

基于 MMI 滤波器的可调谐连续光全光纤 OPO

唐 钊^{1,2}, 张钧翔^{1,2}, 付士杰^{1,2}, 白晓磊^{1,2}, 盛 泉^{1,2}, 史 伟^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

- (1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;
2. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 在连续光全光纤光学参量振荡器(FOPO)中, 目前主要利用可调滤波器(TBPF)等高插入损耗的滤波器件进行边带光输出波长的调谐, 这种方式所引起的高环形腔损耗限制了 FOPO 输出性能的进一步提升。为解决此问题, 提出了基于多模干涉(MMI)滤波器的低腔损耗可调谐连续光 FOPO。通过选取不同长度和纤芯尺寸的多模光纤制作级联单模-多模-单模光纤(SMS)作为滤波器件, 使其在选定波长处的插入损耗小于 1 dB, FOPO 环形腔的总损耗不大于 5 dB, 并通过对 SMS 器件施加轴向拉力的方式调节滤波器件的透射谱, 实现了 1 494~1 501 nm 和 1 638~1 629 nm 范围内的双边带可调谐连续光输出。

关键词: 光纤光学参量振荡器; 四波混频; 多模干涉效应; 损耗

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0520002

Tunable CW all-fiber optical parametric oscillator based on the multimode interference filter

Tang Zhao^{1,2}, Zhang Junxiang^{1,2}, Fu Shijie^{1,2}, Bai Xiaolei^{1,2}, Sheng Quan^{1,2}, Shi Wei^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

- (1. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology(Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: High insertion loss filter components like tunable bandpass filters(TBPF) are commonly used to tune the sideband output wavelengths in continuous-wave (CW) all-fiber optical parametric oscillators (FOPO). Aiming at reducing the high ring-cavity loss mainly caused by the insertion-loss of the bandpass filter, a low cavity-loss tunable CW FOPO based on multimode interference (MMI) filter was proposed. Cascaded single-mode-multimode-single-mode (SMS) fiber devices were fabricated as filter devices by selecting multimode fibers with different lengths and core-sizes. And their insertion-losses at selected wavelengths were less than 1 dB, and the total losses of the FOPO ring cavity were not more than 5 dB. By applying an axial pulling force to the SMS device to adjust the transmission spectrum of the filter device, the double-sideband output wavelengths could be tunable in the range of 1 494–1 501 nm and 1 638–1 629 nm.

Key words: fiber optical parametric oscillator; four-wave mixing; MMI; loss

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2019-01-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0104603); 国家自然科学基金(61335013)

作者简介: 唐钊(1994-), 男, 硕士生, 主要从事光纤激光器方面的研究。Email: jefftang@tju.edu.cn

导师简介: 史伟(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高性能大功率光纤激光器、非线性光学和太赫兹光子学方面的研究。

Email: shiwei@tju.edu.cn

0 引言

相较于传统的光纤激光器^[1-2],基于四波混频(FWM)效应的光纤光学参量振荡器(FOPO)可以突破现有掺杂离子发射谱的限制,实现新的激光发射波长,在近几年来吸引了人们巨大的研究兴趣。特别是可调谐连续光全光纤 OPO,在高分辨率光学相干断层成像^[3]和受激拉曼散射显微镜^[4]等方面均有很大的应用前景。

