

基于级联调制器抽运源的 1.7 μm 波段宽带光源

吴迪^{1,2}, 张鹏^{1,2*}, 李晓燕^{1,2}, 王大帅^{1,3}, 贺振兴², 张欣梦², 陈俊达²,
王天枢^{1,2}, 张立中^{1,2}, 佟首峰^{1,2}

¹长春理工大学空间光电技术国家与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长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 设计实验实现了基于级联调制器抽运源的 1.7 μm 波段宽带光源。采用连续光源和级联调制器组合的方式, 在反常色散区域抽运 1 km 的高非线性色散位移光纤, 产生了超连续谱。经过光纤波分复用器的滤波后, 得到了峰值波长为 1748.9 nm、输出功率约为 22 dBm、20 dB 光谱范围为 1.6 ~ 2 μm 、相应的谱宽约为 419 nm 的宽带光源。通过增加 Sagnac 滤波器, 得到了频率周期为 2.5 nm、强度周期为 9.5 dB 的多波长宽带光源。此外, 分析了抽运功率、波长及重复频率对超连续谱展宽的影响。

关键词 光纤光学; 宽带光源; 超连续谱; 1.7 μm 波段; 级联调制器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0506003

Broadband Light Source at 1.7 μm Based on Cascaded-Modulator Pumping

Wu Di^{1,2}, Zhang Peng^{1,2*}, Li Xiaoyan^{1,2}, Wang Dashuai^{1,3}, He Zhenxing²,
Zhang Xinmeng², Chen Junda², Wang Tianshu^{1,2}, Zhang Lizhong^{1,2}, Tong Shoufeng^{1,2}

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 Electronical and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract We designed and experimentally implemented a broadband light-source at 1.7 μm based on a cascaded-modulator pumping source. We generated supercontinuum by pumping a 1 km highly nonlinear dispersion-shifted fiber in the anomalous dispersion region by using a continuous light source combined with a cascaded-modulator. After filtering by using an optical fiber wavelength-division multiplexer, we obtained a broadband light source with a peak wavelength of 1748.9 nm, an output power of approximately 22 dBm, a 20 dB spectral range of 1.6-2 μm , and a corresponding spectral width of approximately 419 nm. By adding the Sagnac filter, a multi-wavelength broadband light source with a frequency period of 2.5 nm and an intensity period of 9.5 dB was obtained. In addition, we analyzed the effects of pump power, wavelength, and repetition rate on supercontinuum broadening.

Key words fiber optics; broadband light source; supercontinuum; 1.7 μm band; cascaded-modulator

OCIS codes 060.2380; 140.3460; 320.6629; 250.4110

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-08-09; 录用日期: 2019-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61705019, 91438204)、吉林省青年人才托举工程项目(2017~2018)、吉林省优秀青年人才基金(20170520161JH)、吉林省自然科学基金(20180101338JC)

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

1 引 言

近年来,1.7 μm 波段(1650~1850 nm)光源以其特殊的光谱性质成为国内外研究的热点。该波段处于水分子两个吸收峰(1.45 μm 和 1.9 μm)之间的低谷,同时位于脂肪和胶原的吸收峰。1.7 μm 波段光源用于含水生物组织成像探测时,能降低吸收损耗,并且增加成像的深度。因此,1.7 μm 波段光源适用于光学相干层析成像、多光子荧光显微成像等生物医疗领域^[1-5],该波段多波长光源还能有效提高光学相干层析成像的动态范围以及减缓灵敏度随成像深度的增加而减小的趋势^[6-7]。由于1.7 μm 波段覆盖了C—H 共价键的吸收峰,因此被广泛应用于聚合物焊接处理及有机物测量与检测等领域^[8-11]。此外,1.7 μm 波段高功率光源可作为波长 3~5 μm 中红外波段激光器的抽运源^[12-13],与其他抽运波长(808 nm 和 1.3 μm)相比,1.7 μm 波段的抽运更容易产生 4 μm 波段的激光并能降低量子亏损^[14]。

