



波长可切换窄线宽单频掺镱光纤激光器 (特邀)

孟祥瑞 文瀚 陈浩伟 孙博 陆宝乐 白晋涛

Wavelength switchable and tunable single-frequency narrow linewidth ytterbium doped fiber laser (*Invited*)

Meng Xiangrui, Wen Han, Chen Haowei, Sun Bo, Lu Baole, Bai Jintao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220325>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采用双Sagnac环滤波器的可切换多波长光纤激光器

Switchable multi-wavelength fiber laser utilizing double Sagnac loop filter

红外与激光工程. 2020, 49(11): 20200047 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200047>

L波段可切换双波长高能量脉冲光纤激光器

L-band switchable dual-wavelength, high-energy pulsed fiber laser

红外与激光工程. 2021, 50(7): 20200370 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200370>

142 W高峰值功率窄线宽线偏振脉冲光纤激光器

142 W high peak power narrow-linewidth linearly polarized pulsed fiber laser

红外与激光工程. 2020, 49(4): 0405003 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0405003>

波长可切换可调谐耗散孤子锁模掺镱光纤激光器

Wavelength switchable and tunable dissipative soliton mode-locking Yb-doped fiber laser

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20200026 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200026>

基于45° 倾斜光栅的重复频率可切换被动谐波锁模光纤激光器

Passively harmonic mode-locked fiber laser with switchable repetition rate based on a 45° tilted fiber grating

红外与激光工程. 2018, 47(8): 803007 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0803007>

激光雷达用高性能光纤激光器

High-performance fiber lasers for LIDARs

红外与激光工程. 2017, 46(8): 802001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0802001>

波长可切换窄线宽单频掺镱光纤激光器 (特邀)

孟祥瑞^{1,3}, 文 瀚^{1,3}, 陈浩伟^{1,2,3}, 孙 博^{1,2,3}, 陆宝乐^{1,2,3*}, 白晋涛^{1,2,3}

(1. 西北大学 光子学与光子技术研究所 省部共建西部能源光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710127;

2. 国家级光电技术与纳米功能材料国际联合研究中心, 陕西 西安 710127;

3. 陕西省光电子技术重点实验室 陕西省全固态激光及应用工程研究中心, 陕西 西安 710127)

摘 要: 基于光纤环形激光器, 设计出由三端口环形器、偏振控制器、未泵浦保偏掺镱光纤和光纤布拉格光栅组成的滤波器件作为高精度滤波器对谐振腔内的模式个数进行抑制, 通过调谐偏振控制器, 在保偏掺镱光纤内形成的梳状光谱和动态光栅, 实现了窄线宽、单、双波长可切换单频掺镱光纤激光器。单波长运行时, 在 1064.37 nm 处测得激光器输出线宽 346 Hz, 光信噪比大于 50 dB, 30 min 内该激光器波长及功率的不稳定性均在 0.01 nm 和 0.2 dB 范围内。通过调节偏振控制器, 单波长和双波长可以实现互相切换, 双波长分别位于 1064.156 nm 和 1065.236 nm。该技术为超窄线宽激光器的双波长输出提供了新的途径。

关键词: 光纤激光器; 窄线宽; 可切换; 双波长

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220325

Wavelength switchable and tunable single-frequency narrow linewidth ytterbium doped fiber laser (*Invited*)

Meng Xiangrui^{1,3}, Wen Han^{1,3}, Chen Haowei^{1,2,3}, Sun Bo^{1,2,3}, Lu Baole^{1,2,3*}, Bai Jintao^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Photon-Technology in Western China Energy, Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. International Collaborative Center on Photoelectric Technology and Nano Functional Materials, Xi'an 710127, China;

3. Shaanxi Engineering Technology Research Center for Solid State Lasers and Application, Provincial Key Laboratory of Photo-electronic Technology, Xi'an 710127, China)

Abstract: Based on fiber ring lasers, we designed a single-wavelength and dual-wavelength switchable single-frequency ytterbium-doped fiber laser. A high-finesse filter was composed of a three-port circulator, an unpumped ytterbium-doped fiber and a fiber Bragg grating, which was used to suppress the number of modes in the resonator. By tuning polarization controller, comb spectra and dynamic gratings were formed within Polarization Maintaining Ytterbium Doped Fiber(PM-YDF) and realized the output of a single-frequency fiber laser with narrow linewidth. The output linewidth of the laser was 346 Hz at 1064.37 nm, and the optical signal-to-noise ratio was greater than 50 dB. The instability of wavelength and power was within 0.01 nm and 0.2 dB in 30 min.

收稿日期:2022-05-11; 修订日期:2022-05-20

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划 (18JS113)

作者简介:孟祥瑞,男,硕士生,主要从事单频光纤激光器及无纵模激光器方面的研究。

导师(通讯作者)简介:陆宝乐,男,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事超短脉冲光纤激光器、单频光纤激光器、光场调控、非线性光学器件和激光微纳加工制造等方面的研究。

By adjusting the polarization controller, the single and dual wavelengths could be switched to each other, and the dual wavelengths were located at 1064.156 nm and 1065.236 nm, respectively. This technology provides a new way for dual wavelength output of ultra-narrow linewidth lasers.