早期的连续光 FOPO 采用线性腔结构^[5],但由于光纤布拉格光栅(FBG)的输出波长固定,无法实现可调谐波长连续光输出。因此,在之后的研究中主要选择采用环形腔结构,通过在环形腔中加入级联波分复用器(WDM)与可调滤波器(TBPF)等滤波器件来实现可调谐波长连续光输出^[6-8]。2009年^[6],Zhengqian Luo 等人运用腔内泵浦结构,实现了 1 540~1 555 nm 的小范围可调谐输出,TBPF 插入损耗为 4 dB。同年^[7],Sigang Yang 等人运用双环形腔结构,利用两个环形腔将两个参量过程的边带光分别反馈回高非线性光纤(HNLF),实现了从 1 530~1 554 nm 和 1 568~1 582 nm 的可调谐双边带输出,整个环形腔损耗大于 10 dB,其中 TBPF 插入损耗为 5 dB。2014年^[8],R. Malik 等人通过在环形腔中加入大范围可调的 TBPF,实现了从 1 463~1 530 nm 和 1 595~1 674 nm 的宽范围可调谐双边带输出,整个环形腔损耗为 9.8 dB,其中 TBPF 插入损耗为 5 dB。通过加入可调滤波器件的方法可以在 FWM 效应较宽的增益谱中选择边带光的输出波长,但是由于现有的 TBPF 等滤波器件的插入损耗较大,使得整个 FOPO 环形腔损耗较大,成为了限制 FOPO 输出性能进一步提高的一大要素。

在文中,提出了在连续光 FOPO 中利用基于多模干涉(MMI)效应的单模-多模-单模光纤(SMS)器件来实现可调谐波长输出。相较于 TBPF 等可调滤波器件,SMS 器件具有制作方便,价格低廉,透射峰处的透射损耗低等优点^[9],可以显著降低 FOPO 环形腔的损耗。最终实现了在 1 494~1 501 nm 和 1 638~1 629 nm 范围内双边带可调谐输出,其中级联 SMS 器件在选定波长处的滤波损耗保持在 1 dB 以下,环形腔损耗不大于 5 dB。

1 SMS 器件的调谐性滤波特性

SMS 器件是通过将一定长度的阶跃折射率多模光纤(MMF)熔接在两段单模光纤(SMF)中间制作而成的,其结构如图 1(a)中所示。在此基础上,将多模光纤熔接点两侧的单模光纤放置在三维调整架的光纤夹具中,一端固定不动,在另一端微调三维调整架向外拉动一定距离对中间的多模光纤施加轴向拉力,以实现 SMS 器件的小范围调谐滤波特性,其结构如图 1(b)中所示。

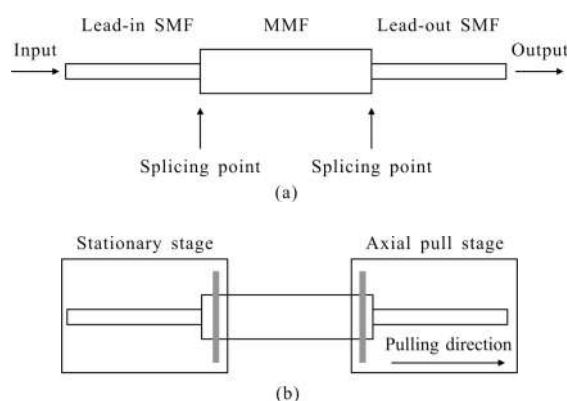


图 1 (a)SMS 器件示意图,(b)SMS 器件调谐装置示意图

Fig.1 (a) Schematic diagram of SMS device, (b) Schematic diagram of tunable SMS device

SMS 光纤结构的透射损耗计算公式为^[10]:

$$T=10\lg\left(\left|\sum_{n=1}^N c_n \exp(i\beta_n L_{\text{MMF}})\right|^2\right) \quad (1)$$

式中: N 为多模光纤中激发的模式数; L_{MMF} 为多模光纤长度; c_n 和 β_n 为 n 阶激发模的激发系数和传输常数,其中 β_n 的表达式为^[11]:

$$\beta_n=\left[k_0^2 n_o^2 - \frac{2(2n+1)k_0 \sqrt{n_o^2 - n_{cl}^2}}{r}\right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: k_0 为自由空间波矢量; n_o, n_{cl} 分别为多模光纤的纤芯折射率、包层折射率; r 为纤芯半径。当对 SMS 器件中的多模光纤施加轴向拉力时,会引起多模光纤的纤芯折射率,包层折射率和纤芯半径发生改变^[12]:

$$\begin{cases} n_i = n_{oi} + \frac{\partial n_i}{\partial l} \Delta l = n_{oi} - \frac{n_i^3}{2l} [p_{12} - \sigma(p_{11} + p_{12})] \Delta l \\ r = r_0 + \frac{\partial r}{\partial l} \Delta l = r_0 - \frac{r\sigma}{l} \Delta l \end{cases} \quad (3)$$