随着 1.7 μm 波段光源的发展,关于该波段的宽带光源、连续光源和光放大器的研究越来越多。实现 1.7 μm 波段光源的方法主要有两种:1)通过抽运各种掺杂光纤(如掺铒光纤^[15-16]、掺铋光纤^[17]和铋铒共掺光纤^[18])产生覆盖 1.7 μm 波段的宽带谱,进一步通过滤波的方法调整谱形和谱宽;2)采用光纤光参量振荡或基于非线性效应产生覆盖 1.7 μm 波段的宽带谱^[19-27],其中抽运光为 1550 nm 波段光源。

掺铋光纤、铋铒共掺光纤属于较为特殊的光纤,其工艺复杂且不太容易获得。掺铒光纤增益谱覆盖 1.7 μm 波段,不过该波段属于增益谱边缘,强度低。基于非线性效应实现频率转换的方法属于简单可行的方法,其中基于受激拉曼散射的方法是实现其他波段光源的常见方法,不过受激拉曼散射常发生在正常色散区域。相比于受激拉曼散射,在反常色散区域产生的超连续谱也是实现 1.7 μm 波段的优选方法之一。可调脉冲光作为抽运光源,其阈值更低,转换效率更高,且容易实现对所得宽带光源光谱的控制^[28]。

采用连续光源和级联调制器组合的方式,在反常色散区域抽运高非线性色散位移光纤以产生超连续谱。利用光纤波分复用器对所得光谱进行滤波,得到峰值波长为 1748.9 nm 的宽带光源,其输出功率约为 22 dBm,20 dB 的光谱范围约为 1.6~2 μm 。再利用 Sagnac 滤波器得到频率周期为 2.5 nm、强

度周期为 9.5 dB 的多波长宽带光源,这为研究 1.7 μm 波段的宽带光源提供一定的参考。

2 实验结构及原理

实验结构如图 1 所示,1550 nm 波段可调谐连续激光器(OM2210, Tektronix, 美国)作为光源,利用第一强度调制器(IM1)对输出波长为 1565 nm 的连续激光进行强度调制,由任意波形发生器(AWG, M9502A, KEYSIGHT, 马来西亚)产生的 10 GHz 和 5 GHz 双频率正弦信号被微波放大器(EA1)放大后驱动 IM1,使输出脉冲的脉宽更窄且形状接近于高斯脉冲^[29]。利用第二强度调制器(IM2)对经调制后产生的脉冲光进行二次调制,由 AWG 产生的调制频率为 200 MHz、占空比为 1% 的方波信号被微波放大器(EA2)放大后驱动 IM2。级联调制器输出的是重复频率为 200 MHz 的脉冲光。脉冲光通过光放大器(AEDFA-23-B-FA, Amonics, 香港, 中国)的预放大后达到二级放大所需要的阈值,再经过铒镱共掺光纤放大器(EYDFA, FOA-9033, HOYATEK, 深圳, 中国)被进一步放大。放大后的脉冲光被注入到 1 km 的高非线性色散位移光纤(HNL-DSF)中,产生超连续谱。HNL-DSF 的非线性系数为 $10.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 1550 nm 处的色散系数为 $(0 \pm 1) \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。1550 nm 和 1670 nm 复用的波分复用器(WDM)用作一次滤波,由一段 1.5 m 长的保偏光纤(PMF)、偏振控制器(PC)和一个光纤耦合器(OC)组成的 Sagnac 环用作二次滤波,将滤波后的光输入到光谱分析仪(OSA, AQ6375, Yokogawa, 日本)中以观测其光谱,再经 10 GHz 的光电探测器(PD)后输入到示波器(OSC, DSO-X 93204A, Agilent Technologies, 美国)以观测其波形。

级联调制器可以用于产生重复频率和脉宽可调的脉冲光,第一调制器用于产生窄脉宽的脉冲序列(皮秒量级),第二调制器通过时间同步产生不同重复频率的脉冲序列,具体原理如图 2 所示,其中 T 为时间。

光纤中超连续谱的产生是非线性效应和色散效应共同作用的结果。脉冲光在光纤中传输产生超连续谱的过程可由非线性薛定谔方程(NLSE)来表示,当抽运脉宽大于 1 ps 时^[30],有

