

文章编号 1004-924X(2018)01-0025-06

可调谐锁模光纤激光器泵浦的超连续谱光源

高 静

(中国电子科技集团有限公司 电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 为了实现平坦度更好、光谱覆盖可见光波段的超连续谱激光输出,研究了泵浦波长可调谐的全光纤结构超连续谱光纤激光器。设计搭建了一台非线性偏振旋转锁模脉冲光纤激光器,实现了 9 种中心波长的耗散孤子皮秒脉冲输出,波长调谐范围为 1 041~1 076 nm;以它作为种子源进行了两级功率放大,并泵浦 10 m 长的光子晶体光纤,在泵浦激光功率为 500 mW 时,得到 9 种输出光谱特性不同的超连续谱激光,得到当泵浦激光中心波长为 1 050 nm 时,更利于实现光谱范围更宽、平坦度更好、可见光分量更多的超连续谱激光输出。为进一步拓宽超连续谱激光的光谱范围、提升光谱平坦度,将泵浦激光功率提升至 1.45 W,最终实现了输出功率为 600 mW、短波边界为 470 nm、600~1 700 nm 内 10 dB 光谱宽度为 1 053 nm 的超连续谱激光输出。

关键词: 锁模光纤激光器;超连续谱;可调谐;非线性偏振旋转

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0025

Tunable mode-locked fiber laser pumped supercontinuum source

GAO Jing

(China Academy of Electronics and Information Technology,
China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China)

* Corresponding author, E-mail: gaojinggigi@163.com

Abstract: In order to realize supercontinuum (SC) generation with broadband spectral range covering more visible wavelength, a pump wavelength tunable all-fiber SC fiber laser was experimentally investigated. A tunable nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser was proposed, which could output picosecond dissipative solitons pulse with nine different central wavelengths from 1 041 to 1 076 nm. After two-stage power amplifier, the tunable laser with relatively high power was coupled into 10 m long photonic crystal fiber, SC with nine different output spectra was realized when the pump laser power was 500 mW. And it was found that when the pump laser central wavelength was 1 050 nm, the generated SC was with broad and flat spectrum and containing a large part of visible wavelength components. To further broaden the SC spectral range and obtain better flatness, the pump laser power was enhanced up to 1.45 W, the generated SC output power was 600 mW, while the short-wavelength boundary was 470 nm, 10 dB spectral bandwidth was 1 053 nm within 600—1 700 nm wavelength range.

Key words: mode-locked fiber laser; supercontinuum; tunable; nonlinear polarization rotation

收稿日期:2017-06-15;修订日期:2017-08-10.

基金项目:所企横向课题(No. 16602303)

1 引言

超连续谱激光器与传统固定波长的激光器(即只有一个或几个固定波长输出的激光器,如氦-氖激光器、Nd:YAG 激光器等)相比,具有更宽的光谱范围;与传统的宽带光谱光源(如 LED 光源、氙气灯等)相比,具有更高的光束质量、亮度以及更好的光谱平坦度。尤其是光谱范围覆盖可见光波段的超连续谱激光器,由于其频率分量涵盖多种分子的吸收峰以及不同探测器的光谱响应范围,所以应用更为广泛,如生物医学成像、超精密时间及频率测量、宽带光纤通信、大气科学、激光反隐、光电对抗等^[1-8]。而基于光纤激光器的全光纤结构超连续谱激光器,结合了光纤激光器和超连续谱激光器的共同优点,具有电光转换效率高、光束质量好、亮度高、体积小、结构灵活、散热性好、输出光谱范围宽以及平坦度好等优点,是目前超连续谱激光器研究的热点。

超连续谱激光的光谱宽度、平坦度等特性由泵浦脉冲激光的波长、峰值功率以及光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)的长度、色散特性和非线性系数等决定。目前,光谱范围覆盖可见光波段的超连续谱激光多利用波长为 $1\ \mu\text{m}$ 左右的高峰值功率的皮秒或纳秒掺镱脉冲光纤激光器泵浦零色散波长为 $1\ 040\ \text{nm}$ 的 PCF 实现^[9-15]。但现有的超连续谱激光器的泵浦激光多为参数固定的脉冲激光,即泵浦激光波长、脉冲宽度、重复频率等为固定值,通过增加脉冲激光的平均功率提高入射到 PCF 的激光峰值功率,实现超连续谱光谱宽度的拓宽和平坦度的提升。虽然超连续谱激光的输出功率已经达到数十瓦甚至百瓦,但输出光谱的平坦度仍然有待提升,以波长 $600\sim 1\ 700\ \text{nm}$ 的 $10\ \text{dB}$ 光谱宽度评价其平坦度,通常小于 $1\ 000\ \text{nm}$ ^[13],即使有超过 $1\ 000\ \text{nm}$ 的超连续谱激光,也是除去了残留的泵浦激光波长^[10,15]。在 PCF 参数一定的情况下,超连续谱的光谱平坦度不仅取决于泵浦脉冲激光的峰值功率,还与泵浦波长密切相关。虽然研究人员对超连续谱输出光谱随泵浦脉冲激光功率的演化报道较多^[16],但对改变泵浦激光波长的超连续谱激光的研究报道却很少。