式中： p_{11} 和 p_{12} 为光弹性系数； σ 为泊松比，对于熔融石英三者数值分别为 0.12, 0.27 和 0.17； n_i 表示多模光纤纤芯折射率和包层折射率； r 为纤芯半径； Δl 为光纤拉伸量； n_{0i} 和 r_0 为不受轴向拉力情况下多模光纤的折射率和纤芯半径。

为验证施加轴向拉力的方法对 SMS 器件透射光谱的影响，在固定多模光纤长度为 15 cm 的前提下，分别进行了理论模拟和实验测量。其中，SMS 器件所用单模光纤为 Corning 公司 SMF-28，纤芯直径 8.3 μm ，纤芯数值孔径 $NA=0.14$ ；多模光纤为长飞公司 SI-105/125，纤芯直径 105 μm ，纤芯数值孔径 $NA=0.22$ 。理论模拟和实验测量得出的结果如图 2(a) 和(b)中所示。

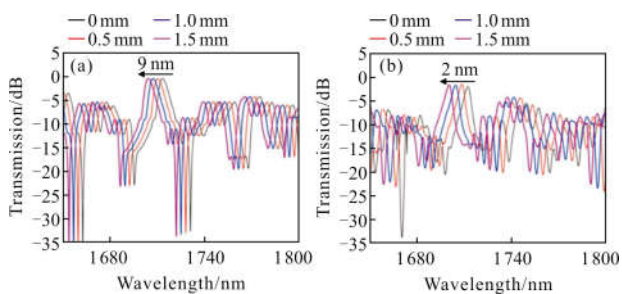


图 2 固定 MMF 长度为 15 cm, SMS 器件的(a)理论模拟调谐透射光谱(b)实验测量调谐透射光谱

Fig.2 (a) Theoretical simulation and (b) experimental measurement of SMS device's tuning transmission spectra with a fixed MMF length of 15 cm

结合图 2(a)和(b)两图可以说明，对 SMS 器件中的多模光纤施加轴向拉力，可以使其透射光谱发生蓝移。但是，对比理论模拟和实验测量结果可知，虽然多模光纤拉伸量相同，但是两者的蓝移变化量却不相同。在同样向外产生 1.5 mm 拉伸量的情况下，理论模拟和实验测量的透射光谱的蓝移量分别为 9 nm 和 12 nm。两者之间存在误差的主要原因是，在理论模拟中：一方面，忽略了不同波长的透射光在单模和多模光纤纤芯和包层的折射率变化；另一方面，忽略了光纤拉伸量和平台平移量的差异。