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \left(\sum_{m \geq 1} \beta_m \frac{i^{m-1}}{m!} \frac{\partial^m}{\partial T^m} \right) A = i\gamma |A|^2 A, \quad (1)$$

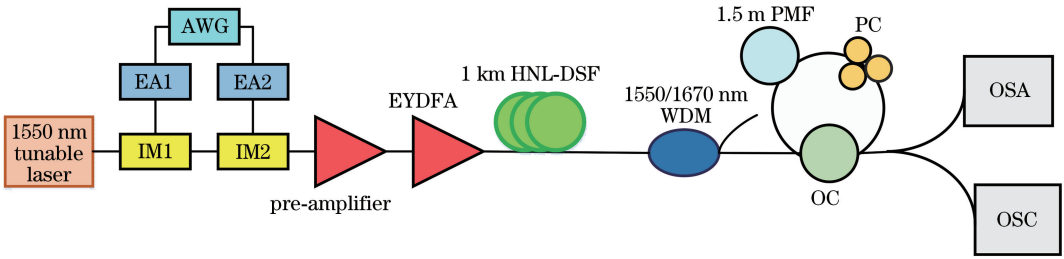


图 1 1.7 μm 宽带光源实验结构图

Fig. 1 Experimental design of broadband light source at 1.7 μm

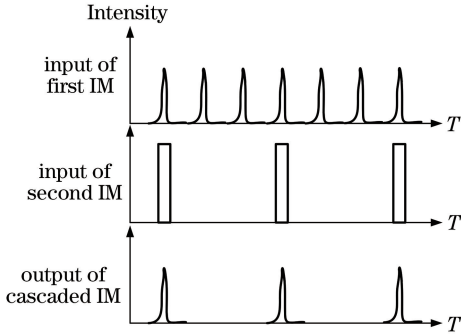


图 2 基于级联调制器的脉冲序列产生原理

Fig. 2 Generation principle of pulse sequence based on cascaded-modulator

式中: A 为脉冲振幅; α 为损耗系数; β_m 为 m 阶色散系数; γ 为非线性系数。

当脉宽较宽的抽运脉冲(脉宽为皮秒、纳秒量级甚至连续波激光)作用于光纤反常色散区时,调制不稳定性效应(MI)主导了超连续谱的初始产生过程,由于 MI 的作用,入射脉冲在传输足够的距离之后,会分裂并演化为一系列的孤子脉冲。其后,每一个子脉冲都会经历孤子分解、孤子自频移等过程,从而展宽超连续谱。光纤在不同抽运波长处有不同的群速度色散,且放大器在不同波长处存在不同的增益,导致不同波长抽运脉冲的输出功率也不相同。因此,不同波长下的超连续谱是不同的^[31]。

Sagnac 滤波器具有梳状滤波的作用,输出光谱的周期与所选 PMF 的长度有关,可表示为

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (L \Delta n), \quad (2)$$

式中: λ 为工作波长; L 为 PMF 的长度; Δn 为 PMF 快慢轴折射率之差。

当 $\lambda = 1.7 \mu\text{m}$, $L = 1.5 \text{ m}$, $\Delta n = 8 \times 10^{-4}$ 时, Sagnac 滤波器输出光谱的周期约为 2.4 nm。

3 结果与讨论

实验中,将中心波长为 1565 nm、输出功率为 13 dBm 的连续激光注入第一强度调制器中进行调

制,加载经微波放大器放大后的 10 GHz 和 5 GHz 的双频率正弦信号,光信号经光电探测器转换为电信号,利用示波器进行测量,可以观察到如图 3 所示的 62 ps 的脉冲信号。将获得的脉冲光注入第二强度调制器中进行二次调制,加载经微波放大器放大后的重复频率为 200 MHz、占空比为 1% 的方波信号。由示波器测量到的输出电信号如图 4 所示,通过对比可知,输出脉宽基本不变。因此,可通过级联调制对脉冲光进行调整优化,以便对超连续谱进行实验研究。