Key words: fiber laser; narrow linewidth; switchable; double wavelength

0 引言

单频光纤激光器是谐振腔内只有单一纵模进行振荡的光纤激光器,其激光输出具有线宽窄、噪声低、信噪比高,且散热性好、结构紧凑、易于集成等特点,使其在激光冷却、引力波探测、光通信、光纤传感和光谱学等领域均具有重要的应用前景^[1-4]。目前,常见的单频光纤激光器按腔型结构主要分为短直腔、环形腔和复合腔^[5-9]。相较于短直腔型结构的分布反馈式单频光纤激光器和分布布拉格反射式单频光纤激光器^[10-13],环形腔型和复合腔型单频光纤激光器由于具有较长的腔长,可更为灵活、方便地在谐振腔中引入各种结构的窄带滤波器件以实现单纵模振荡,且单频激光输出线宽更窄^[14-16]。双波长单频光纤激光器在差频产生太赫兹波、光学计量、激光雷达等领域则应用更为广泛。2014年, Yin Bin 等^[17]人通过在保偏光纤上刻写啁啾光栅作为滤波器件,实现了单、双波长可切换的单频激光输出,输出线宽分别为 325 Hz 和 355 Hz。2016年,朱涛等人^[18]利用两个级联光纤布拉格光栅当作滤波器,实现了波长间距为 20 nm 的双波长单频激光输出,两个波长的输出线宽均为 700 Hz,线宽波动范围在 30 Hz 内,光学信噪比为 60 dB。2019年, Feng T 等^[19]人采用复合腔结构,利用高反光纤布拉格光栅和三环偏振控制器相互作用产生强烧孔效应,获得了间距为 0.612 nm、线宽分别为 687 Hz 和 678 Hz 的单、双波长可切换单频激光输出。

文中采用在环形腔内引入高精度滤波器的结构实现了单、双波长可切换单频掺镱光纤激光器,实验中使用由三端口环形器 (Circulator, CIR)、偏振控制器 (Polarization Controller, PC)、未泵浦保偏掺镱光纤 (Polarization Maintaining Ytterbium Doped Fiber, PM-YDF) 和光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 组成的滤波器件作为高精度滤波器。利用该高精度滤波器中形成的驻波干涉效应和梳状谱,实现了单、双波长可切换单频光纤激光器。相比于利用未泵浦单模有源光纤或者 Lyot 滤波器^[20-21],文中所使用的滤

波器可以得到更窄线宽的激光输出。通过在光谱仪上长时间的观测发现,无论是单波长还是双波长,都具有良好的输出稳定性,且光学信噪比均大于 50 dB。采用延时自外差系统测得单波长单频光纤激光器的线宽为 346 Hz。

1 实验装置与原理

图 1 为单、双波长可切换单频光纤激光器的实验装置示意图。采用 480 mW 的 980 nm 单模尾纤输出半导体激光器作为泵浦源,泵浦光由 980/1060 nm 波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM) 耦合进入谐振腔内泵浦长度为 1.5 m 的高掺杂镱离子增益光纤 (Ytterbium-doped Fiber, YDF, LIEKKI Yb1200-4/125); 增益光纤与中心波长为 1064 nm 的环形器 (Circulator, CIR) 1 端口连接,环形器 2 端口与长度为 0.9 m 保偏掺镱光纤 (Polarization Maintaining Ytterbium Doped Fiber, PM-YDF, Coractive PM-Yb 401-4/125) 相连接,在其另一端连接一带宽约为 2 nm 的高反光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG, 反射率大于 99%)。偏振控制器 (Polarization Controller, PC)、0.9 m 保偏掺镱光纤和带宽为 2 nm、反射率大于 99% 的 FBG 组成高精度滤波器,高精度滤波器对谐振腔内模式个数进行抑制,实现对谐振腔内单纵模的选取。环形器 3 端口与 1×2 的耦合器 (Optical Coupler, OC, 分光比为 10:90) 一端相连接,耦合器另一端的 90% 端口与 WDM 的一端连接形成单频光纤激光器环形腔结构,所产生的单频激光由耦合器的 10% 端口输出,整个谐振腔长约为 9.5 m,对应纵模频率间隔约为 21.7 MHz。

环形器的 2 端到 1 端、3 端到 2 端有大于 45 dB 的隔离度作用,确保光在谐振腔内的传输过程保持单向传输。同时,也能进一步阻止经过 1.5 m 高掺杂镱离子增益光纤的 980 nm 残余泵浦光进入 PM-YDF,使得 PM-YDF 不被泵浦。FBG 反射回来的光再次进入 PM-YDF 与入射光形成驻波干涉效应;驻波处波腹

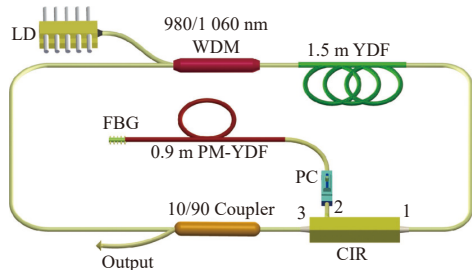


图 1 单频掺镱光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-frequency ytterbium doped fiber laser

与波节的光强呈周期性分布从而引起折射率周期性变化, 最后在末泵浦的 PM-YDF 中形成了动态光栅。该动态光栅具有极窄的反射带宽, 同时具有中心波长自适应的特性, 可以有效地抑制跳模现象。