2 FOPO 实验结构

FOPO 实验结构如图 3 所示。所使用的泵浦光源为自行搭建的连续光 Er/Yb 共掺光纤激光器，其输出波长在 1.55~1.57 μm 范围内可调谐，输出功率

最大可达 3.02 W，输出线宽为 0.032 nm，信噪比大于 35 dB。

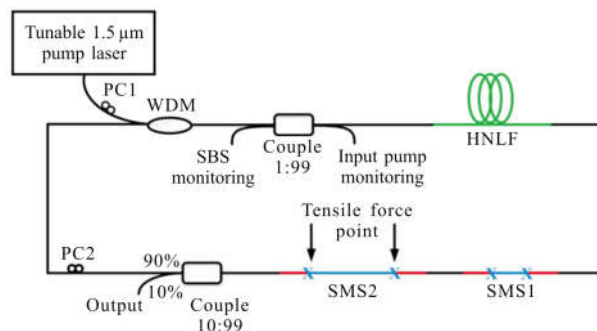


图 3 光纤光学参量振荡器实验装置图

Fig.3 Experimental setup of the FOPO

通过 WDM 将泵浦光耦合进入环形腔，利用 1:99 2x2 耦合器(Coupler)使 99%的泵浦光进入 HNLF，并通过耦合器的前后向 1%端分别监测输入泵浦光功率和反向受激布里渊散射(SBS)情况。实验中所用 HNLF(Sumitomo Electric, HNDS1600ABA) 的长度为 $L=100$ m，非线性系数 $\gamma=20$ $\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ，零色散波长 $ZDW=1562$ nm，传输损耗 $\alpha=0.8$ dB/km，三阶色散系数 $\beta_3=4\times 10^{-2}$ $\text{ps}^3/\text{km}@1550$ nm，四阶色散系数 $\beta_4=-4\times 10^{-5}$ $\text{ps}^4/\text{km}@1550$ nm。在 HNLF 之后，利用级联 SMS 器件滤除大部分泵浦光，并选取输出边带光波长。输出光通过 10:90 的 Coupler 输出。由于 FWM 的参量过程对于泵浦光和边带光的偏振态都非常敏感，因此需要在进入环形腔之前利用偏振控制器(PC1)调整泵浦光的偏振态，并在边带光反馈回 WDM 之前利用 PC2 调整反馈回去的边带光的偏振态，使参量过程增益达到最大值。

3 FOPO 实验结果

实验中，固定泵浦波长为 1562.5 nm，在 1:99 Coupler 处监测入射的泵浦功率为 2.5 W(整个实验过程均在 2.5 W 泵浦功率下进行)，利用光谱仪(YOKOGAWA, AQ6375)测得在不连接成环形腔的情况下 HNLF 输出端的放大自发辐射(ASE)光谱如图 4 所示。根据 ASE 光谱图可以看出，残余泵浦光强度较大，且 FWM 效应具有较宽的增益谱。因此，要实现双边带可调谐输出，需要滤除剩余泵浦光，并保持所选择的边带波长处的损耗较低。

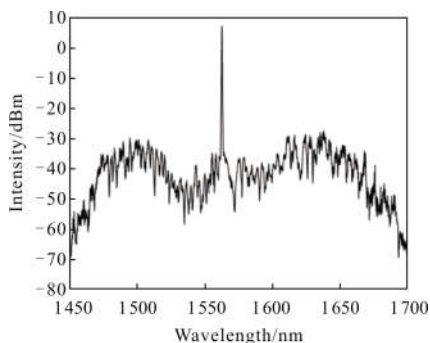


图 4 单通情况下的 ASE 光谱

Fig.4 ASE optical spectrum in the single-pass situation

实验中所用级联 SMS 器件中, SMS1 利用 Corning 公司 SMF-28 单模光纤和 Thorlabs 公司 50/125 多模光纤制成, 选取多模光纤长度约为 2.78 cm; SMS2 利用 SMF-28 单模光纤和长飞公司 105/125 多模光纤制成, 选取多模光纤长度约为 10.91 cm。利用超连续光源(NKT SuperK COMPACT)测得 SMS1 和 SMS2 透射谱及其级联后透射谱如图 5 所示。从图中可以看出, SMS1 选取的多模光纤长度较短, 通带宽度较宽, 可以在滤除大量泵浦光的同时保持双边带损耗极低; SMS2 选取的多模光纤长度较长, 通带宽度较窄, 用于在 SMS1 的基础上选取边带光波长并进一步滤除泵浦光。