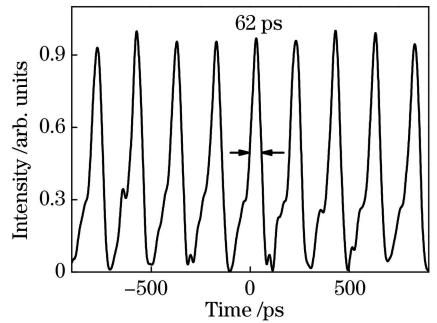


图 3 经过 IM1 后的输出信号

Fig. 3 Output signal after IM1

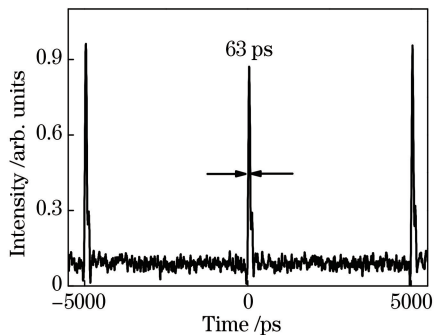


图 4 经过级联调制器后的输出信号

Fig. 4 Output signal after cascaded-modulator

较低的输出光功率达不到 EYDFA 放大所需的功率阈值,因此通过加入一个小信号放大器对功率进行放大。将经 EYDFA 放大后的脉冲光注入到 1 km 的 HNL-DSF 中,随着输出功率的不断加

非线性效应开始产生,从而产生超连续谱。将衰减后的光谱注入光谱分析仪,当抽运波长为 1565 nm 时,不同输出功率下的光谱如图 5 所示,随着输出功率的增加,光谱越发趋于平坦,光谱宽度也越来越宽,长波处可达到 2050 nm。但此时存在一大部分残留的抽运光及放大器带来的放大自发辐射(ASE)光谱。然而,从图 5 中未观察到色散波,根据色散波的产生条件^[32-33],推测可能是由抽运脉宽有限和峰值功率不足所致。所以,图 5 中没有向短波方向延伸的光谱。

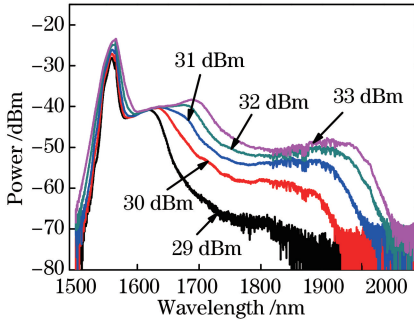


图 5 经过 HNL-DSF 后不同输出功率下的光谱

Fig. 5 Spectra after HNL-DSF under different output powers

此外,在固定激光器功率和光纤放大器输入电流的条件下,抽运光在不同波长处的输出特性如表 1 所示,表 1 中 \bar{P} 为抽运光输出的平均功率, P_0 为抽运光输出的峰值功率, τ 为抽运光输出的脉宽,其中平均功率和脉宽是由实验测量获得的,峰值功率是根据实验结果计算得到的。根据输出特性可以进行下一步实验设计及结果分析。由表 1 中的平均功率可知,相比于其他波长,1565 nm 波长更接近所用放大器增益光谱的最高点,具有较大的增益。同时由于超连续谱激光的光谱特性与抽运激光的峰值功率和波长有关,因此在实验中选取 1565 nm 抽运光。

表 1 不同抽运波长下的输出特性

Table 1 Output characteristics under different pump wavelengths

Pump wavelength λ /nm	Average power \bar{P} /W	Peak power P_0 /W	Pulse width τ /ps
1545	1.57	115	68
1550	1.63	125	65
1565	1.75	136	63
1575	1.34	97	69

