

基于类噪声脉冲抽运的高功率全光纤中红外超连续谱光源

刘 昆 师红星 刘 江 谭方舟 周冠锐 王 璞

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 报道了一个基于类噪声脉冲抽运的高功率全光纤结构的中红外超连续谱光源。利用非线性环镜锁模技术, 在1966 nm处实现类噪声脉冲激光输出, 3 dB光谱宽度为11 nm, 脉冲包络宽度为1.4 ns, 重复频率为3.36 MHz。将该纳秒类噪声脉冲作为两级单模掺铥光纤放大器的种子源进行功率放大。在此过程中, 类噪声脉冲的最大输出功率可达28.5 W, 相应的光谱范围为1.9~2.4 μm 。最后将放大的类噪声脉冲耦合到一段10 m长的氟锆酸盐ZBLAN光纤中, 实现光谱的进一步展宽。此时, ZBLAN光纤的最大输出功率为14.3 W, 相应的光谱范围为1.9~3.62 μm 。

关键词 激光器; 光纤激光器; 光纤放大器; 中红外激光; 超连续谱光源

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0902003

High-Power All-Fiber Mid-Infrared Supercontinuum Generation Pumped by Noise-Like Pulses

Liu Kun Shi Hongxing Liu jiang Tan Fangzhou Zhou Guanrui Wang Pu

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract A high-power all-fiber mid-infrared (mid-IR) supercontinuum (SC) generation in a single-mode ZBLAN fiber pumped by amplified noise-like pulses is reported. The mid-IR SC system is a 2 μm master oscillator power amplifier (MOPA) construction including a seed source and two-stage single-mode thulium-doped fiber amplifier (TDFA) followed by a single-mode ZBLAN fiber. A noise-like pulse fiber oscillator with wavepacket width of 1.4 ns and repetition rate of 3.36 MHz at 1966 nm is used as a seed source of mid-IR SC system. In the last stage TDFA, a SC covering from 1.9 to 2.4 μm with maximum output power of 28.5 W is generated. Then, the output SC of TDFA is injected into a 10 m single-mode ZBLAN fiber for further spectrum broadening. At last, a mid-IR SC covering from 1.9 to 3.62 μm with the maximum output power of 14.3 W is generated.

Key words lasers; fiber laser; fiber amplifier; mid-infrared laser; supercontinuum laser source

OCIS codes 140.3510;140.3070;320.6629

1 引 言

中红外超连续谱(SC)光源在光谱分析、大气探测、生物医疗以及军事等领域应用广泛,特别是全光纤的中红外超连续谱光源因其结构紧凑、光束质量好、输出亮度高等优势,一直是各单位研究的热点。目前,用于产生中红外超连续谱激光的光纤主要是在中红外波段(2~5 μm)具有较低传输损耗的软玻璃光纤如氟化物玻璃光纤、硫系玻璃光纤和碲酸盐玻璃光纤等。在这3种软玻璃光纤中,氟化物玻璃光纤因为生产技术最为成熟,并且本身具有较高的环境稳定性和较高的激光损伤阈值,被认为是最适合产生中红外超连续谱激光的

收稿日期: 2015-01-30; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61235010、61177048)

作者简介: 刘 昆(1989—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器、高功率超连续谱光源等方面的研究。