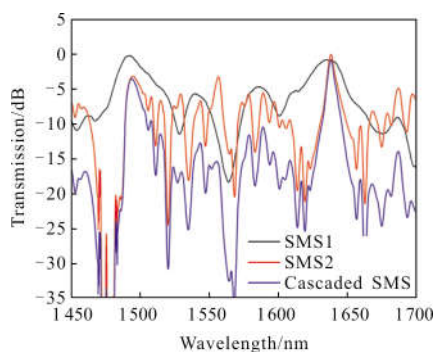


图 5 实验装置中 SMS 器件的透射光谱图

Fig.5 Transmission spectra of SMS device in the experimental setup

在此基础上, 固定 SMS1 不动, 将 SMS2 多模光纤熔接点两侧单模光纤放在三维调整架的光纤夹具中, 保持一侧不动, 向外调整另一侧三维调整架来对中间的多模光纤施加轴向拉力, 调谐过程中测得的级联 SMS 的透射谱如图 6 所示。在向外拉动 1.5 mm 的情况下, 可以实现主透射峰在 1 638~1 629 nm 范围内可调谐, 且其插入损耗始终小于 1 dB。根据这一点,

可以估算在选定波长处环形腔的总损耗不超过 5 dB, 其中包括级联 SMS 器件插入损耗不大于 1 dB, HNLF 与单模光纤两个熔接点的熔接损耗 1.2 dB, HNLF 传输损耗约为 0.08 dB (单模光纤传输损耗忽略不计), WDM、10:90 和 1:99 Coupler 插入损耗约为 1.2、0.46、0.04 dB, 以及 PC 施加应力调整偏振态带来的损耗约为 1 dB。器件插入损耗以及 HNLF 与单模光纤熔接损耗的数值均是通过测量入射光与出射光的功率计算得到的。位于左侧另一透射峰在调谐过程中, 同样会向短波长方向移动, 与 FWM 效应产生的另一边带光波长(1 494~1 501 nm)相对应。在调谐的过程中, 1 562.5 nm 泵浦光的损耗始终大于 25 dB。

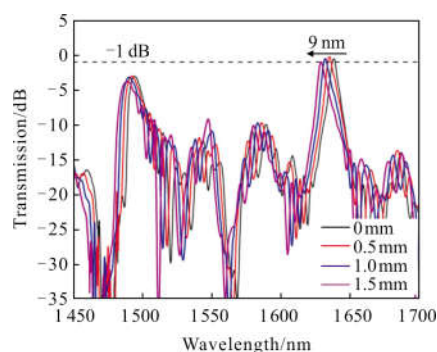


图 6 级联 SMS 器件的调谐透射光谱图

Fig.6 Tuning transmission spectra of cascaded SMS device

将级联 SMS 器件插入在 HNLF 后并连接成环形腔, 在 SMS2 不受轴向拉力的情况下测得的输出光谱与级联 SMS 透射谱如图 7 所示。通过级联 SMS 器件, 在滤除大部分泵浦光的同时, 选择斯托克斯光

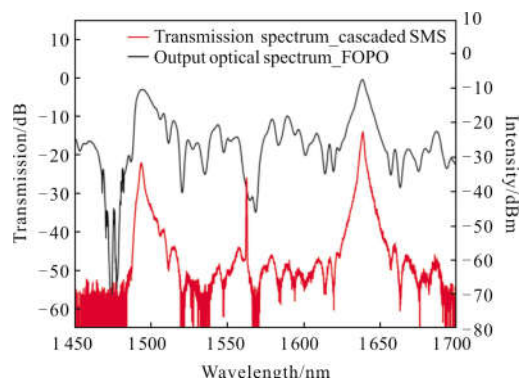


图 7 未对 SMS2 施加轴向拉力情况下级联 SMS 的透射谱与 FOPO 输出光谱的对照图

Fig.7 Transmission spectra of cascaded SMS and corresponding output optical spectrum of the FOPO when SMS2 was not applied axial tension