将不同波长的抽运光注入 HNL-DSF,测得的光谱如图 6 所示,理论上,当抽运波长在正常色散区域时,光谱展宽以长波部分的受激拉曼散射为

主^[32];而当抽运波长调节到零色散区域及较接近零色散波长的反常色散区域时,调制不稳定性 and 拉曼散射是导致光谱展宽的主要机制。从实验结果来看,当抽运波长为 1545 nm 时,光谱展宽以受激拉曼散射为主。抽运波长为 1565 nm 和 1550 nm 时,光谱展宽形状基本一致,光谱展宽机制差别不大,应该都属于拉曼散射、孤子自频移等效应。图中 1565 nm 抽运光产生的光谱展宽大于 1550 nm,这是由于 1565 nm 波长更接近所用放大器增益光谱的最高点。当抽运波长调节到 1575 nm 时,光谱展宽不明显,其原因是光放大器在 1575 nm 波长处的增益不大,有限的抽运光放大功率不足以产生宽带谱。图 7 为抽运波长为 1565 nm、输出功率为 33 dBm 时产生的超连续谱所对应的信号波形图。

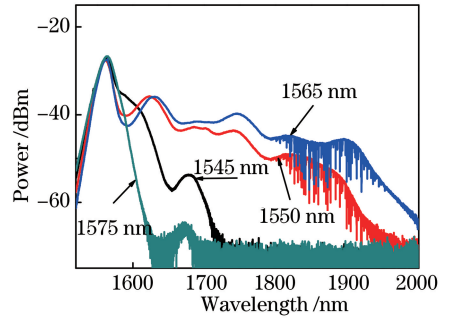


图 6 经过 HNL-DSF 后不同波长下的光谱

Fig. 6 Spectra after HNL-DSF under different wavelengths

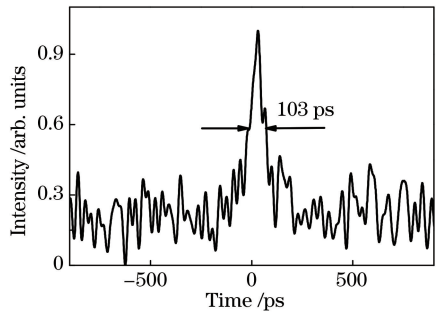


图 7 经过 HNL-DSF 后输出信号波形图

Fig. 7 Waveform of output signal after HNL-DSF

由图 6 可知,所得光谱中 1550 nm 波段的抽运光占主要部分,为得到 1.7 μm 宽带光源,采用 1550 nm 和 1670 nm 复用的 WDM 滤掉残余的抽运光,完成光谱整形。经 WDM 滤波后的光谱如图 8 所示,抽运光基本被滤除,谱形趋于平坦,得到峰值波长为 1748.9 nm 的宽带光源,其输出功率约为 22 dBm, 20 dB 的光谱范围约为 1.6~2 μm ,谱宽约为 419 nm。

在输出光功率受限的情况下,将利用 Sagnac 梳状滤波器得到的多波长光源应用于光学相干层析成

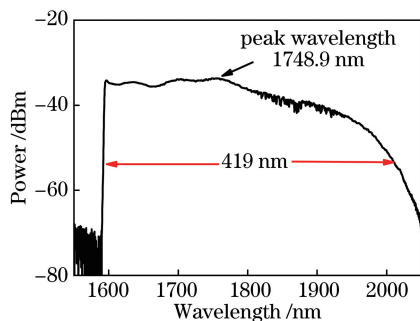


图 8 经过 WDM 滤波后的光谱

Fig. 8 Spectrum after WDM filtering

像中,可以进一步改善灵敏度和动态范围,并且光纤 Sagnac 梳状滤波器也被用来对光源的输出进行光谱采样^[7]。因此采用 Sagnac 滤波器进行再次滤波,滤波后的宽带谱如图 9(a)所示,得到宽带梳状光源输出光谱的周期为 2.5 nm,与(2)式计算结果基本

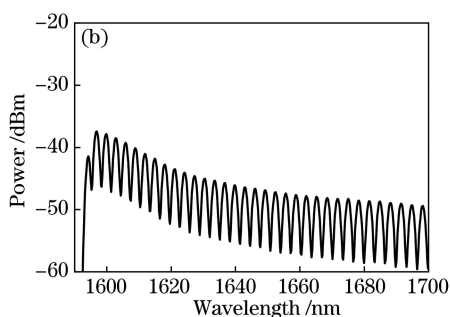
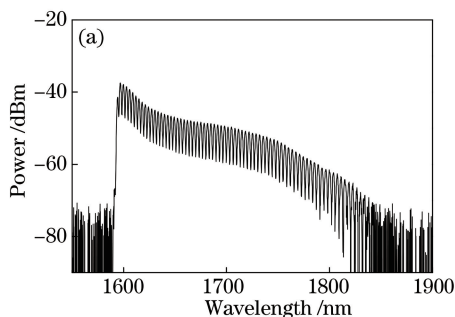