整个滤波器中 PM-YDF 形成动态光栅的反射率的半高全宽 (Full Width at Half Maxima, FWHM) 的表达式为^[21]:

$$\Delta\lambda = \frac{C}{\lambda} \kappa \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2nL_g}\right)^2} \quad (1)$$

式中: n 、 λ 、 Δn 、 L_g 分别为光纤折射率、入射光波长、折射率差和 PM-YDF 的长度; 其中 $\kappa = 2\Delta n/(\lambda n)$ 为动态光栅的耦合系数。图 2 为反射带宽与 L_g 和 Δn 的变化趋势, Δn 与输入进 PM-YDF 的光功率或泵浦光强度有关。反射带宽随 PM-YDF 的加长和 Δn 的减小而变小。图中曲线上标记的是实验中选取的 PM-YDF 的长度 L_g 和折射率 Δn 变化。在该实验中, 结合理论与实验测试结果, 最终选取 PM-YDF 的长度为 0.9 m、对应的折射率差 Δn 为 1.39×10^{-7} 。

另外, PM-YDF 的双折射效应与 FBG 共同作用下可以产生梳状谱 (周期性透射光谱), 如图 3(a) 所示。通过旋转 PC 改变光路中的总相移量, 不仅梳状光谱的透射系数会随之变化, 而且梳状光谱的透射曲线整体也会发生相应的波长平移。实验中, 当梳状谱透射曲线的透射峰处于 FBG 反射带宽内时, 则在该透射峰对应的波长处会产生单一波长激光振荡输出。通过调谐 PC 使得梳状谱曲线的透射峰在 FBG 反射带宽内发生移动, 则可在 FBG 反射带宽范围内实现单波长调谐输出。当梳状谱曲线透过率最小位置 (即透过率曲线波谷位置) 处于 FBG 反射带宽中心位置附近时, 该光纤激光器则有可能在如图 3(b) 中

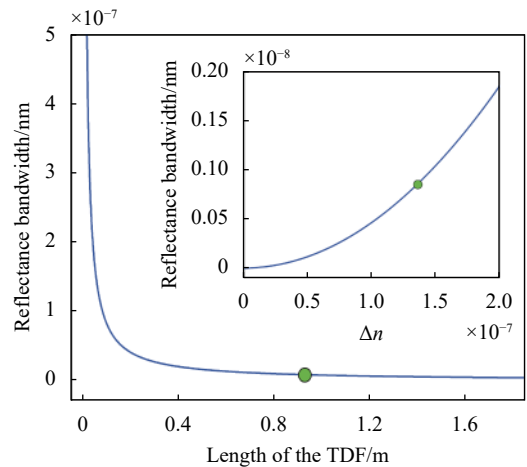
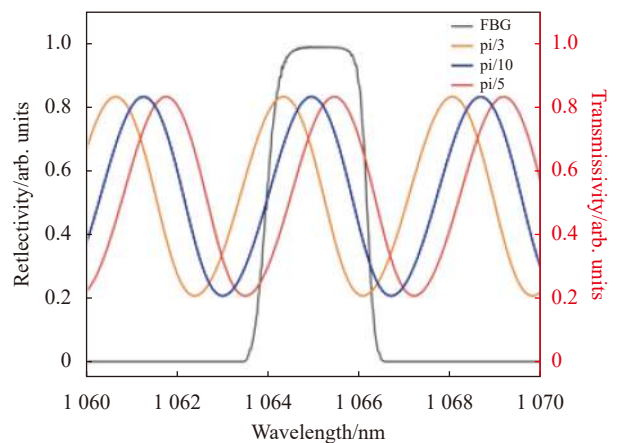


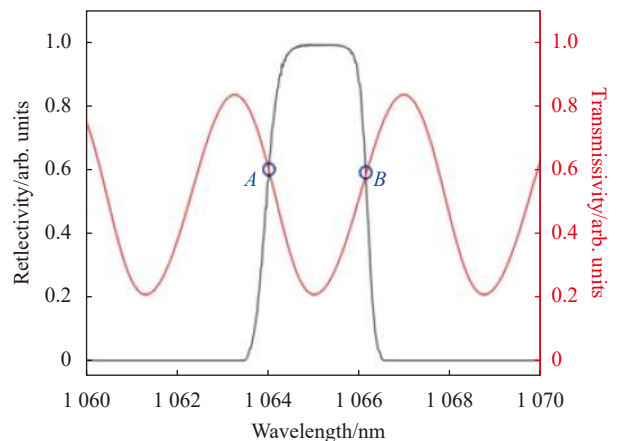
图 2 动态光栅的反射带宽随 PM-YDF 长度和折射率差的变化

Fig.2 Variation of reflection bandwidth of dynamic grating with PM-YDF length and refractive index difference