本文利用可调谐掺镱非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)被动锁

模光纤激光器泵浦光子晶体光纤产生超连续谱激光。将 9 种不同中心波长的种子脉冲激光经过两级功率放大并泵浦光子晶体光纤,得到了输出功率为 $260\ \text{mW}$ 的 9 种光谱特性不同的超连续谱激光,当泵浦脉冲激光中心波长为 $1\ 050\ \text{nm}$ 时,得到的超连续谱输出光谱范围更宽、平坦度更好、短波边界波长更短。将泵浦脉冲激光功率提高至 $1.4\ \text{W}$,实现了输出功率为 $600\ \text{mW}$ 、光谱为 $470\sim 1\ 700\ \text{nm}$ 、 $10\ \text{dB}$ 光谱宽度为 $1\ 053\ \text{nm}$ 的超连续谱激光。

2 实验装置

图 1 为可调谐掺镱 NPR 锁模光纤激光器泵浦的超连续谱激光器的结构示意图。采用文献[17]中的 NPR 环型腔结构掺镱光纤振荡器作为种子源,谐振腔的腔长约为 $12\ \text{m}$,腔内插入一段保偏光纤作为滤波器。预放大级采用纤芯泵浦方式:最大输出功率为 $400\ \text{mW}$ 、波长为 $975\ \text{nm}$ 的单模半导体泵浦激光(LD-1)通过波分复用器(WDM)耦合进增益介质(Yb-1, Nufern, SM-YSF-HD),其长度为 $2.2\ \text{m}$,纤芯/包层直径为 $6/125\ \mu\text{m}$,吸收系数为 $250\ \text{dB/m}@975\ \text{nm}$,信号光经过隔离器(ISO1)后进入主放大级;主放大级采用包层泵浦方式:最大输出功率为 $9\ \text{W}$ 的波长为 $915\ \text{nm}$ 的多模半导体泵浦激光(LD-2)通过一个 $(2+1)\times 1$ 的泵浦耦合器耦合进增益介质(Yb-2, Nufern, LMA-YDF-15/130),其长度为 $6\ \text{m}$,吸收系数为 $1.8\ \text{dB/m}@915\ \text{nm}$,增益光纤后熔接一个包层光剥离器以剥除剩余泵浦光;放大之后的脉冲激光通过一个模场匹配器(MFA)耦合进入长度为 $10\ \text{m}$ 的 PCF 中,PCF 的零色散波长约为 $1\ 040\ \text{nm}$,非线性系数约为 $11\ \text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$,PCF 输出端面切成 8° 角以减小端面反射光,避免损坏激光器。



图 1 可调谐掺镱 NPR 锁模光纤激光器泵浦的超连续谱光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of tunable mode-locked Yb-doped NPR fiber laser pumped supercontinuum (SC) laser source

3 实验结果与讨论

通过调节 NPR 光纤振荡器内的偏振控制器改变泵浦种子激光的偏振态,实现了中心波长为 1 041~1 076 nm 的锁模脉冲激光输出,输出光谱如图 2 所示(YOKOGAWA AQ-6370C)。由于该谐振腔为全正色散腔,输出光谱具有两个陡峭的边沿,说明输出脉冲为耗散孤子^[18],不同中心波长光谱边沿到边沿(10 dB)的光谱宽度约为 11~15 nm。在种子激光器的泵浦功率为 200 mW 时,测得不同输出波长的种子激光输出功率为 17.2~35.08 mW,这主要是由于不同中心波长的种子锁模脉冲的放大自发辐射不同,且增益光纤对不同波长激光的吸收不同,导致不同波长的激光输出功率有差异。当泵浦种子激光的重复频率为 17.14 MHz,测得的脉冲序列如图 3 所示(Tektronixs DPO-4054B)。实验同时测量了不同波长的泵浦种子激光的脉冲宽度,得到的脉冲宽度约为 9~11 ps。图 4 给出了中心波长为 1 060 nm 时种子激光脉冲的自相关曲线(Femtochrome Research, FR-103WS),利用高斯拟合计算得到泵浦种子激光的脉冲宽度约为 9.23 ps。

