

基于 ASE 泵浦的 1.7 μm 波段可调谐多波长拉曼光纤激光器实验研究

贺振兴^{1,2}, 张鹏^{1,2*}, 吴迪^{1,2}, 韩科选^{1,3}, 李晓燕¹, 都权力¹

¹长春理工大学空间光电技术国家和地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

³长春理工大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 报道了一种输出波长为 1.7 μm 波段的可调谐多波长拉曼光纤激光器。该激光器采用过滤的 1550 nm 波段自发辐射源来作为泵浦源, 从而避免受激布里渊散射。高非线性光纤和色散位移光纤作为非线性增益介质, 从而获得峰值波长为 1.7 μm 波段的增益谱。并采用一段未泵浦的掺铒光纤用于吸收增益谱中残余的泵浦光, 所产生的增益谱由 Sagnac 环滤波器进行滤波。通过调节偏振控制器和放大自发辐射后端的可调谐滤波器, 可以产生在 1652.77 nm 和 1686.20 nm 之间具有调谐范围大于 33.4 nm 的单波长激光输出。单波长激光器的光谱 3 dB 有效线宽为 0.08 nm。并且通过增加泵浦功率和调节 Sagnac 环滤波器实现多波长激光输出, 双波长激光可以在 1654.88 nm 到 1664.60 nm 之间连续调谐。单波长和双波长激光的边模抑制比均大于 45 dB。

关键词 激光器; 受激拉曼散射; 拉曼激光器; 可调谐多波长激光器; 放大自发辐射

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071403

1.7 μm Tunable Multi-Wavelength Raman Fiber Laser Based on Amplified Spontaneous Emission Pump

He Zhenxing^{1,2}, Zhang Peng^{1,2*}, Wu Di^{1,2}, Han Kexuan^{1,3}, Li Xiaoyan¹, Du Quanli¹

¹National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²College of Optoelectronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

³College of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A simple tunable multi-wavelength Raman fiber laser with output wavelength near 1.7 μm band is proposed and experimentally demonstrated. In this scheme, a 1550 nm band amplified spontaneous emission is used as the pump source and avoid stimulated Brillouin scattering. The dispersion shifted fiber and high nonlinear optical fiber are used as nonlinear gain to obtain the gain spectrum with peak wavelength near the 1.7 μm band, and an unpumped erbium-doped fiber is used to absorb the remaining pump light in the gain spectrum. The gain spectrum is filtered by a Sagnac loop filter. We demonstrate the tuning capacities of single-wavelength over 33.4 nm between 1652.77 nm and 1686.20 nm by adjusting the polarization controller and tunable filter on the back end of the amplified spontaneous emission. The 3 dB effective linewidth of single-wavelength laser is 0.08 nm. And by increasing the pump power and adjusting the Sagnac loop filter to achieve multi-wavelength laser output, the dual-wavelength laser can be continuously tuned between 1654.88 nm to 1664.60 nm. The side mode suppression ratios

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-11-13; 录用日期: 2019-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(61705019)、吉林省优秀青年人才基金(20170520161JH)、吉林省自然科学基金项目(20180101338JC)、吉林省教育厅基金项目(JJKH20200752K)

* E-mail: zhangpeng@cust.edu.cn

of single-wavelength and dual-wavelength lasers are greater than 45 dB.

Key words lasers; stimulated Raman scattering; Raman fiber laser; tunable multi-wavelength laser; amplified spontaneous emission

OCIS codes 140.3070; 140.3460; 140.3510; 140.3550; 140.3600

1 引言

1.7 μm 波段激光器(1650~1750 nm)广泛应用于生物成像^[1]、聚合物激光焊接和处理^[2]、中红外激光器泵浦源^[3]和有机物微量测量^[4]等领域,且已成为近年来国内外新型光源研究的热点之一。而1.7 μm 波段可调谐多波长激光器可以提高生物组织中光学相干断层扫描(OCT)的成像深度^[5],还可以增加OCT的成像范围和动态范围^[6-7]。