(a) FBG 反射带宽内单波长模拟图

(a) Simulation diagram of single wavelength in FBG reflection bandwidth



(b) FBG 反射带宽内双波长模拟图

(b) Simulation diagram of double wavelength in FBG reflection bandwidth

图 3 梳状光谱滤波数值模拟图

Fig.3 Numerical simulation of comb spectral filtering

A、B 两点处实现双波长激光振荡输出。

为了对理论分析结果进行验证,搭建如图 4 所示的检测装置对梳状光谱的特性进行验证,此检测光路采用 980 nm 半导体激光器作为泵浦源,经过 980/1 060 nm WDM 与增益光纤连接,经过掺镱光纤中镱离子增益放大后产生自发辐射光,经过 CIR1 端进入 2 端后的 PM-YDF 光进入光纤全反镜,返回 2 端后从 CIR3 端射出,输出端连接光谱仪进行测量。

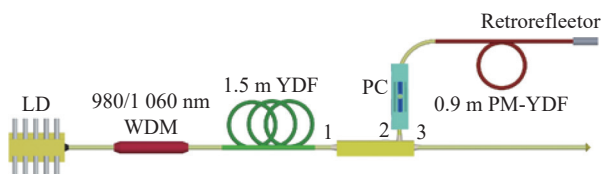
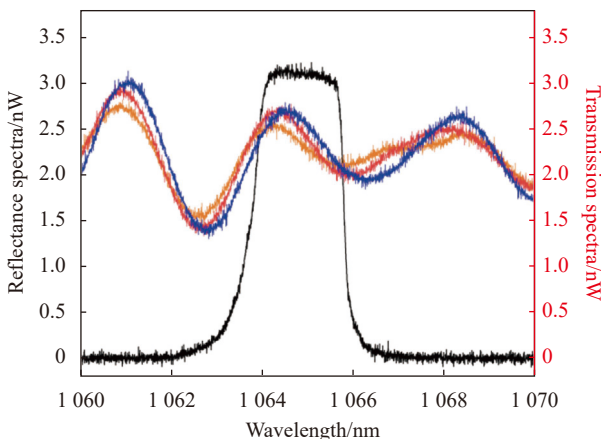


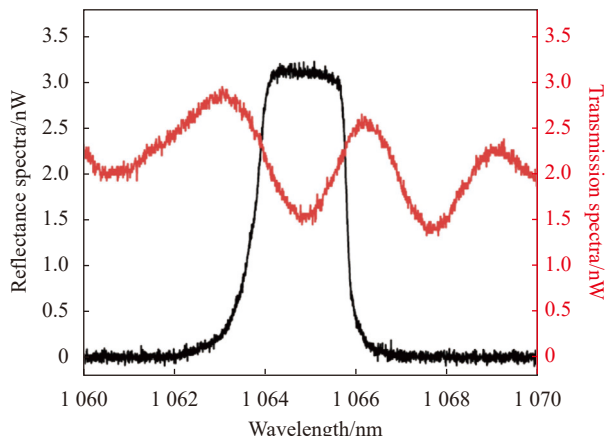
图 4 梳状光谱检测装置图

Fig.4 Diagram of the comb spectroscopy detection device

在泵浦功率为 250 mW 时,对检测装置输出端的光信号进行采集,图 5 为采集的光谱信号。光谱周期为 3.8 nm,与理论分析结果近乎吻合。在对 PC 进行旋转时,由于 PC 会对光纤进行一定的挤压,导致挤压点与其余段的单模光纤的应力分布不同,从而改变接触点的折射率分布。因此,在对 PC 旋转挤压操作时,使整个输出光谱如图 5 产生一定量的相移。图 5 中黑色的几字型曲线为 FBG 实测的反射带宽,如图 5(a) 所示,当梳状谱透射峰落在 FBG 反射带宽内,此时输出激光处于单波长输出状态;继续转动 PC,使梳状谱波谷位置移动至 FBG 反射带宽中心附近时,如图 5(b) 所示,则此时输出的激光为双波长状态。



(a) FBG 反射带宽内实现单波长输出图
(a) Output spectrogram of single wavelength in FBG reflection bandwidth



(b) FBG 反射带宽内实现双波长输出图
(b) Output spectrogram of double wavelength in FBG reflection bandwidth

图 5 FBG 反射带宽与梳状光谱的实测图

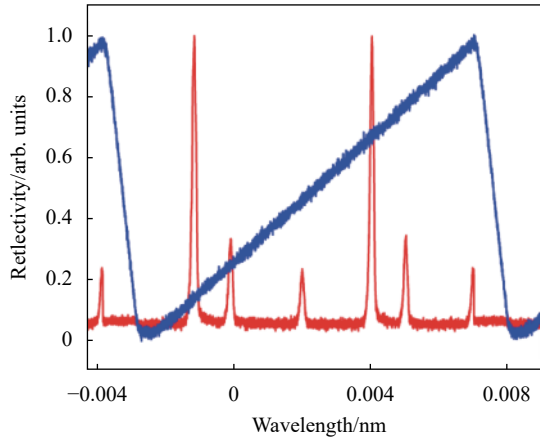
Fig.5 Measured graph of FBG reflectance bandwidth versus comb spectrum