E-mail: liukun8901@163.com

导师简介: 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

中红外非线性光纤之一。目前,基于氟锆酸盐玻璃(ZBLAN)光纤的中红外超连续谱光源已经有大量报道^[1-15]。2009年,Qin等^[1]采用1.5 μm波段的高峰值功率飞秒激光脉冲抽运仅有几个厘米长度的ZBLAN光纤,产生了覆盖从可见波段到6.28 μm的超宽中红外超连续谱激光。同年,Xia等^[4]采用多级纳秒掺铒光纤放大器作为抽运源,通过级联一段单模光纤实现纳秒脉冲到飞秒脉冲的突破后再抽运ZBLAN光纤,实现了平均功率为10.5 W的中红外超连续谱输出,相应的光谱范围为0.8~4.0 μm。2011年,Kulkarni等^[5]报道了基于掺铒光纤放大器和ZBLAN光纤的中红外超连续谱光源,其最大平均输出功率为2.6 W,相应的光谱范围为1.9~4.5 μm。2013年,Heidt等^[11]采用调制皮秒掺铒光纤放大器抽运ZBLAN光纤产生了瓦级超连续谱输出,相应的光谱范围为0.75~4.0 μm。2014年,Yang等^[13]采用锁模皮秒大模场面积掺铒光纤放大器抽运ZBLAN光纤实现了高达13 W的中红外超连续谱输出,相应的光谱范围为1.9~4.2 μm。虽然大模场面积掺铒光纤放大器具有较高的输出功率,但它需要高功率的光纤模场适配器实现与单模ZBLAN光纤之间的高效率耦合问题,在一定程度上限制了它在抽运ZBLAN光纤方面的优势。然而小芯径的掺铒光纤放大器与单模ZBLAN光纤能直接实现模场匹配,因此可以直接用于抽运ZBLAN光纤产生中红外超连续谱。最近,这种结构的超连续谱系统已经被报道实现了大于20 W的中红外超连续谱输出^[15]。根据以上的报道,ZBLAN光纤的抽运源多采用锁模技术产生的皮秒、飞秒脉冲和调制技术产生的皮秒、纳秒脉冲激光器,而没有采用类噪声脉冲作为抽运源的相关报道,然而在近红外波段类噪声脉冲已经被建议用于超连续谱的产生,并且在实验上取得了较好的结果^[16-18]。因此采用类噪声脉冲抽运ZBLAN光纤产生中红外超连续谱研究在一定程度上具有重大意义。

报道了一个基于类噪声脉冲抽运的高功率全光纤中红外超连续谱光源。整个中红外超连续谱系统由一个类噪声脉冲种子源、两级单模掺铒光纤放大器和一段单模ZBLAN光纤组成。类噪声脉冲种子源的中心波长为1966 nm,3 dB带宽为11 nm,重复频率为3.36 MHz,脉冲包络宽度为1.4 ns。在掺铒光纤放大器中该类噪声脉冲输出功率被放大至28.5 W,相应的光谱范围从1.9到2.4 μm。随后掺铒光纤放大器的输出光谱在ZBLAN光纤中被进一步展宽到3.62 μm,相应的输出功率为14.3 W。据本文所知,这是类噪声脉冲首次用于中红外超连续谱的产生。

2 实验装置

基于类噪声脉冲抽运的高功率全光纤结构中红外超连续谱光源的实验装置如图1所示,由2.0 μm类噪声脉冲种子源、两级2.0 μm包层抽运掺铒光纤放大器以及一段单模ZBLAN光纤组成。其中,2.0 μm类噪声脉冲种子源实验装置如图2所示。该类噪声脉冲种子源是基于非线性环境(NOLM)锁模原理,主要包括左环和右环两个环形腔结构,两个环形腔经由一个50/50保偏(PM)2×2光纤耦合器相连接。左环形腔由一个1550 nm连续波(CW)抽运光纤激光器、一个1550/2000 nm波分复用器(WDM)、一段铒/铥共掺光纤(Coractive)、一个光纤隔离器和一个90/10光纤输出耦合器(10%输出)组成。其中,1550 nm光纤激光器最大输出功率为1.5 W;铒/铥共掺光纤的长度约为2 m,在1550 nm处的吸收系数约为11 dB/m;所用的光纤隔离器工作波段为2000 nm,隔离度为35 dB,用于保证激光的单向传输。右环形腔主要包括两个光纤偏振控制器(PC)和一段约55 m长的SM1950光纤(Nuferm)。其中光纤偏振控制器主要用于确保两束相向传输的激光最大程度相干。该类噪声脉冲激光种子源的总腔长被控制在60 m左右。