近几十年来,已有大量1.7 μm 波段光纤激光器被报道。2004年 Agger 等^[8]报道基于掺铥光纤的分布反馈光纤激光器,采用790 nm激光泵浦5 cm长的掺铥光纤,最终得到1735 nm单频激光输出。2017年 Khagai 等^[9]基于掺铥光纤实现了脉宽为21 ps、重复频率为3.57 MHz的1.7 μm 皮秒脉冲源输出。2018年, Casula 等^[10]采用光学参量振荡实现1696~1761 nm的瓦级激光输出。国内近年对1.7 μm 波段光源的研究逐渐增多,2014年 Liu 等^[11]基于拉曼效应实现了可调谐范围为1638.5~1675.1 nm的连续激光输出。2017年 Zhang 等^[12-14]演示了高达10阶级联拉曼连续可调谐光纤激光器,其波段可从1 μm 调谐到1.9 μm 。2019年吴迪等^[15]采用1550 nm连续光源和级联调制器组合的方式,得到了1.7 μm 波段宽带光源。

综上所述,实现1.7 μm 波段光源的方法分为两种:1)基于泵浦稀土掺杂离子光纤(掺铥光纤和掺铒光纤等)产生增益谱,并利用滤波方法产生1.7 μm 波段光源;2)基于非线性效应产生1.7 μm 波段光源,如受激拉曼散射(SRS)效应和光学参量振荡效应。SRS效应可以忽略波长的限制而获得任意波长的光,因此拉曼激光器是产生1.7 μm 波段激光的优选方法之一。SRS通常采用较长的光纤提高非线性效应从而增强频移量。但由于受激布里渊散射(SBS)具有较低的阈值,在激光器谐振腔内不可避免产生SBS现象。本课题组先前工作对拉曼增益谱及激光输出做了一些研究^[16],本文在原有基础上提出采用滤波后放大自发辐射(ASE)光源作为泵浦源,可以增加泵浦光的光谱线宽,从而提高SBS阈值^[17-18]。另一方面,可调谐多波长光纤激光器因其自身独特的优点,在波分复用激光通信、光纤器件测

试、光纤传感、生物仪器和微波光子学等领域受到广泛关注^[19]。2017年 Jin 等^[20]通过结合腔内标准具和非线性损耗来扩展连续波单频激光器的调谐范围,为产生多波长激光器提供了新的角度。多波长光纤激光器主要采用非线性偏振旋转^[21]、光纤布拉格光栅^[22]和梳状滤波器^[23]等方法。其中非线性偏振旋转主要利用光纤非线性效应实现多波长输出,但该方法稳定性差、结构复杂;采用光纤布拉格光栅实现多波长输出,但波长数不可调;而采用 Sagnac 环滤波器可以实现稳定的可调谐多波长激光输出。

本文提出了一种可调谐多波长拉曼光纤激光器(RFL)结构,其输出波长为1.7 μm 波段。采用滤波后的 ASE 光源作为泵浦源,经过掺铥光纤放大器(EDFA)进行光功率放大。在激光器腔中,以高非线性光纤(HNLF)和色散位移光纤(DSF)作为非线性增益介质,一段未泵浦的掺铥光纤(EDF)用于吸收增益谱中残余的泵浦光。通过调节偏振控制器(PC)和 Sagnac 环滤波器可以产生在1652.77 nm和1686.2 nm之间具有调谐范围大于33.4 nm的单波长激光输出,单波长激光器的光谱3 dB有效线宽为0.08 nm,边模抑制比大于45 dB。并且通过调节 Sagnac 环滤波器可以实现多波长激光输出,双波长激光可以从1654.88 nm到1664.6 nm之间连续调谐。可调谐多波长激光器本身斜效率较低,这是由于滤波后 ASE 光源有一部分能量损失。激光器性能可以通过提高非线性效应和采用1.7 μm 波段的光纤器件得到改善。

2 实验结构及原理

2.1 实验结构

1.7 μm 可调谐多波长拉曼光纤激光器实验结构如图1所示,实验采用自制的1550 nm波段 ASE 光源作为泵浦源,经过可调谐滤波器进行滤波后进入EDFA进行光功率放大。所用的可调谐滤波器的3 dB线宽约为1 nm。放大后的泵浦光通过三端口光环行器(3-port optical circulator, CIR)注入10 km的DSF和500 m的HNLF中产生拉曼增益谱。HNLF的零色散波长(ZDW)和非线性系数分别为1550 nm、 $10.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。DSF在1550 nm附近的色散斜率约为 $0.085 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。DSF