2 实验结果与讨论

2.1 单波长单频激光输出特性

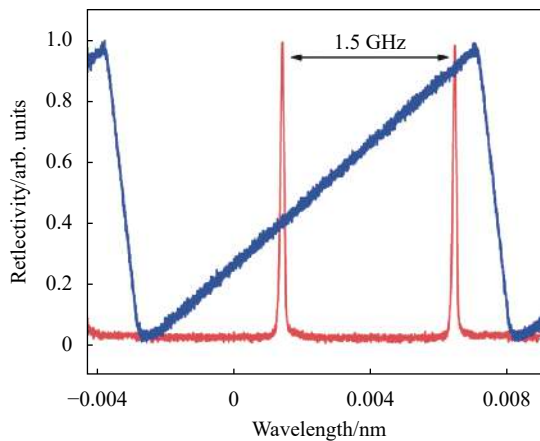
实验中,首先在环形器 2 端口与 FBG 之间未加入 PM-YDF,利用扫描法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Pérot Interferometer, FPI, Thorlabs-SA200-8 B) 检测了该光纤激光器在泵浦功率为 160 mW 时的输出纵模特性,如图 6 所示。该扫描 F-P 干涉仪的自由光谱范围和分辨率分别为 1.5 GHz 和 7.5 MHz。从图 6(a) 中可以看出,在没有 PM-YDF 状态下,由于无法形成驻波干涉效应,无法形成动态光栅所产生的滤波效应,除 FBG 外再无滤波装置,故激光输出的是多纵模状态。当在腔内加入 PM-YDF 后,通过调谐 PC,在 PM-YDF 内形成的梳状光谱和动态光栅共同作用的情况下(即图 3(a) 情况时),使得在光纤激光器谐振腔中形成了单纵模振荡输出,如图 6(b) 所示。通过长时间运转观察,始终能保持稳定的单纵模输出,没有任何模式跳跃和模式竞争现象,说明该激光器处于稳定单频激光输出状态。

图 7 是该单频激光器泵浦功率与输出功率的关系曲线,激光器振荡阈值为 76 mW,激光器输出激光处于单频运转,泵浦功率增大到 236 mW 时,激光仍然以单频状态输出;继续增加泵浦功率则会出现其他纵模。这说明此时 PM-YDF 中所形成的稳定光栅已经消失。



(a) 无 PM-YDF 多纵模振荡模式

(a) Multiple-longitudinal-mode oscillation without PM-YDF



(b) 加入 PM-YDF 实现单纵模振荡模式

(b) Single-longitudinal-mode oscillation in the presence of PM-YDF

图 6 F-P 干涉仪测量的纵向模式振荡

Fig.6 Longitudinal mode oscillation measured by F-P interferometer

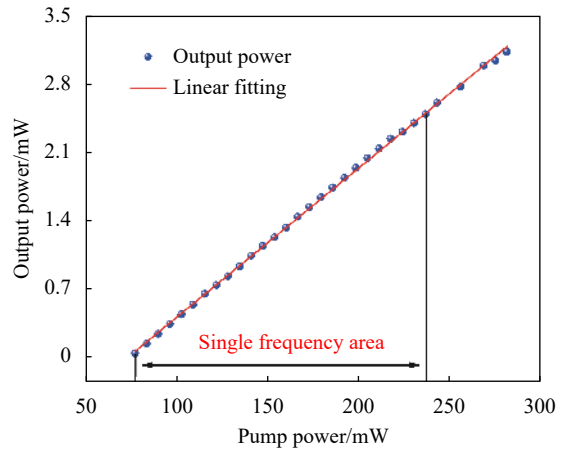
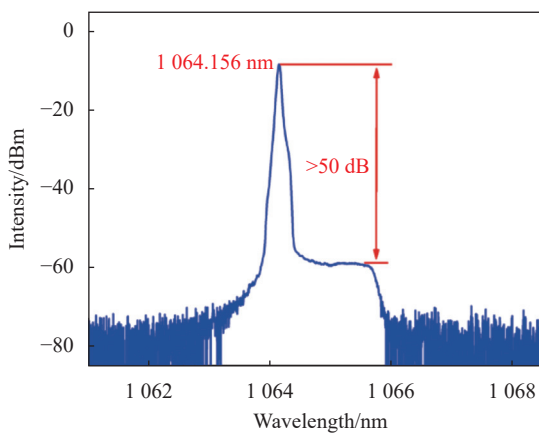


图 7 泵浦功率与激光器输出功率曲线图

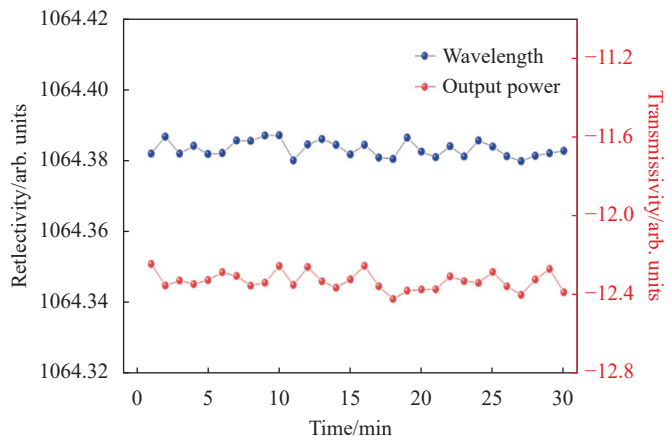
Fig.7 Pump power and laser output power curve