为了保证类噪声脉冲激光种子源的稳定性,其输出激光经由一个光纤隔离器(35dB隔离度)后入射进掺铒光纤预放大器。掺铒光纤预放大器主要由2个6 W的793 nm半导体激光抽运源、一个(2+1)×1的光纤合束器和一段3 m长的掺铒双包层光纤(Nuferm)组成。其中,掺铒双包层光纤的纤芯直径为10 μm,相应的数值孔径(NA)为0.15,内包层直径为130 μm,相应的数值孔径为0.46,该增益光纤在793 nm处的包层吸收系数为3 dB/m。掺铒光纤预放大器的输出激光经过一个光纤隔离器(35 dB隔离度)后入射进掺铒光纤功率放大器(TDFPA)。掺铒光纤功率放大器的结构与预放大器的结构类似,不同之处在于它由6个30 W的793 nm半导体激光进行抽运,在(6+1)×1合束器后所测得的最大输出功率为160 W。

一段0.5 m长的SMF-28光纤被熔接到掺铒光纤功率放大器(TDFPA)的输出端,用于剥离残余的793 nm抽运激光。为了实现中红外的超连续谱输出,SMF-28光纤的输出激光通过机械对接的方法耦合进单模ZBLAN光纤。实验中采用1963 CW光纤激光器测得的SMF-28光纤与ZBLAN光纤的耦合效率为75%左

右。所采用的ZBLAN光纤长度为10 m,纤芯直径为9 μm,相应的数值孔径为0.2,包层直径为125 μm。偏大的纤芯直径和数值孔径主要是为了降低光纤在大于3 μm波长处的弯曲损耗。无论是SMF-28光纤的输出端还是ZBLAN光纤的输出端都被角度切割,避免不必要的菲涅耳反射,影响系统的稳定性。

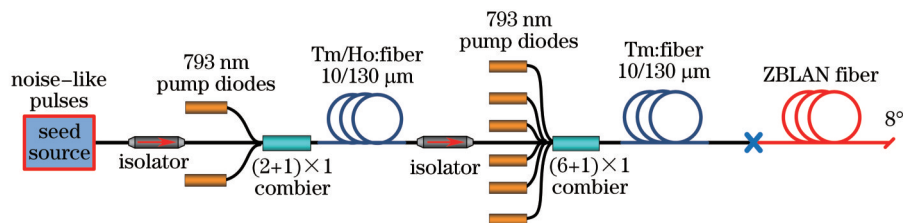


图1 基于类噪声脉冲抽运的全光纤中红外超连续谱光源的实验装置图

Fig.1 Schematic setup of high-power all-fiber mid-infrared supercontinuum source pumped by amplified noise-like pulses

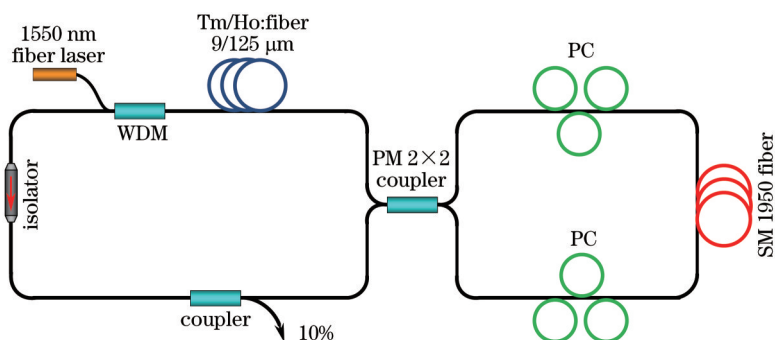


图2 基于非线性环境锁模的类噪声脉冲激光种子源

Fig.2 Noise-like pulses seed source based on NOLM

3 实验结果与分析

通过仔细地调节类噪声脉冲激光种子源的两个光纤偏振控制器和入射的抽运功率,在入射抽运功率为1020 mW时,类噪声脉冲激光种子源开始产生稳定的类噪声脉冲输出,此时的输出功率约为10 mW左右。使用分辨率为0.05 nm的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6375)和带有12.5 GHz InGaAs光电探头(EOTET-5000F)的25 GHz实时示波器(Agilent DSO-X92504A)测得该种子源的频域和时域特性如图3(a)和(b)所示。从图3可以看出,该种子源运行的中心波长为1966 nm,3 dB光谱带宽为11 nm,重复频率为3.36 MHz,脉冲包络宽度为1.4 ns。较大的光谱宽度、脉宽以及与腔长相关的重复频率在一定程度上证明了该激光腔运行在类噪声脉冲锁模机制下。