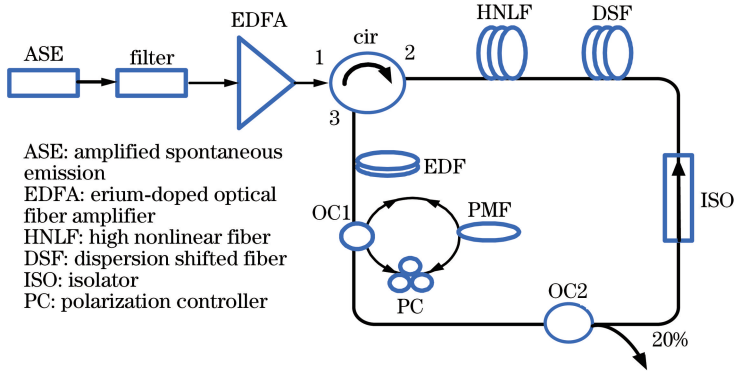

 图 1 1.7 μm 波段可调谐拉曼激光器装置图

 Fig. 1 Experimental setup of 1.7 μm band tunable Raman fiber laser

的末端与光学隔离器 (ISO) 相连接, ISO 用于确保光在腔内以单一方向传输, 产生的增益谱由 Sagnac 环滤波器进行滤波。一段 5 m 的 EDF 用于吸收光谱中残余泵浦光。从耦合器 (OC2) 的 20% 端口输出的多波长激光接入光谱分析仪 (OSA) (AQ6375, Yokogawa, 日本) 中观察光谱。

2.2 实验原理

实验中基于 ASE 泵浦 DSF 光纤激发 SRS 效应, 同时提高 SBS 效应的阈值而产生 1.7 μm 波段增益谱。石英光纤的拉曼增益范围约为 40 THz^[24-25], 其中增益峰值约为 13 THz。如果使用 193 THz (1550 nm) 光源作为泵浦光, 则可以实现约 180 THz (1666 nm) 的拉曼增益峰值, 故 1.7 μm 波段 (1650~1750 nm) 的光纤激光器可采用 SRS 效应作为增益方式。拉曼增益谱的峰值波长和增益谱范围易受到泵浦光波长和带宽的影响, 因此, 可以通过可调谐滤波器控制泵浦光的带宽来调节增益谱范围。此外, HNLF 级联 DSF 来增强腔内非线性效应, 从而增强拉曼频移量。

实验结构中通过增大泵浦光的光谱线宽产生 SRS 并增加 SBS 的阈值, 使用 1550 nm 波段的 ASE 光源作为泵浦光来抑制 SBS。

背向 SRS 的阈值表达式可以表示为^[18]

$$\frac{g_R p_0 L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} \approx 20, \quad (1)$$

式中: $g_R \approx 3 \times 10^{-11}$ m/W 为拉曼增益系数; p_0 为背向 SRS 阈值; $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$ 为 DSF 的有效核心区域面积; $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p$ 为 DSF 的有效光纤长度, 其中 $\alpha_p = 0.21$ dB/km 为 DSF 在泵浦波长 1550 nm 下的衰减系数, L 为 DSF 的长度。根据 (1) 式, 计算出背向 SRS 的阈值 $p_0 = 2.4$ W。

当激光器结构为环型腔时, 其 SRS 阈值可以表

示为

$$G_{\text{SRS}} = \exp\left(\frac{2g_R P_{\text{th}}^{\text{SRS}}}{A_{\text{eff}}}\right) = D, \quad (2)$$

实验中, D 是腔内往返损耗, 约为 30 dB。因此, 由 (2) 式计算出 $P_{\text{th}}^{\text{SRS}} = 403.5$ mW。

SBS 的阈值可以表示为^[26]

$$P_{\text{th}}^{\text{SBS}} = \frac{KGA_{\text{eff}}}{g_B L_{\text{eff}}}\left(1 + \frac{\Delta V_S}{\Delta V_B}\right) = D, \quad (3)$$