图 8(a) 与图 8(c) 为通过光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA, AQ6370 C, 分辨率为 0.02 nm) 测量在泵浦功率为 160 mW 时单频激光的输出光谱。通过旋转 PC, 使梳状光谱进行移动 (如图 5(a) 所示), 可使激光器输出的中心波长进行切换。输出光谱的中心波长分别为 1064.156 nm 和 1065.236 nm, 从图中可以看出, 该激光器的两个波长的信噪比都大于 50 dB, 下沿产生的波包是由于保偏光纤在光路中产生梳状谱导致的。图 8(b) 和图 8(d) 为通过 OSA 对该单频光纤激光器的两个波长和功率的稳定性测量, 30 min 内该激光器的两个波长及功率的不稳定性均在 0.01 nm 和 0.2 dB 范围内, 此波动主要是由实验环境和条件引起的微小波动, 如果在实验光路中加入温控器件, 可以更好地提高激光器输出的稳定性。



(a) 1064.156 nm 输出光谱图

(a) Wavelength of 1064.156 nm output spectrogram



(b) 1064.156 nm 中心波长和输出功率稳定性图

(b) Center wavelength and output power stability of 1064.156 nm

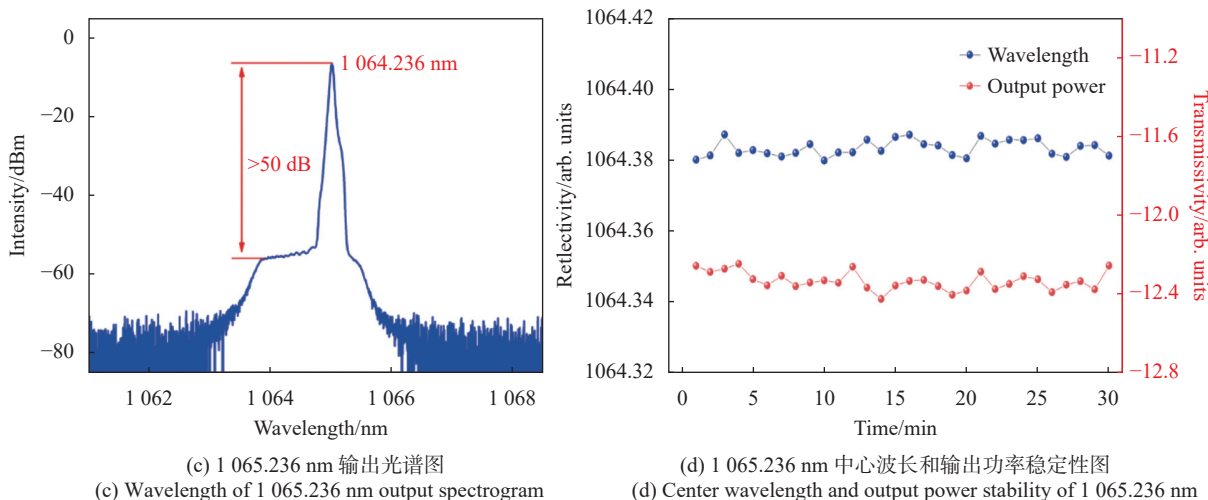


图 8 单频激光器光谱图及稳定性

Fig.8 Spectrum diagram and stability of single-frequency laser

利用自行搭建的基于延迟自外差方法的线宽测量装置对单频光纤激光器的输出线宽进行了测量。该延迟自外差法装置中延迟光纤的长度为 30 km, 利用声光频移器 (Gooch S-M150-0.4 C2 G-3-F2 S) 将拍频信号频移至 150 MHz, 利用频谱分析仪 (KEYSIGHT N9000 A) 采集由光电二极管探测器 (DET08 CFC/M) 探测到的拍频信号。图 9 所示为泵浦功率为 200 mW

时单频激光器输出两个波长的线宽, 图 9(a) 与图 9(b) 激光波长分别为 1064.156 nm 和 1065.236 nm 的延迟自外差频谱 (黑线) 和经过洛伦兹拟合得到曲线 (红线)。从图中可以看出, 在低于拍频信号峰值的 20 dB 处的线宽为 6.92 kHz 以及 7.26 kHz, 相应的光谱半宽为 346 Hz 和 363 Hz。