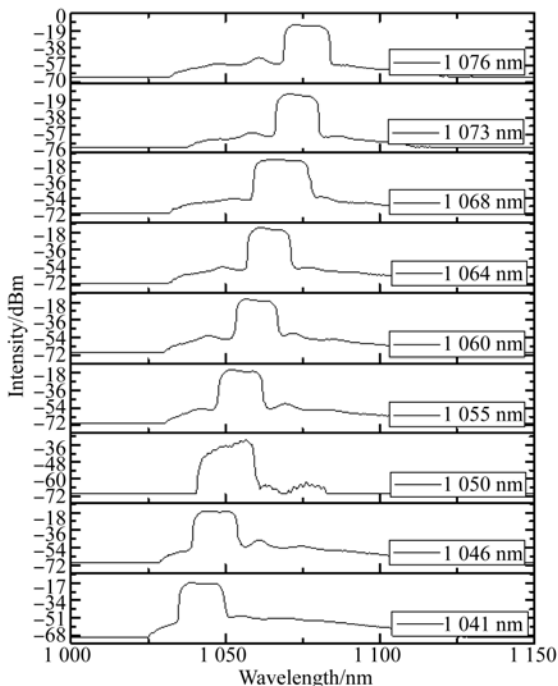


图 2 种子源输出中心波长为 1 041~1 076 nm 的光谱
Fig.2 Spectra of NPR fiber oscillator at central wavelengths from 1 041 nm to 1 076 nm

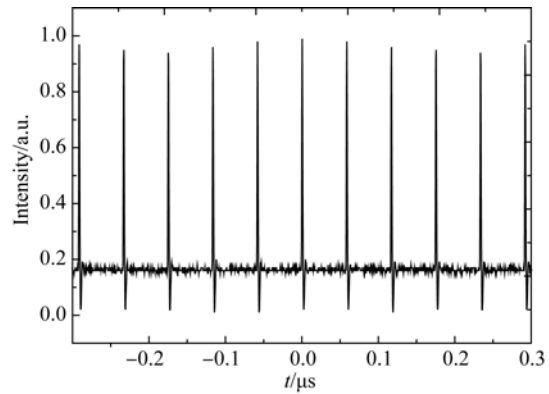


图 3 泵浦种子激光输出的脉冲序列
Fig.3 Oscilloscope pulse trace of pump laser seed

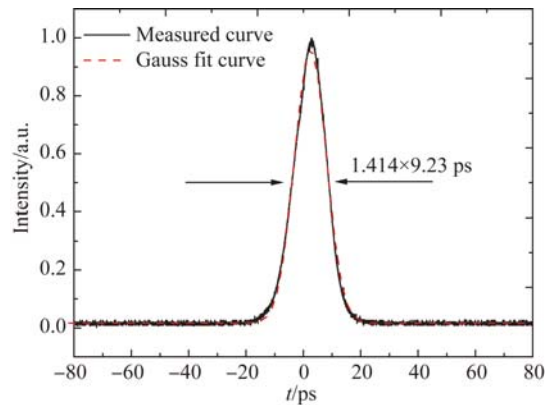


图 4 种子的输出自相关曲线
Fig.4 Autocorrelation trace of pulse of laser seed

在预放大级 LD-1 功率为 300 mW 时,得到了输出功率为 80 mW 左右的放大脉冲激光,在主放大级 LD-2 功率约为 1.5 W,此时脉冲放大激光功率约为 570 mW。图 5 为测量的 PCF 在 9 组不同波长的脉冲激光泵浦下产生的超连续谱光谱图,泵浦脉冲激光的中心波长分别为 1 041,1 046,1 050,1 055,1 060,1 064,1 068,1 073 和 1 076 nm,此时的超连续谱输出功率约为 260 mW。