式中: $g_B \approx 3 \times 10^{-11}$ m/W 为布里渊增益系数。当入射光的偏振态与布里渊散射的斯托克斯光的偏振态无关时, $K = 2$ 。 G_{SBS} 、 ΔV_S 和 ΔV_B 分别是布里渊阈值增益系数、泵浦线宽和斯托克斯光的线宽。

实验中, ASE 滤波后的 $\Delta V_S \approx 1$ nm, 对应于 174 GHz。当 $\Delta V_B = 20$ MHz 时, 可以根据 (3) 式得到 $P_{\text{th}}^{\text{SBS}} = 143$ W。因此, 通过增大泵浦光的光谱线宽可以有效提高 SBS 的阈值, 从而抑制 SBS 效应, 增加拉曼频移量。

Sagnac 环滤波器具有梳状滤波的作用^[23], 用于实现多波长激光输出, 其结构如图 2 所示。此结构由偏振控制器 (PC), 保偏光纤 (PMF) 和 3 dB 耦合器构成。激光从 E1 端口进入耦合器后, 被耦合器分成两束传播方向相反的光。其中一束光从 E3 端口输出并顺时针传输, 另一束光从 E4 端口输出并逆时针传输。当光经过 PMF 时, 快慢轴分量的光会出现相位差。光经过 PC 时, 使偏振光方向旋转一个角度。最后两束传输方向相反的光经过 PMF 和 PC 之后在耦合器处相干输出, 从而实现梳状滤波。

当耦合器的耦合比为 0.5 时, 其透射函数可以推导如下^[27-28]

$$T = \sin^2 \theta \cos^2 \varphi, \quad (4)$$

式中: $\varphi = \pi \Delta n L / \lambda$ 为透射系数; L 为 PMF 的长度;

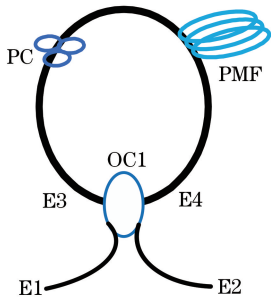


图2 Sagnac环滤波器装置图

Fig. 2 Structure of the Sagnac loop filter

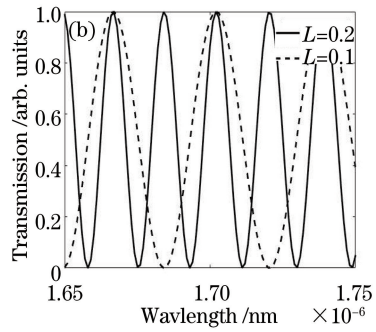
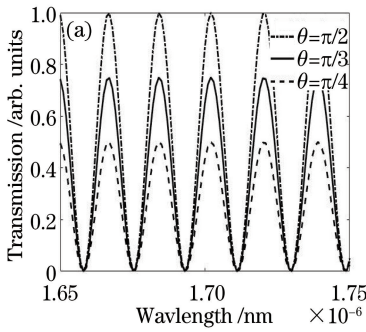


图3 Sagnac环透射光谱图。(a)不同的旋转角度;(b)不同PMF长度

Fig. 3 Transmission spectrum of the Sagnac loop. (a) Different rotation angles; (b) different lengths of PMF

3 结果与讨论

3.1 增益谱实验结果

实验中使用的 ASE 宽带光源的工作波长为 1527~1650 nm,输出功率为 13 dBm。经滤波之后 ASE 光的半峰全宽为 1 nm,输出功率降低至 mW 级别。如图 4 所示,首先将 ASE 泵浦光过滤后由 EDFA 放大,之后注入 DSF 和 HNLF 以产生 1.7 μm 波段拉曼增益光谱,并在 DSF 末端连接一个光耦合器(OC)作为光纤反射器。从环形器 3 端口输出的增益谱如图 5 所示,从图中可以看到,在 35 dBm 的泵浦功率下获得峰值波长为 1675 nm 的增益谱。此时,光谱中含有大量残余的 1550 nm 波段泵浦光。采用一段 5 m 的未泵浦 EDF 用于吸收残余泵浦光,并将泵浦光功率从 32 dBm 调节到 36 dBm,得到的输出光谱如图 6 所示。图 6 中每条曲线表示了不同泵浦功率下的拉曼增益谱,随着泵浦功率逐渐增加,增益谱的峰值功率仅变化 5.5 dB。这是因为 ASE 中心波长为 1550 nm,导致增益较低。因此,通过调节可调滤波器可以改变 ASE 中心波长以获得合适的增益光谱。