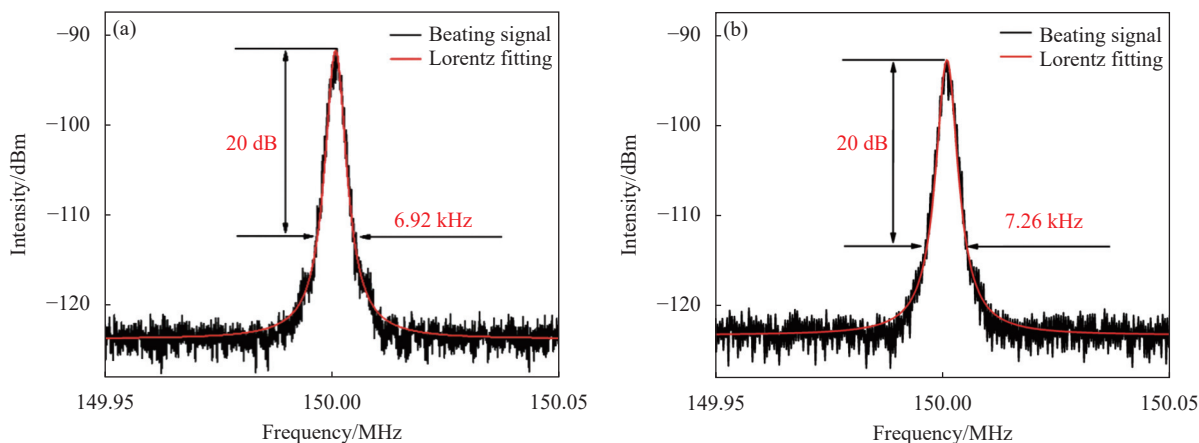


图 9 延迟自外差法测量的线宽

Fig.9 Linewidth measured by the delayed autoheterodyne method

2.2 双波长单频激光输出特性

当旋转 PC, 使得 PM-YDF 中形成的梳状光谱与 FBG 反射谱的相对位置如图 5(b) 所示时, 此时单频光纤激光的波长输出状态可以由单波长变为双波长, 如图 10(a) 所示。双波长的输出光谱分别为 1064.156 nm 和 1065.236 nm, 两中心波长间隔为 1.08 nm, 且光信

噪比 (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR) 均大于 50 dB。与单波长监测方法一样采用扫描 F-P 标准具测量双波长单频输出信号的特征, 通过扫描 F-P 标准具和示波器相结合观察到双波长单频激光的输出状态如图 10(b) 所示。

30 min 内通过 OSA 来观察双波长单频光纤激光

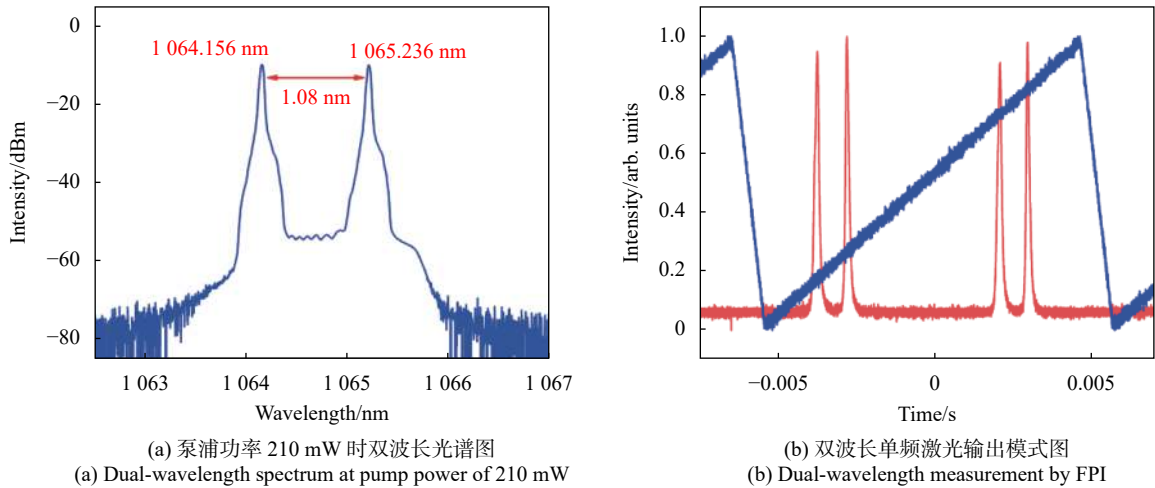


图 10 双波长单频光纤激光器的测量

Fig.10 The measurement of dual-wavelength single-frequency fiber laser

器输出状态下的中心波长以及输出功率的稳定性, 如图 11 所示。双波长光谱波动如图 11(a) 所示, 1064.156 nm 波长 (蓝色) 较稳定没有发生改变, 1065.156 nm 波长 (红色) 在 0.076 nm 范围内波动。主要是由于实验环境引起的, 双波长功率稳定性如图 11(b), 波长为 1064.156 nm (蓝色) 的功率在 0.60 dB

范围内波动, 波长为 1065.236 nm (红色) 的功率波动范围为 0.56 dB, 激光输出功率与受激发射截面有关, 不同波长的受激发射截面不同, 所以两个波长的功率大小与波动是不一样的。实验结果表明, 激光器在室温条件下较为稳定, 可应用于微波信号发生器。