图 9 经 Sagnac 滤波后的结果。(a)宽带光谱图;(b)光谱细节图

Fig. 9 Results after Sagnac filtering. (a) Broadband spectrum; (b) spectral detail map

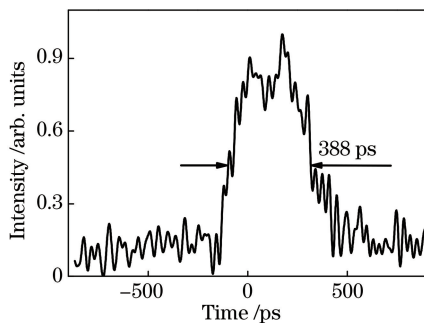


图 10 宽带光源的输出信号

Fig. 10 Output signal of broadband light source

在固定激光器功率、光纤放大器输入电流和第一调制器调制频率的前提下,调节第二调制器的调制频率,使其分别为 200, 250, 400 MHz,将不同重复频率的抽运脉冲注入 HNL-DSF,观测不同重复频率的抽运脉冲对产生超连续谱和滤波后光谱的影响,实验结果如图 11 所示。由图 11(a)可知,第二调制器的调制频率为 200, 250, 400 MHz 时,产生的光谱谱宽明显较窄,这是由于在相同平均功率的条

一致,图 9(b)为宽带谱的细节图。经滤波后的输出电信号如图 10 所示,所得宽带光源的脉宽为 388 ps。出现该现象的原因包括:1) WDM 在两个输出波长之间的交叉区域中的色散变化较大,当过滤此区域光谱时,可能产生脉冲展宽;2)当入射脉冲经过 Sagnac 环时,Sagnac 梳状滤波器会改变光谱形状和谱宽,同时在光谱中产生高频分量,在一定程度上也会影响脉冲展宽。

如图 9 所示,利用 Sagnac 环滤波所得的光谱并不理想,中心波长发生偏移,需要重新优化滤波器、适当减小插入损耗或寻找更优的滤波手段来实现中心波长为 1.7 μm 的多波长宽带光源。同时,产生的脉冲光脉宽恶化严重,通过适当减小 HNL-DSF 的长度、减少色散对脉宽的影响或加入色散补偿来尝试实现脉宽更窄的宽带光源。

件下,频率低的信号具有更高的峰值功率,从而得到更宽的光谱展宽。由图 11(b)可知,当第二调制器的调制频率为 200 MHz 时,Sagnac 环存在较大的损耗且工作状态没有被优化,过滤了大量较低功率的长波光谱,从而导致滤波后的光谱差别不大。

此外,利用光功率计测量光谱功率在 50 min 内的波动情况,如图 12 所示,结果显示所得多波长激光输出的平均功率在 50 min 内的抖动约为 ± 1 dB。抖动主要是由抽运源、放大器的功率波动和实验温度变化等环境因素引起的。

4 结 论

提出一种基于级联调制器抽运源产生超连续谱并采用光纤波分复用器滤波整形的方法,获得峰值波长为 1748.9 nm、20 dB 谱宽约为 419 nm、输出功率约为 22 dBm 的宽带光源,并通过加入 Sagnac 滤波器得到频率周期为 2.5 nm、强度周期为 9.5 dB 的多波长宽带光源。此外,实验分析了不同抽运功率、