图 7 所示为调节可调滤波器使 ASE 中心波长从 1539 nm 调整到 1563 nm,不同泵浦功率所对应

Δn 为 PMF 快慢轴的折射率差。

图 3 所示为不同参数下的 Sagnac 环路传输的仿真结果。图 3(a)为不同旋转角度下对应的 Sagnac 环透射光谱图。当 θ 接近 $\pi/2$ 时,透射系数相对较高。仿真中选取了长度为 0.1 m 和 0.2 m 的 PMF,得到的透射谱如图 3(b)所示。PMF 的长度越长,梳状光谱的周期越短,0.1 m PCF 的光谱周期是 0.2 m PCF 周期的两倍。因此,通过改变 PMF 的长度可以获得具有不同波长间隔的多波长激光器。

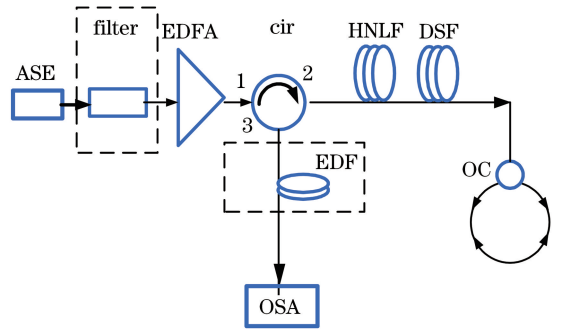


图4 1.7 μm 波段增益谱实验装置

Fig. 4 Experimental setup of 1.7 μm band gain spectrum

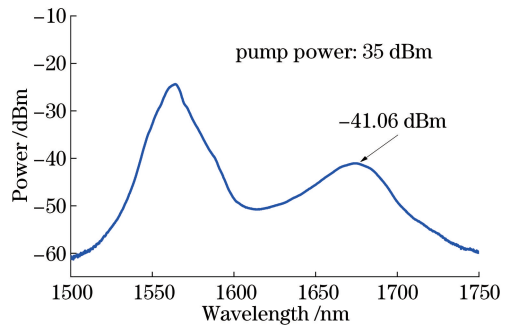


图5 无 EDF 和可调谐滤波器时的增益谱

Fig. 5 Gain spectrum without EDF and tunable filter

输出的拉曼增益谱变化情况。从图 7 可以看到,随着泵浦功率逐渐增加,增益谱的峰值波长变化范围

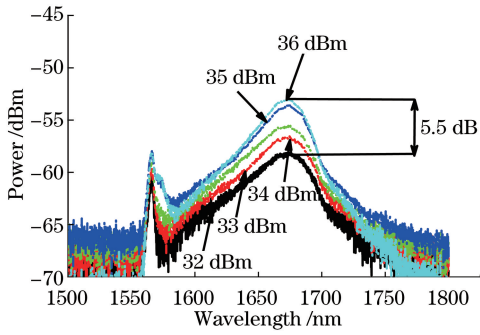


图 6 通过 EDF 之后的增益谱

Fig. 6 Gain spectrum passed through EDF

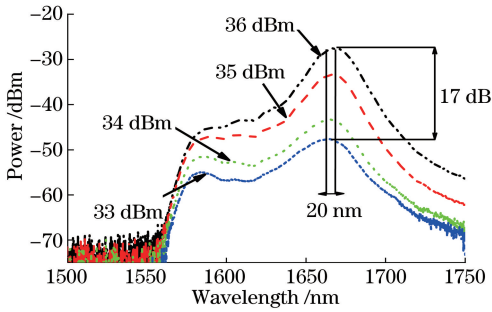


图 7 使用 EDF 和可调滤波器在不同输入功率下的拉曼增益谱

Fig. 7 Raman gain spectrum under different input powers with EDF and tunable filter