和反斯托克斯光的激射波长,实现了双边带激射。通过对比环形腔输出光谱和级联 SMS 透射谱可以发现,斯托克斯光激射波长(1 638.6 nm)与 SMS 器件透射谱主透射峰(1 638.1 nm)位置基本一致,在该波长处 SMS 器件的插入损耗为-0.50 dB。由于 SMS 器件在反斯托克斯光(1 494.3 nm)处的插入损耗为-3.09 dB,使得其输出强度比斯托克斯光低 9.13 dB。同时,SMS 器件对于 1 562.5 nm 处的残余泵浦光损耗为-28.91 dB,相较于未连接成环形腔的情况下残余泵浦光强度有了明显降低,最终其输出强度与斯托克斯光相差 13.57 dB。

在此基础上,通过向外调整三维调整架来对 SMS2 中间的多模光纤施加轴向拉力,其拉动距离与可调谐 FOPO 输出光谱如图 8 所示。通过向外拉动 1.5 mm 的距离,可以实现斯托克斯光从 1 638~1 629 nm 范围内可调谐,但在调谐过程中,随着拉动距离的增加,SMS 器件的损耗有所加大而导致调谐方向上 FWM 效应的增益有所降低,使得其输出强度降低了 3.39 dB。与此同时,在调谐过程中,光纤

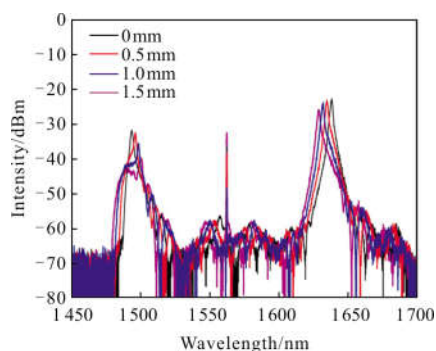


图 8 对 SMS2 向外拉动不同距离时 FOPO 的输出光谱

Fig.8 Output optical spectra of the FOPO for pulling different distance to the SMS2

拉伸量的增加会引起 SMS 透射波长发生蓝移,所以与斯托克斯光频率相干的反斯托克斯光波长可以在 1 494~1 501 nm 范围内实现可调谐。但是当选取的斯托克斯光波长向短波移动时,其频率相干的反斯托克斯光是向长波方向移动的,因此加大调谐范围会使得反斯托克斯光波长与 SMS 透射峰的位置不对应而导致损耗加大,进而使得反斯托克斯光与斯托克斯光强度差距越来越大,这也成为了限制该种结构可调谐范围进一步加大的主要原因。而对于 1 562.5 nm 处的泵浦光,在调谐过程中,其输出强度

先逐渐降低(拉动 0~1 mm 降低 12.27 dB)而后又逐渐升高(拉动 1~1.5 mm 升高 15.97 dB)。这种变化主要是由于在 SMS 器件透射谱发生蓝移的过程中,泵浦光经过器件透射波谷时损耗发生变化而引起的,并且随着光纤拉伸量的增加,泵浦光的强度将继续增加,这也限制了该种结构可调谐范围的进一步增大。

考虑到泵浦功率提高引起的热效应可能会使得 SMS 器件的透射谱发生变化,从而降低 FOPO 输出功率与光谱的不稳定。因此在不对 SMS 器件施加拉力进行调谐且保持入射到 HNLF 的泵浦功率为 2.5 W 的情况下,监测 FOPO 输出功率与光谱在 30 min 时间内的稳定性,每 5 min 测量一次光谱的变化如图 9(a) 中所示,FOPO 在整个 30 min 过程内输出功率的变化如图 9(b) 中所示。在 30 min 的测量过程中,从图 9(a) 中可以看出 FOPO 输出光谱几乎没有变化,图 9(b) 中 FOPO 输出功率一开始在 23.0~23.9 mW 的范围内浮动,随着 SMS 器件积累热量的增加,输出功率在第十分钟时有所降低,之后稳定在 21.8~22.6 mW 的范围内。通过测量结果可以看出,热效应对 SMS 器件的影响不会导致 FOPO 输出光谱的不稳定,但热量的积累可能会导致 FOPO 输出功率的轻微下降。