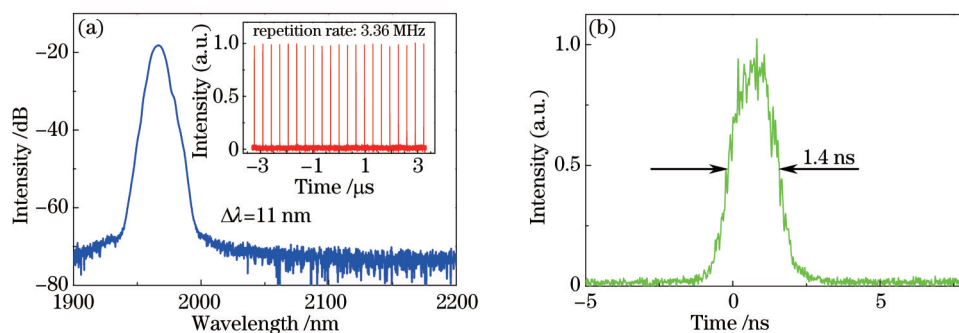


图3 (a)类噪声脉冲激光种子源输出光谱和脉冲串; (b)类噪声脉冲激光种子源的单个脉冲

Fig.3 (a)Optical spectrum and pulse train of noise-like pulse seed source; (b) single pulse of noise-like pulse seed source

为了给掺铥光纤功率放大器提供足够高的平均功率,该种子激光的输出功率在掺铥光纤预放大器中被放大到1 W左右,此时测得相应的输出光谱如图4所示,中心波长为1966 nm,3 dB光谱带宽为11.5 nm,没有明显非线性效应的产生。

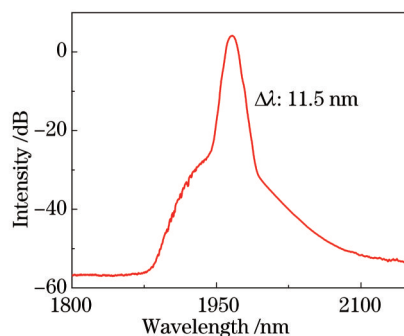


图4 掺铥光纤预放大器的输出光谱

Fig.4 Optical spectrum of thulium-doped fiber preamplifier

在掺铥光纤功率放大器中,来自掺铥光纤预放大器的类噪声脉冲得到充分的放大。由于所使用的双包层掺铥光纤的纤芯直径较小和类噪声脉冲包络当中飞秒次脉冲的峰值功率较高,在类噪声脉冲放大过程中很容易受非线性效应的影响。如图5(b)所示,当掺铥光纤功率放大器的输出功率为11.7 W时,强烈的非线性效应如受激拉曼散射、调制不稳、自相位调制等已经导致了超连续谱的产生,此时超连续谱的长波边缘已经拓展到2300 nm附近。进一步增加793 nm半导体抽运激光的功率,该超连续谱的长波边缘逐渐展宽到大于2400 nm(超过了光谱分析仪的测量范围)。图5(a)为掺铥光纤功率放大器的平均输出功率随793 nm抽运激光功率的变化关系图。从图5(a)可以看出随着793 nm 半导体抽运激光功率的增加掺铥光纤功率放大器的斜率效率有缓慢下降的趋势。这主要是由光纤非线性效应和石英玻璃光纤对大于2400 nm的中红外波长有较大的吸收损耗所引起。实验中,无论是光纤的非线性效应还是光纤在中红外波长处较大的吸收损耗都会导致掺铥光纤功率放大器中热量的累积(光-光转换效率低所致),虽然掺铥光纤放大器已经采用自制的水冷系统进行了有效地冷却,但是为了防止其损伤,在掺铥光纤功率放大器的输出功率为28.5 W时,没有继续增加793 nm 半导体抽运激光的功率。此时抽运功率为96 W,相应的光-光转换效率为29.7%。