为 20 nm,其峰值功率变化约为 17 dB。同时将 EDF 级联光纤 Sagnac 环滤波器进行滤波,经过滤波之后

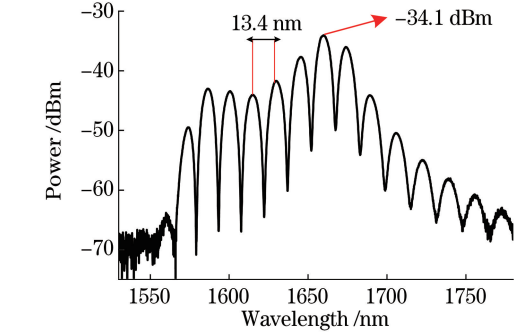
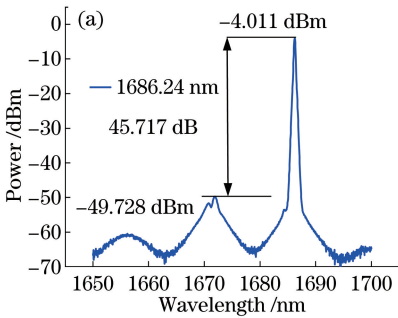


图 8 Sagnac 环滤波器透射谱

Fig. 8 Transmission spectrum of Sagnac loop filter

3.2 激光器实验结果

实验装置如图 1 所示,输出激光由光谱分析仪测量。当泵浦光达到 32.8 dBm 时,达到激光器阈值,观测到 1.7 μm 单波长激光输出。实验阈值略大于计算结果,并且激光器斜效率较低。这是由于采用滤波之后的 ASE 光源作为泵浦源,在其滤波过程中有一部分能量损失。通过光谱分析仪测量单波长激光输出,光谱图如图 9 所示。单波长激光其峰值波长为 1686.24 nm,光谱 3 dB 线宽为 0.08 nm,激光器的边模抑制比大于 45 dB。激光器使用的光纤均为单模光纤,最终激光器输出为基模高斯光束。

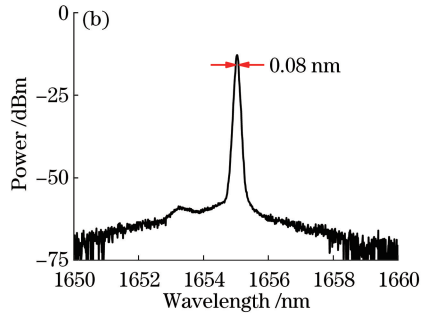


图 9 激光器光谱图。(a)边模抑制比;(b) 3dB 线宽

Fig. 9 Spectrum of the laser. (a) Side mode suppression ratio; (b) 3 dB linewidth

如图 10 所示,通过调节腔内 PC 和可调滤波器,可以得到在 1652.77~1686.20 nm 之间具有调谐范围大于 33.4 nm 的单波长激光输出。激光器的调谐精度与 Sagnac 环滤波器的波长周期以及可调滤波器精度有关。若仅调节 PC,其激光器的调谐精度等于滤波周期,此时调谐精度约为 13.4 nm。如果只改变 ASE 光源后端的可调谐滤波器的滤波波长,激光器也可在小范围内调谐,但该调谐范围小

于梳状滤波器的周期。此时激光器最小调谐精度约为 nm 级别。此外测量了激光器中心波长和输出功率在 50 min 的变化情况,如图 11 所示,对于单波长激光的输出功率变化小于 ±1 dB,中心波长漂移小于 0.01 nm。其功率波动的主要原因是泵浦源和放大器的功率波动以及环境温度的变化。