当超连续谱激光器的泵浦激光中心波长为 1 041 nm 时,超连续谱的光谱约为 800 ~ 1 600 nm,这是因为 PCF 的零色散波长在 1 040 nm 附近,泵浦激光波长宽度约为 12 nm,即光谱约为 1 035~1 047 nm,部分激光位于正常色散区,部分位于反常色散区。由于正常色散泵浦不能出现自相位调制和四波混频,不易出现短波分量,但反常色散区可以出现上述两种非线性效应,所以该波长下产生的超连续谱是正常色散和反常色散共同作用的结果。在 1 046 nm 处,此时正常色散区的泵

浦激光能量减少,反常色散区的泵浦激光能量增多,所以光谱宽度比 1 041 nm 泵浦时略有展宽。而当泵浦激光中心波长在 1 050 nm 时,此时所有的激光分量都位于反常色散区,而且是处于非常接近零色散波长处的反常色散区,容易产生色散波和发生孤子捕获效应,此时超连续谱更容易获得更多的短波分量和长波分量,光谱宽度最宽,由于光谱两端能量的增加,光谱平坦度也较好。随着泵浦激光中心波长的进一步增加,波长逐渐远

离 PCF 的零色散波长,受到受激拉曼散射效应的影响,超连续谱光谱的长波截止波长逐渐向长波方向移动,在泵浦中心波长大于 1 070 nm 时,泵浦波长远离 PCF 的零色散波长约为 40 nm,此时影响超连续谱的主要非线性效应为受激拉曼散射,显然由于泵浦波长较长,超连续谱向长波方向拓展的范围更宽,能量主要集中在大于泵浦波长的长波长端,长波方向的截止波长大于 1 700 nm,短波截止波长约为 900 nm。

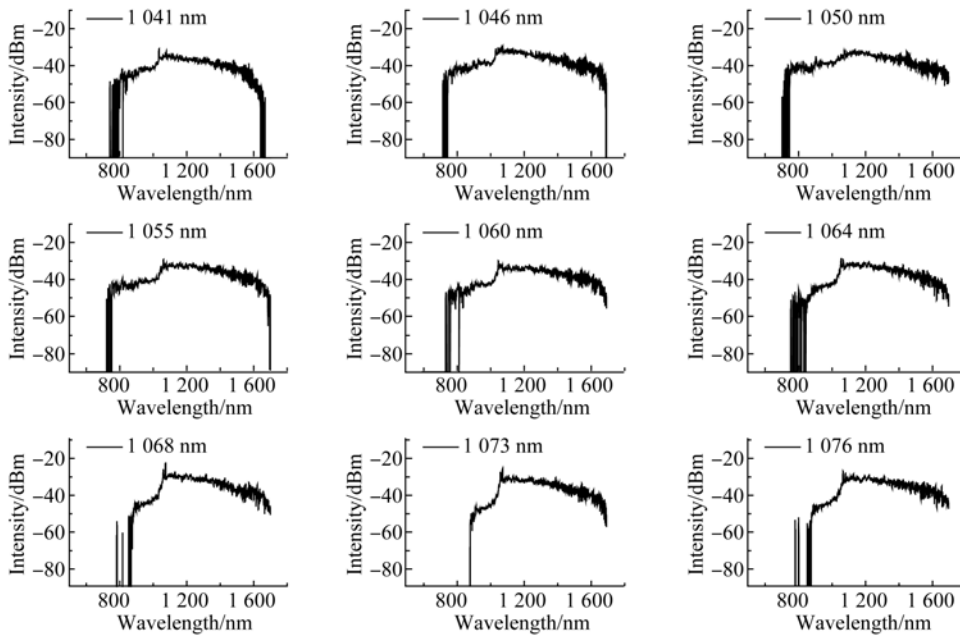


图 5 平均功率为 570 mW 的不同中心波长脉冲激光泵浦光子晶体光纤产生的超连续谱光谱

Fig. 5 Spectra of SC generated in PCF pumped by pulsed laser at different central wavelengths with 570 mW average power

由于入射到 PCF 的泵浦脉冲激光的峰值功率较低,约为 3.6 kW,所以即使在泵浦中心波长为 1 050 nm 时,超连续谱短波截止波长仍然大于 600 nm。因此为了得到短波截止波长更短、光谱平坦度更好的超连续谱,将泵浦的脉冲激光功率提升至 1.45 W,此时入射泵浦激光的峰值功率约为 9.2 kW,图 6 给出了此时超连续谱的输出光谱,输出功率为 600 mW,在波长 600~1 700 nm 内 10 dB 的光谱宽度约为 1 053 nm,且没有明显的残余泵浦光。