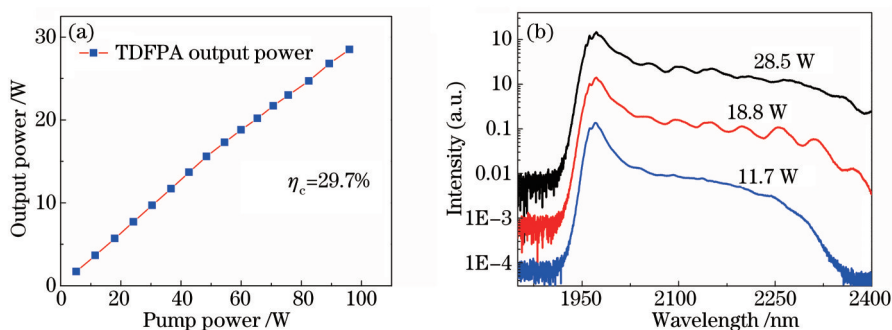


图5 (a) 掺铥光纤功率放大器平均输出功率随793 nm注入抽运功率的变化;

(b) 掺铥光纤功率放大器在不同输出功率下的输出光谱

Fig.5 (a) Output power of TDFPA versus 793 nm pump power; (b) output spectra of TDFPA at different output powers

为了实现光谱的进一步展宽,掺铥光纤功率放大器的输出被耦合进单模ZBLAN光纤。图6(a)为ZBLAN光纤产生的中红外超连续谱的平均功率随793 nm 半导体抽运激光功率变化的关系图。从图6(a)可以看出中红外超连续谱的输出功率随793 nm 半导体抽运激光功率变化的斜率效率基本上是逐渐递减的,但在抽运功率为70 W左右时有一定的波动,这是由于SMF-28光纤与ZBLAN光纤在高功率下耦合效率的波动造成的。当掺铥光纤功率放大器的输出功率分别为11.7、18.8、28.5 W时,相应的中红外超连续谱的输出功率分别为6.8、10、14.3 W,如图6(b)所示。从图6(b)可以看出,随着中红外超连续谱输出功率的增加,超连续谱的长波边缘逐渐被展宽到大于3 μm波段,由于ZBLAN光纤的非线性系数比石英光纤高几十倍,同时在3~5 μm波段有较低的传输损耗,因此在最大输出功率下长波边缘能展宽到3.62 μm,进一步的波长展宽受到掺铥光纤功率放大器输出功率和峰值功率的限制。最终中红外超连续谱的输出功率相对于掺铥光纤功率放大器的抽运功率(96 W的793 nm 半导体抽运激光)的光-光转换效率为14.9%。光-光转换效率能通过提高掺铥光

纤放大器的光-光转换效率和SMF-28光纤与ZBLAN光纤之间的耦合效率进一步提高。

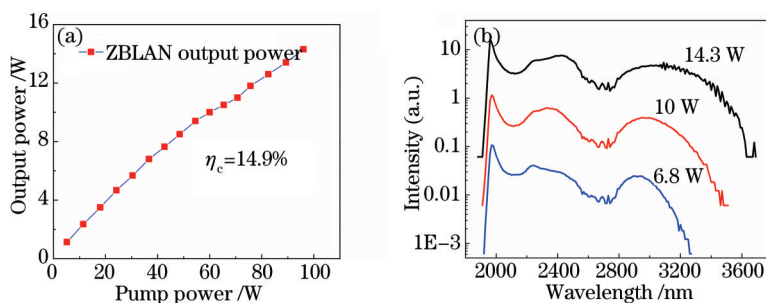


图6 (a) 中红外超连续谱平均输出功率随793 nm注入抽运功率的变化; (b) 中红外超连续在不同输出功率下的输出光谱
Fig.6 (a) SC output power from ZBLAN fiber versus 793 nm pump power; (b) output spectra of SC from ZBLAN fiber at different output powers

4 结 论

报道了一个类噪声脉冲抽运的高功率全光纤结构的中红外超连续谱光源。首先采用非线性环镜锁模技术在1966 nm处实现类噪声脉冲激光输出,3 dB光谱宽度为11 nm,脉冲包络宽度为1.4 ns,重复频率为3.36 MHz。然后将该纳秒类噪声脉冲在单模掺铊光纤放大器中放大至28.5 W,相应的光谱范围为1.9~2.4 μm。将放大的类噪声脉冲注入到一段10 m长的ZBLAN光纤中,实现光谱的进一步展宽,此时,ZBLAN光纤的最大输出功率为14.3 W,相应的光谱范围为1.9~3.62 μm。这是类噪声脉冲首次用于中红外超连续谱的产生。

