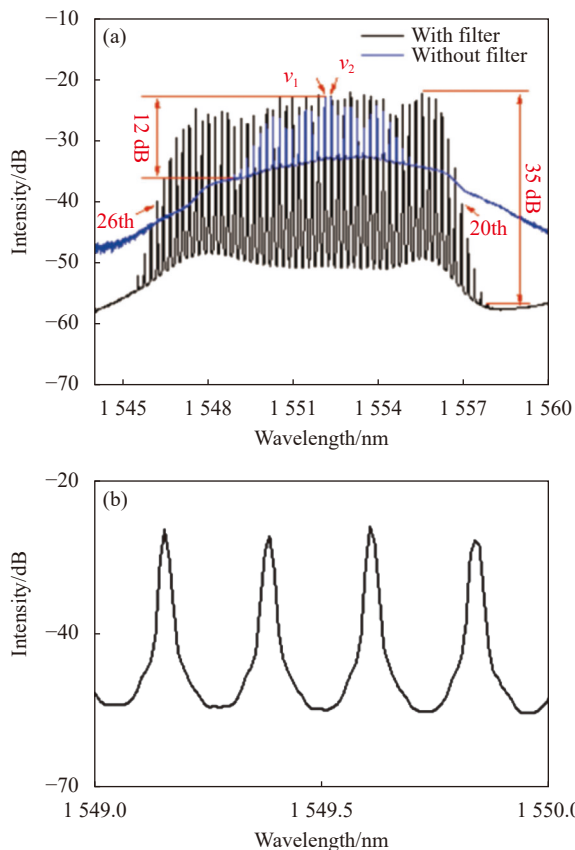


图 8 多波长单频激光的输出光谱。(a) 完整光谱;(b) 局部光谱分析

(a) Complete spectrum; (b) Partial spectrum analysis

由于该多波长单频光纤激光器的多波长单频是基于四波混频效应产生的,同时受到泵浦激光低相位噪声特性的影响,各个波长之间具有较低的相位噪声,因此该激光器在时域上是会形成类似于锁模激光器的输出特性,既产生脉冲输出,重频与纵模间隔一致。通过自相关仪对该激光器的输出脉冲进行测量,输出结果如图 9 所示。

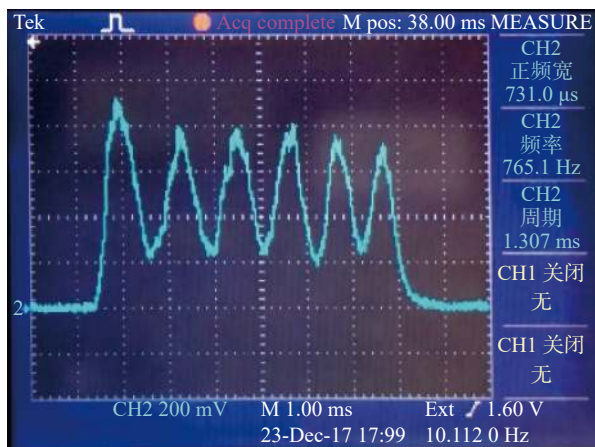


图 9 多波长单频激光器的自相关仪图像

Fig.9 Autocorrelator image of the multi-wavelength single-frequency laser

3 结 论

利用笔者课题组自主搭建的双波长单频光纤激光器作为种子,该激光器的两个中心波长为 1552.2 nm 和 1552.43 nm。通过 AOM 进行强度调制以及多级光纤放大后,将最终的输出激光注入至 100 m 长的高非线性光纤中,该光纤的零色散点在 1550 nm 处。借助高非线性光纤的 FWM 效应,最终在峰值功率 13 W 的泵浦下获得了一系列强度接近的新光谱成分,20 dB 范围内共产生了 46 条新光谱,这些光谱跨越了 1.337 THz,并且每条光谱中只包含一个纵模。因此,这一可稳定运转的多波长单频光纤激光器将在各类精密传感、光谱探测、太赫兹产生等领域产生重要的应用功能价值。

参考文献:

[1] Esmail M A, Ragheb A, Seleem H, et al. Radar signal transmission and switching over optical networks [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 385-388.

[2] Claus Weitkamp. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere[M]. New York: Springer Science & Business, 2006.

[3] Oh S H, Shin J U, Park Y J, et al. Multiwavelength lasers for WDM-PON optical line terminal source by silica planar lightwave circuit hybrid integration [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(20): 1622-1624.

[4] Jeon M Y, Kim N, Shin J, et al. Widely tunable dual-wavelength Er³⁺-doped fiber laser for tunable continuous-wave terahertz radiation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12291-12297.

[5] Shen G F, Zhang X M, Chi H, et al. Microwave/millimeter-wave generation using multi-wavelength photonic crystal fiber Brillouin laser [J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, 80: 307-320.

[6] Lu Z G, Grover C P. A widely tunable narrow-linewidth triple-wavelength erbium-doped fiber ring laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 17(1): 22-24.

[7] Shee Y G, Al-Mansoori M H, Ismail A, et al. Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing [J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 1699-1706.

[8] Ying L T S, Fat L T, Harun S W. Brillouin erbium ytterbium fiber laser[C]//2008 International Conference on Computer and Communication Engineering. IEEE, 2008: 143-147.

[9] Pan S, Lou C, Gao Y. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on inhomogeneous loss mechanism by use of a highly nonlinear fiber and a Fabry-Perot filter [J]. *Optics Express*, 2006, 14(3): 1113-1118.

[10] Yeh C H, Shih F Y, Chen C T, et al. Multiwavelength erbium fiber ring laser using Sagnac loop and Fabry-Perot laser diode [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 5(3): 210.

[11] Islam M S, Mohammad A B, Sikta J N, et al. Tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser incorporating single-core comb filter at room temperature [J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4268-4271.

[12] Rota-Rodrigo S, Ibañez I, López-Amo M. Multi-wavelength fiber laser in single-longitudinal mode operation using a photonic crystal fiber Sagnac interferometer [J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(3): 303-308.

[13] Li Kunyi. Research on 1.5-μm multi-wavelength single-frequency fiber laser [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)

[14] Wang Feng. Study on tunable Erbium-doped fiber laser based on superimposed fiber gratings [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016. (in Chinese)

- [15] Hou Y, Zhang Q, Qi S, et al. 1.5 μm polarization-maintaining dual-wavelength single-frequency distributed Bragg reflection fiber laser with 28 GHz stable frequency difference [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1383-1386.
- [16] Yuan Yijun. Study on multiwavelength Erbium-doped fiber laser based on nonlinear effects[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [17] Wang Gaomeng. Widely tunable watt-level single longitudinal mode and multi-wavelength Brillouin fiber laser[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [18] Zhenxu B, Hui C, Jie D, et al. High-power Brillouin frequency comb based on free-space optical cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0415001. (in Chinese)
- [19] Liu Y, Bursev S, Tsuda S, et al. Four-wave mixing in EDFAs [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(24): 2130-2131.
- [20] Xu Xiaochuan. Theoretical model of multiwavelength Erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [21] Wang Jiachen. Study on output characteristic of multi-wavelength Erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)