由于此时超连续谱范围超过了光谱仪的测量范围,所以利用另外一台光谱仪(Avantes AvaSpec-2048)测量超连续谱的短波边界,如图 7 所示,超连续谱激光的短波边界约为 470 nm。

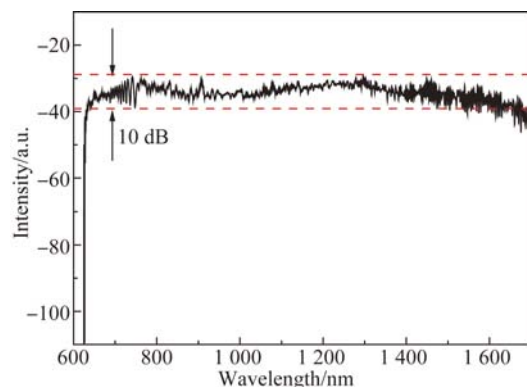


图 6 泵浦脉冲激光中心波长为 1 050 nm 时 600 mW 超连续谱输出功率的输出光谱

Fig. 6 SC spectrum with 600 mW output power at 1 050 nm pump wavelength

超连续谱激光的光谱特性与泵浦激光的峰值功率和波长有关,泵浦激光的波长决定了超连续谱的光谱分布,特别是光谱的平坦度。因此,为得到短波波长更短、光谱平坦度更好且功率更高(数十瓦)的超连续谱激光输出,可以首先利用一台具

有足够高峰值功率的可调谐超短脉冲光纤激光器泵浦光子晶体光纤,找到最佳泵浦激光波长,再优化超短脉冲光纤激光器的参数(如增益光纤长度、放大器级数、每一级放大器的输出功率等)来实现。

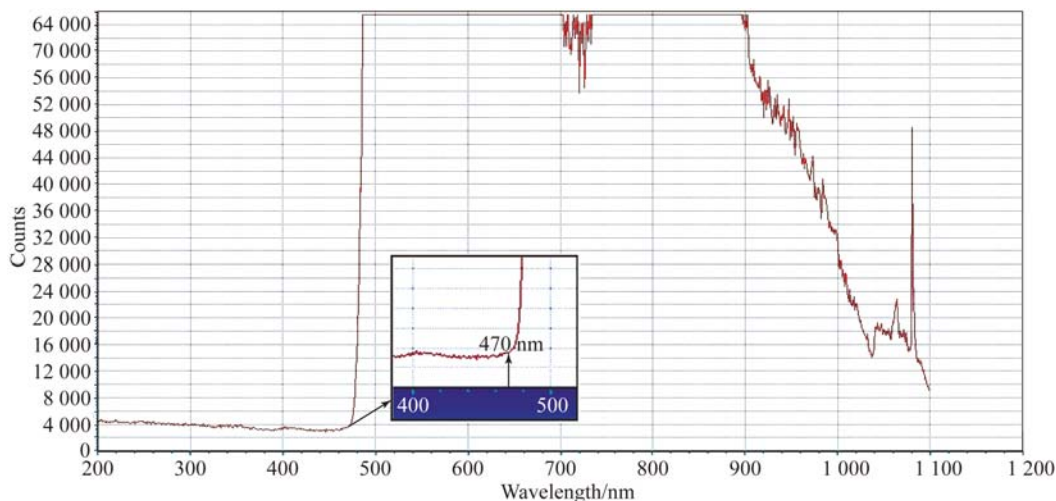


图 7 泵浦脉冲激光中心波长为 1 050 nm 时 600 mW 超连续谱输出功率的输出光谱

Fig. 7 Short-wavelength boundary of SC spectrum with 600 mW output power at 1 050 nm pump wavelength

4 结 论

本文设计搭建了一台可调谐掺镱 NPR 被动锁模光纤激光器泵浦的超连续谱激光器,实现了重复频率为 17.14 MHz、9 种不同中心波长的耗散孤子皮秒脉冲激光输出,调谐波长为 1 041~1 076 nm。将中心波长可调谐的种子脉冲激光经过两级功率放大并泵浦零色散波长为 1 040 nm 的 PCF 进行了超连续谱实验研究。实验结果表明,当泵浦脉冲激光中心波长为 1 050 nm 时,有利于实现输出光谱范围更宽、平坦度更好、短波边