参 考 文 献

- 1 C Xia, M Kumar, O P Kulkarni, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation to 4.5 microm in ZBLAN fluoride fibers by nanosecond diode pumping[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(17): 2553-2555.
- 2 C Xia, M Kumar, M Cheng, *et al.*. Power scalable mid-infrared supercontinuum generation in ZBLAN fluoride fibers with up to 1.3 watts time-averaged power[J]. *Opt Express*, 2007, 15(3): 865-871.
- 3 G Qin, X Yan, C Kito, *et al.*. Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to 6.28 μm in a fluoride fiber[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(16): 161103.
- 4 C Xia, Z Xu, M N Islam, *et al.*. 10.5 W time-averaged power mid-IR supercontinuum generation extending beyond 4 μm with direct pulse pattern modulation[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 422-434.
- 5 P Kulkarni, V V Alexander, M Kumar, *et al.*. Supercontinuum generation from 1.9 to 4.5 μm in ZBLAN fiber with high average power generation beyond 3.8 μm using a thulium-doped fiber amplifier[J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(10): 2486-2498.
- 6 M Eckerle, C Kieleck, J Widerski, *et al.*. Actively Q-switched and mode-locked Tm³⁺-doped silicate 2 μm fiber laser for supercontinuum generation in fluoride fiber[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(4): 512-514.
- 7 C Agger, C Petersen, S Dupont, *et al.*. Supercontinuum generation in ZBLAN fibers-detailed comparison between measurement and simulation[J]. *J Opt Soc Am B*, 2012, 29(4): 635-645.
- 8 I Kubat, C S Agger, P M Moselund, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation to 4.5 μm in uniform and tapered ZBLAN step-index fibers by direct pumping at 1064 or 1550 nm[J]. *J Opt Soc Am B*, 2013, 30(10): 2743-2757.
- 9 W Yang, B Zhang, K Yin, *et al.*. High power all fiber mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a 2 μm MOPA system[J]. *Opt Express*, 2013, 21(17): 19732-19742.
- 10 J Swiderski, M Michalska, G Maze. Mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a gain-switched mode-locked Tm-doped fiber laser and amplifier system[J]. *Opt Express*, 2013, 21(7): 7851-7857.
- 11 A M Heidt, J H V Price, C Baskiotis, *et al.*. Mid-infrared ZBLAN fiber supercontinuum source using picosecond diode-pumping at 2 μm[J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 24281-24287.
- 12 Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing, *et al.*. All-fiber mid-infrared supercontinuum source from 1.9 μm to 4.3 μm[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102013.
- 张 斌, 杨未强, 侯 静, 等. 1.9~4.3 μm全光纤中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1102013.
- 13 W Yang, B Zhang, G Xue, *et al.*. Thirteen watt all-fiber mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a 2 μm

- MOPA system[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(17): 1849–1852.
- 14 Liu Jiang, Liu Kun, Shi Hongxing, *et al.*. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum laser source[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902004.
刘江, 刘昆, 师红星, 等. 高功率全光纤中红外超连续谱激光光源[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902004.
- 15 K Liu, J Liu, H Shi, *et al.*. High power mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode ZBLAN fiber with up to 21.8 W average output power[J]. *Opt Express*, 2014, 22(20): 24384–24391.
- 16 Y Takushima, K Yasunaka, Y Ozeki, *et al.*. 87 nm bandwidth noise-like pulse generation from erbium-doped fiber laser[J]. *Electron Lett*, 2005, 41(7): 399–400.
- 17 A Zaytsev, C H Lin, Y J You, *et al.*. Supercontinuum generation by noiselike pulses transmitted through normally dispersive standard single-mode fibers[J]. *Opt Express*, 2013, 21(13): 16056–16062.
- 18 S S Lin, S K Hwang, J M Liu. Supercontinuum generation in highly nonlinear fibers using amplified noise-like optical pulses[J]. *Opt Express*, 2014, 22(4): 4152–4160.

栏目编辑: 宋梅梅