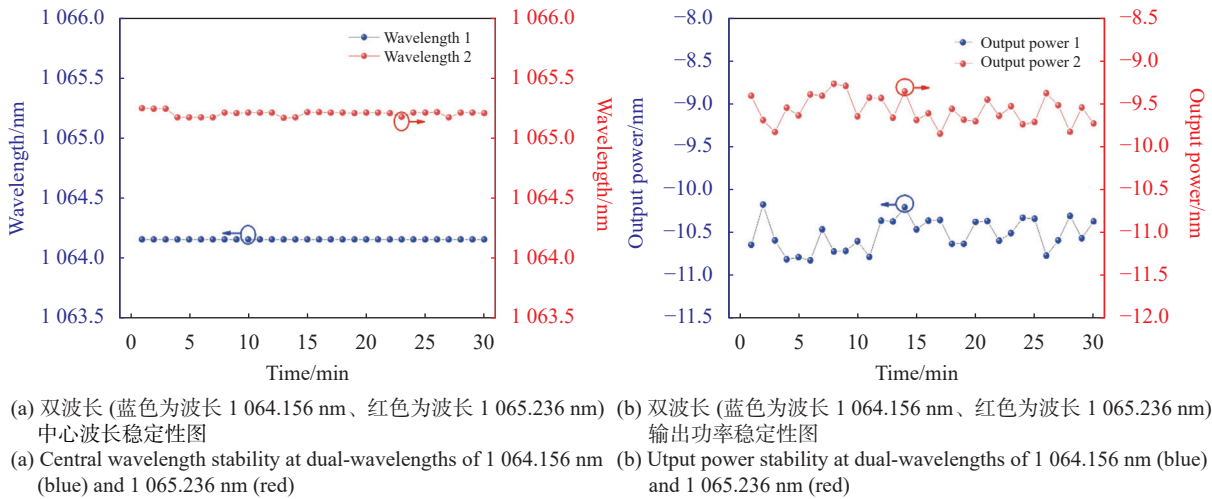


图 11 双波长单频光纤激光器的波长波动及功率稳定性

Fig.11 Wavelength fluctuation and power stability of dual-wavelength single-frequency fiber laser

3 结 论

文中提出了一种由三端口环形器、偏振控制器、未泵浦保偏掺镱光纤和光纤布拉格光栅组成的滤波器, 通过该滤波器对谐振腔内的模式进行抑制, 从而实现了窄线宽单、双波长可切换单频光纤激光器。实

验采用 980 nm 半导体激光器作为泵浦源, 掺镱光纤在谐振腔内分别作为增益介质和未泵浦可饱和吸收体, 结合三端口环形器光隔离的作用保证激光在腔内单向传输, 成功实现了单波长和双波长稳定的单频窄线宽激光输出, 在泵浦功率为 200 mW 时, 处于单波长运行, 单波长输出测得激光器输出的最窄线宽为

346 Hz, 光信噪比大于 50 dB。通过调节偏振控制器, 实现了单波长和双波长的互相切换, 在双波长输出时整体输出情况较为稳定。为窄线宽单、双波长单频光纤激光器的实现方式提供了新的途径。

参考文献:

- [1] Buikema A, Jose F, Augst S J, et al. Narrow-linewidth fiber amplifier for gravitational-wave detectors [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3833-3836.
- [2] Rapol U D, Krishna A, Wasan A, et al. Laser cooling and trapping of Yb from a thermal source [J]. *European Physical Journal D*, 2004, 29(3): 409-414.
- [3] Li S H, Wang Q, Song R, et al. Laser diode pumped high-energy single-frequency Er: YAG laser with hundreds of nanoseconds pulse duration [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 40-44.
- [4] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. Progress in lunar laser ranging tests of relativistic gravity [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(26): 261101.
- [5] 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)
- [6] 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.
- [7] Loh W H, Samson B N, Dong L, et al. High performance single frequency fiber grating-based erbium/ytterbium-codoped fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(1): 114-118.
- [8] Mo S, Huang X, Xu S, et al. 600-Hz linewidth short-linear-cavity fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5818-5821.
- [9] Yuan L M, Lu B L, Kang J, et al. Narrow-linewidth single-frequency ytterbium-doped fiber laser at 1 083 nm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 0814003. (in Chinese)
- [10] Wang L, Cao Y, Wan M, et al. Tunable single-frequency fiber laser based on the spectral narrowing effect in a nonlinear semiconductor optical amplifier [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29705-29713.
- [11] Paschotta R, Nilsson J, Reekie L, et al. Single-frequency ytterbium-doped fiber laser stabilized by spatial hole burning [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(1): 40-42.
- [12] Yin F, Yang S, Chen H, et al. 60-nm-wide tunable single-longitudinal-mode ytterbium fiber laser with passive multiple-ring cavity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(22): 1658-1660.
- [13] Li Y, He Y, Cai Y, et al. Black phosphorus: broadband nonlinear optical absorption and application [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(2): 025301.
- [14] Zhang J, Sheng Q, Zhang L, et al. 2.56 W single-frequency all-fiber oscillator at 1720 nm [J]. *Advanced Photonic Research*, 2022, 3(2): 02100256.
- [15] Ahmad H, Muhammad F D, Chang H P, et al. Dual-wavelength fiber lasers for the optical generation of microwave and terahertz radiation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 166-173.
- [16] Kim R K, Chu S, Han Y G. Stable and widely tunable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for optical beat frequency generation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(6): 521-523.
- [17] Yin B, Feng S, Liu Z, et al. Tunable and switchable dual-wavelength single polarization narrow linewidth SLM erbium-doped fiber laser based on a PM-CMFBG filter [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22528-22533.
- [18] Zhu T, Zhang B, Shi L, et al. Tunable dual-wavelength fiber laser with ultra-narrow linewidth based on Rayleigh backscattering [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1324-1330.
- [19] Feng T, Wang M, Wang X, et al. Switchable 0.612 nm-spaced dual-wavelength fiber laser with sub-kHz linewidth, ultra-high osnr, ultra-low rin and orthogonal polarization outputs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3173-3182.
- [20] Lemieux J F, Bellemare A. Step-tunable (100 GHz) hybrid laser based on Vernier effect between Fabry-Perot cavity and sampled fibre Bragg grating [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(11): 904-906.
- [21] Kang Z, Jin U K. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14173-14179.