泵浦功率增加为 35 dBm,调节 PC 可以实现双波长激光输出。输出光谱图如图 12 所示,输出的双

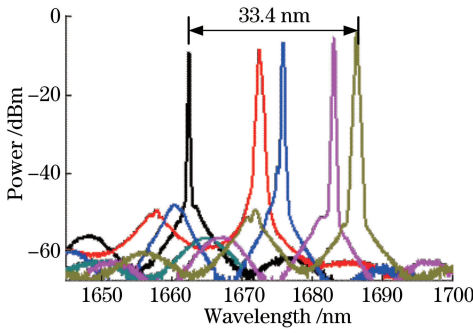


图 10 激光器的调谐范围

Fig. 10 Tuning range of laser

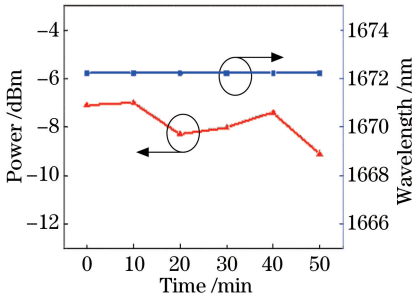


图 11 激光器稳定性测试

Fig. 11 Stability test of laser

波长为 1664.60 nm 和 1679.32 nm。两个波长的边模抑制比都大于 45 dB。双波长之间距离为 13.4 nm, 约为 Sagnac 环滤波器的周期, 实验结果与理论分析基本一致。调节 PC 使双波长激光器可以从 1654.88 nm 变为 1664.60 nm, 相应的调谐范围为 9.72 nm。可以发现, 可调谐范围小于单个激光器的调谐范围和 Sagnac 环滤波器的周期。分析原因可能是泵浦功率不足以在滤波周期内产生双波长激光。此外, 可以通过减少腔体损耗和使用 1.7 μm 的器件来减少腔体损耗, 从而获得更多的激光输出波长数。如图 13 所示, 测量双波长激光的中心波长和输出功率在 50 min 的变化情况, 可知双波长激光器的输出功率抖动约为 ± 2 dB。

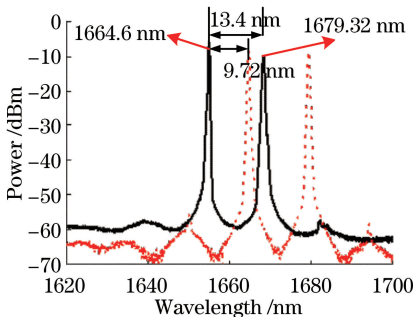


图 12 双波长激光器的输出光谱

Fig. 12 Output spectrum of dual-wavelength lasers

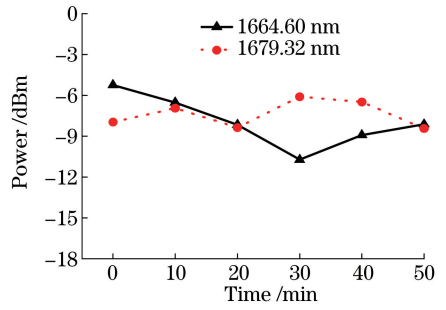


图 13 双波长激光器的功率抖动

Fig. 13 Power fluctuation of dual-wavelength lasers

4 结 论

本文提出了一种可调谐多波长拉曼光纤激光器, 其输出波长接近 1.7 μm 波段。该可调谐激光器可以产生在 1652.77 nm 和 1686.20 nm 之间具有大于 33.4 nm 调谐范围的单波长激光, 其 3 dB 线宽为 0.08 nm, 输出功率约为 -4 dBm, 功率波动小于 ± 1 dB。多波长激光器也可以通过增加泵浦功率来实现。双波长激光器的可调谐范围为 9.72 nm (1654.88~1664.60 nm), 得到的单波长激光和双波长激光具有大于 45 dB 的边模抑制比。双波长激光器的输出功率变化小于 ± 2 dB。该实验结果可以对未来 1.7 μm 波段光源的实用化和产业化提供参考。

参 考 文 献

- [1] Sharma U, Chang E W, Yun S H. Long-wavelength optical coherence tomography at 1.7 μm for enhanced imaging depth[J]. Optics Express, 2008, 16(24): 19712-19723.
- [2] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [3] Quimby R S, Shaw L B, Sanghera J S, et al. Modeling of cascade lasing in Dy: chalcogenide glass fiber laser with efficient output at 4.5 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 123-125.
- [4] Maeda Y, Yamada M, Endo T, et al. 1700 nm ASE light source and its application to mid-infrared spectroscopy [C] // 19th Optoelectronics and Communications Conference (OECC) and the 39th Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT). Engineers Australia, 2014: 410.
- [5] Nishizawa N, Kawagoe H, Yamanaka M, et al. Wavelength dependence of ultrahigh-resolution optical