界波长更短的超连续谱。为进一步拓宽超连续谱的光谱范围,提高超连续谱的平坦度,在不改变光子晶体光纤参数,泵浦脉冲激光的中心波长为 1 050 nm 时将 PCF 的泵浦脉冲激光功率提升至 1.45 W,最终实现了输出功率为 600 mW、光谱为 470~1 700 nm、10 dB 光谱宽度(包含泵浦激光波长)为 1 053 nm 的超连续谱激光。该结果对超连续谱光源的光谱平坦度优化具有一定的参考价值。

致谢 感谢北京工业大学激光工程研究院王智勇研究员提供的实验条件和葛廷武老师的有益指导。

参考文献:

- [1] AGRAWAL G P. *Nonlinear Fiber Optics Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Second Edition. Singapore: Elsevier Pte. Ltd., 2009.
- [2] HARTL I, LI X D, CHUDOBA C, *et al.*. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(9): 608-610.
- [3] LINDFORS K, KALKBRENNER T, STOLLER P, *et al.*. Detection and spectroscopy of gold nanoparticles using supercontinuum white light confocal microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(3): 037401.
- [4] VON VACANO B, WOHLLEBEN W, MOTZKUS M. Actively shaped supercontinuum from a photonic crystal fiber for nonlinear coherent microspectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(3): 413-415.
- [5] SMIRNOV S V, ANIA-CASTANON J D, EL-

- LINGHAM T J, *et al.*. Optical spectral broadening and supercontinuum generation in telecom applications [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, 12(2): 122-147.
- [6] FRANK J H, ELDER A D, SWARTLING J, *et al.*. A white light confocal microscope for spectrally resolved multidimensional imaging [J]. *Journal of Microscopy*, 2007, 227(3): 203-215.
- [7] ZHI ZH W, QIN J, AN L, *et al.*. Supercontinuum light source enables *in vivo* optical microangiography of capillary vessels within tissue beds [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3169-3171.
- [8] SELCI S, BERTANI F R, FERRARI L. Supercontinuum ultra wide range confocal microscope for reflectance spectroscopy of living matter and material science surfaces [J]. *AIP Advances*, 2011, 1(3): 032143.
- [9] CHEN K K, ALAM S U, PRICE J H V, *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power [J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5426-5432.
- [10] 陈胜平, 谌鸿伟, 侯静, 等. 30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生 [J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1943-1948.
- CHEN SH P, CHEN H W, HOU J, *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 1943-1948. (in Chinese)
- [11] ZHU S L, GAO C X, HE H D, *et al.*. All fiber supercontinuum light source using photonic crystal fibers pumped by nanosecond fiber laser pulses [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(9): 1629-1632.
- [12] CHEN H W, CHEN SH P, WANG J H, *et al.*. 35 W high power all fiber supercontinuum generation in PCF with picosecond MOPA laser [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(23): 5484-5487.
- [13] HU X H, ZHANG W, YANG ZH, *et al.*. High average power, strictly all-fiber supercontinuum source with good beam quality [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2659-2561.
- [14] 高静, 于峰, 匡鸿深, 等. 纳秒声光调 Q 光纤激光器产生超连续谱 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1138-1142.
- GAO J, YU F, KUANG H S, *et al.*. Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1138-1142. (in Chinese)
- [15] SUNCH, GE T W, LI S Y, *et al.*. 67.9 W high-power white supercontinuum all-fiber laser source [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(14): 3746-3750.
- [16] 高雪健, 王善德, 刘来, 等. 基于硝酸盐微结构光纤的超连续光源 [J]. *发光学报*, 2014, 35(11): 1376-1381.
- GAO X J, WANG SH D, LIU L, *et al.*. Supercontinuum light source based on tellurite microstructure fibers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(11): 1376-1381. (in Chinese)
- [17] GAO J, GE T W, WANG ZH Y. Passively harmonic mode-locked Yb-doped fiber laser for supercontinuum generation [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 086109.
- [18] 张祖兴, 戴国星. 全正色散耗散孤子掺镱光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0214005.
- ZHANG Z X, DAI G X. All-normal-dispersion dissipative soliton Ytterbium-doped fiber laser without additional filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214005. (in Chinese)

作者简介:



高 静(1988—),女,山东临沂人,博士,工程师,2009 年于曲阜师范大学获得学士学位,2015 年于北京工业大学获得博士学位,主要从事光纤激光器、光纤放大器以及超连续谱光纤激光器方面的研究工作。E-mail: gaojinggigi@163.com