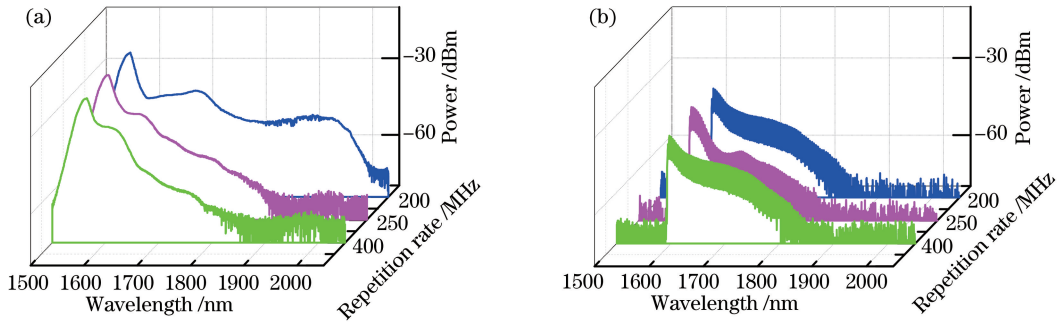


图 11 不同重复频率下的光谱。(a)经过 HNL-DSF;(b)经过 Sagnac 环

Fig. 11 Spectra under different repetition rates. (a) After HNL-DSF; (b) after Sagnac ring

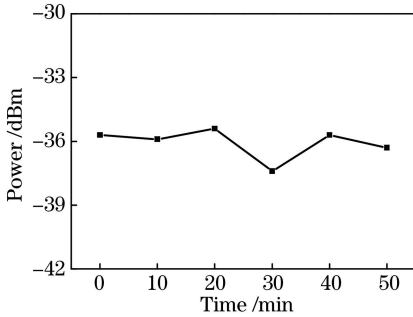


图 12 多波长激光输出的功率抖动

Fig. 12 Power fluctuation of multi-wavelength laser output

波长及重复频率对超连续谱展宽的影响。该结果为 $1.7 \mu\text{m}$ 波段宽带光源的研究以及其作为光源在光学层析成像系统中的应用提供重要参考。

致谢 感谢中佛罗里达大学闻和、天津大学王伟、山西医科大学杨光晔在光源产生及脉宽演化理论方面的讨论和帮助。

参 考 文 献

[1] Hasegawa T, Sogawa I, Suganuma, H. A near infrared angioscope visualizing lipid within arterial vessel wall based on multi-spectral image in $1.7 \mu\text{m}$ wavelength band [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8575: 857506.

[2] Tanaka M, Okuno T, Obi H, *et al.* Performance improvement by a broadband super-luminescent diode light source in $1.7\text{-}\mu\text{m}$ spectroscopic spectral-domain optical coherence tomography for lipid distribution imaging in a coronary artery [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8926: 89262T.

[3] Horton N G, Wang K, Kobat D, *et al.* *In vivo* three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain[J]. Nature Photonics, 2013, 7(3): 205-209.

[4] Nguyen T N, Kieu K, Churin D, *et al.* High power

soliton self-frequency shift with improved flatness ranging from 1.6 to $1.78 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(19): 1893-1896.

[5] Lu Y, Li Z L, Wang X Z, *et al.* Development of 50 kHz intravascular swept source optical coherence tomographic system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0207001.

卢宇, 李中梁, 王向朝, 等. 50 kHz 血管内扫频光学相干层析成像系统 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0207001.

[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] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, *et al.* Welding of polymers using a $2 \mu\text{m}$ thulium fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2095-2099.

[9] Maeda Y, Yamada M, Endo T, *et al.* 1700 nm ASE light source and its application to mid-infrared spectroscopy [C] // 2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology, July 6-10, IEEE, 2014: 410-411.

[10] Chambers P, Austin E A D, Dakin J P. Theoretical analysis of a methane gas detection system, using the complementary source modulation method of correlation spectroscopy [J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(8): 1629-1636.

[11] Ono J, Hsu M C, Honda Y, *et al.* Newly developed $1.7 \mu\text{m}$ band external cavity laser and its application to evaluation of ethanol concentration in distilled spirits [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 31 July-4 Aug. 2017, Singapore, Singapore, IEEE, 2017: 1-4.