- coherence tomography using supercontinuum for biomedical imaging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(1): 1-15.
- [6] Bajraszewski T, Wojtkowski M, Szkulmowski M, et al. Improved spectral optical coherence tomography using optical frequency comb [J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 4163-4176.
- [7] Jung E J, Park J S, Jeong M Y, et al. Spectrally-sampled OCT for sensitivity improvement from limited optical power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17457-17467.
- [8] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [9] Khegai A M, Melkumov M A, Riumkin K E, et al. Mode-locked bismuth fiber laser operating at 1.7 μm based on NALM[C] // *Laser Congress 2017 (ASSL, LAC)*, Nagoya, Aichi. Washington, D. C.: OSA, 2017: JTU2A.20.
- [10] Casula R., Penttinen J P, Guina, M, et al. Cascaded crystalline Raman lasers for extended wavelength coverage: continuous-wave, third-Stokes operation [J]. *Optica*, 2018, 5(11): 1406-1413.
- [11] Liu J, Shen D Y, Huang H T, et al. High-power and highly efficient operation of wavelength-tunable Raman fiber lasers based on volume Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6605.
- [12] Zhang L, Jiang H W, Yang X Z, et al. Nearly-octave wavelength tuning of a continuous wave fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42611.
- [13] Zhang L, Dong J Y, Feng Y. High-power and high-order random Raman fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-6.
- [14] Dong J Y, Zhang L, Jiang H W, et al. High order cascaded Raman random fiber laser with high spectral purity [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5275-5280.
- [15] Wu D, Zhang P, Li X Y, et al. Broadband light source at 1.7 μm based on cascaded-modulator pumping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0506003.
吴迪, 张鹏, 李晓燕, 等. 基于级联调制器抽运源的 1.7 μm 波段宽带光源 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0506003
- [16] Du Q L, Zhang P, Wu D, et al. Raman gain spectrum in 1.7 μm band pumped by multimode laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121405
都权力, 张鹏, 吴迪, 等. 基于多模激光抽运的 1.7 μm 波段拉曼增益谱实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121405.
- [17] Kuang Q Q, Zhan L, Gu Z C, et al. High-energy passively mode-locked Raman fiber laser pumped by a CW multimode laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(2): 391-395.
- [18] Agrawal, G. *Nonlinear fiber optics* [M]. Jia D F, Ge C F, Transl. 5th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 205-208.
阿戈沃·戈文德. 非线性光纤光学 [M]. 贾东方, 葛春峰, 译. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 205-208.
- [19] Chang C H, Peng P C, Shiu R K, et al. Multiwavelength laser with adjustable ultranarrow wavelength spacing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(4): 1-7.
- [20] Jin P X, Lu H D, Yin Q W, et al. Expanding continuous tuning range of a CW single-frequency laser by combining an intracavity etalon with a nonlinear loss [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-5.
- [21] Feng S C, Ren W H, Chen M Y, et al. Multi-wavelength fiber laser employing twin-core fiber filter and nonlinear polarization rotation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0605006.
冯素春, 任文华, 陈曼雅, 等. 基于双芯光纤滤波器和非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0605006.
- [22] Gu J B, Zhu F N, Liu L, et al. 1550 nm laser source with narrow linewidth and high tuning bandwidth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0901003.
古建标, 朱福南, 刘磊, 等. 1550 nm 波段窄线宽高调谐带宽激光光源 [J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0901003.
- [23] Zhu X J, Geng J, Zhang G A, et al. Tunable double pulse dissipative solitons Yb-doped fiber laser based on sagnac loop [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0414002
朱晓军, 耿健, 章国安, 等. 基于 Sagnac 环的可调谐双脉冲耗散孤子掺 Yb 光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0414002.
- [24] Dong P, Gui L L, Xiao X S, et al. Experimental investigation of supercontinuum generation in highly nonlinear dispersion-shifted fiber pumped by spectrum-sliced amplified spontaneous emission [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(14): 3007-3011.

- [25] Takushima Y. High average power, depolarized super-continuum generation using a 1.55 μm ASE noise source [J]. *Optics Express*, 2005, 13(15): 5871-5877.
- [26] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(11): 2489-2494.
- [27] Fang X J, Claus R O. Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(20): 2146-2148.
- [28] Kim R K, Han Y G. Switchable multiple lasing oscillations in an erbium-doped fiber ring laser using a single stage of a Sagnac loop mirror [J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(4): 813-818.