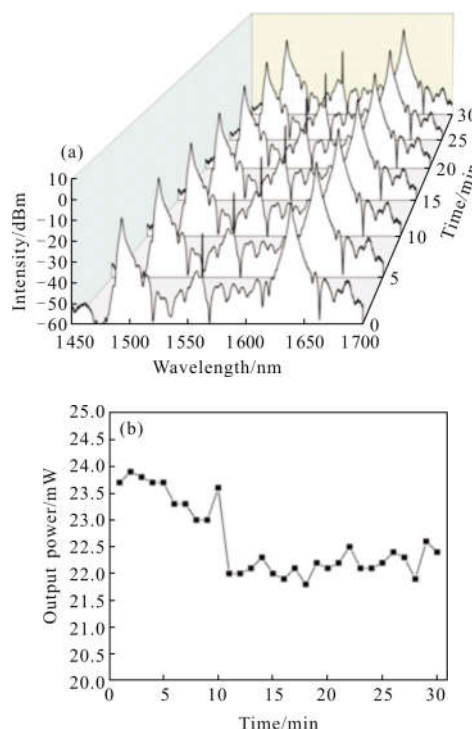


图 9 30 min 内测量的 FOPO 输出功率与光谱的稳定性

Fig.9 Optical power and output spectra stability of the FOPO measured in 30 min

4 结 论

在连续光全光纤光学参量振荡器中,目前主要通过加入可调滤波器等滤波器件实现边带光波长的可调谐输出。但是由于这些滤波器件的插入损耗较高,进而造成整个环形腔的总损耗较高,限制了 FOPO 输出性能的进一步提升。为解决此问题,文中提出了在 FOPO 系统中,利用基于多模干涉效应的 SMS 滤波器件调谐输出波长。通过理论模拟和实验测量两方面验证,对 SMS 器件中的多模光纤施加轴向拉力的方法可以使其透射谱发生蓝移,实现其可调谐滤波特性。在此基础上,通过选取不同长度和纤芯尺寸的多模光纤制作级联 SMS 器件,并将其加入到 FOPO 环形腔中,最终实现了在 1 494~1 501 nm 和 1 638~1 629 nm 范围内双边带可调谐输出,其中级联 SMS 器件在选定波长处的滤波损耗保持在 1 dB 以下,环形腔的总损耗不大于 5 dB。

参考文献:

- [1] 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)
史伟, 付士杰, 房强, 等. 基于稀土掺杂石英光纤的单频光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1003001.
- [2] Shi Wei, Fang Qiang, Li Jinhui, et al. High-performance fiber lasers for LIDARs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0802001. (in Chinese)
史伟, 房强, 李锦辉, 等. 激光雷达用高性能光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0802001.
- [3] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178–1181.
- [4] Hu C R, Slipchenko M N, Wang P, et al. Stimulated Raman scattering imaging by continuous-wave laser excitation [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1479–1481.
- [5] Marhic M E, Wong K K, Kazovsky L G, et al. Continuous-wave fiber optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(16): 1439–1441.
- [6] Luo Z, Zhong W D, Tang M, et al. Fiber-optic parametric amplifier and oscillator based on intracavity parametric pump technique[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(2): 214–216.
- [7] Yang S, Xu X, Wong K K Y. Low threshold dual-cavity continuous-wave fiber optical parametric oscillator [C]// OptoElectronics and Communications Conference. IEEE, 2009: 1–2.
- [8] Malik R, Marhic M E. High-power continuous-wave operation of a fiber optical parametric oscillator in L and U bands[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(6): 694–701.
- [9] Mohammed W S, Smith P W, Gu X. All-fiber multimode interference bandpass filter [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2547–2549.
- [10] Mohammed W S, Mehta A, Johnson E G. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(2): 469–477.
- [11] Tripathi S M, Kumar A, Varshney R K, et al. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(13): 2348–2356.
- [12] Huang S Y, Blake J N, Kim B Y. Perturbation effects on mode propagation in highly elliptical core two-mode fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(1): 23–33.