- [12] Jelinková H, Doroshenko M E, Šulc J, *et al.* Laser-diode pumped dysprosium-doped lead thiogallate laser output wavelength temporal evolution and tuning possibilities at 4.3-4.7 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9726: 97261A.
- [13] 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.
- [14] Sujecki S, Sójka L, Beres-Pawlik E, *et al.* Modelling of a simple Dy³⁺ doped chalcogenide glass fibre laser for mid-infrared light generation [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2010, 42(2): 69-79.
- [15] Daniel J M O, Simakov N, Tokurakawa M, *et al.* Ultra-short wavelength operation of a thulium fibre laser in the 1660-1750 nm wavelength band [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18269-18276.
- [16] Xiao X S, Guo H T, Yan Z J, *et al.* 3 W narrow-linewidth ultra-short wavelength operation near 1707 nm in thulium-doped silica fiber laser with bidirectional pumping[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(4): 135-138.
- [17] Khagai A, Melkumov M, Riumkin K, *et al.* Mode-locked bismuth fiber laser operating at 1.7 μm based on NALM [C]. *Laser Applications Conference on Optical Society of America*, 2017: JTU2A.20.
- [18] Yamada M, Senda K, Tanaka T, *et al.* Tm³⁺-Tb³⁺-doped tunable fibre ring laser for 1700 nm wavelength region[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(20): 1287-1288.
- [19] Chung H Y, Liu W, Cao Q, *et al.* Er-fiber laser enabled, energy scalable femtosecond source tunable from 1.3 to 1.7 μm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15760-15771.
- [20] Zhu H Y, Guo J H, Duan Y M, *et al.* Efficient 1.7 μm light source based on KTA-OPO derived by Nd: YVO₄ self-Raman laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 345-348.
- [21] Zhang P, Wu D, Du Q L, *et al.* 1.7 μm band narrow-linewidth tunable Raman fiber lasers pumped by spectrum-sliced amplified spontaneous emission [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(35): 9742-9748.
- [22] Chen N, Li B W, Kang J Q, *et al.* Widely tunable time-division-multiplexed pumped fiber optical parametric oscillator[C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*. IEEE, 2016: JTU5A.64.
- [23] Becheker R, Tang M, Hanzard P H, *et al.* High-energy picosecond fiber optical parametric oscillator emitting in the biological window around 1.7 μm [C] // *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*. 25-29 June 2017, Munich, Germany, IEEE, 2017: 1.
- [24] Cadroas P, Abdeladim L, Kotov L, *et al.* All-fiber femtosecond laser providing 9 nJ, 50 MHz pulses at 1650 nm for three-photon microscopy[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(6): 065506.
- [25] Wang P, Shi H X, Tan F Z, *et al.* Tunable femtosecond pulse source from 1.6 to 2.3 μm with 100 kW peak power in an all-fiber system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(9): 091405.
- [26] Fang X, Wang Z Q, Zhan L. Efficient generation of all-fiber femtosecond pulses at 1.7 μm via soliton self-frequency shift[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(4): 046107.
- [27] Zhang P, Wang T S, Zhang Y, *et al.* Experimental research on broadband optical source and gain spectrum for optical coherence tomography at 1.7 μm region[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0701006.
- 张鹏, 王天枢, 张岩, 等. 光学层析成像用 1.7 μm 波段增益谱和宽带光源实验研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0701006.
- [28] Hou J, Chen S P, Chen Z L, *et al.* Recent developments and key technology analysis of high power supercontinuum source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080010.
- 侯静, 陈胜平, 陈子伦, 等. 高功率超连续谱光源研究进展与关键技术分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080010
- [29] Soto M A, Alem M, Amin S M, *et al.* Optical sinc-shaped Nyquist pulses of exceptional quality [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2898.
- [30] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. New York: Academic Press, 2007.
- [31] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [32] Cristiani I, Tediosi R, Tartara L, *et al.* Dispersive wave generation by solitons in microstructured optical fibers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(1): 124-135.
- [33] Gao J. Tunable mode-locked fiber laser pumped supercontinuum source[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2018, 26(1): 25-30.
- 高静. 可调谐锁模光纤激光器泵浦的超连续谱光源 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 25-30.