

文章编号: 1002-2082 (2021) 03-0565-06

# 位于第三近红外窗口的平坦光纤超连续谱产生

纪海莹<sup>1,2</sup>, 王天枢<sup>1,2</sup>, 熊 浩<sup>1,2</sup>, 马万卓<sup>1,2</sup>, 袁 泉<sup>1,2</sup>, 孙梦茹<sup>1,2</sup>, 林 鹏<sup>1,2</sup>

(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)

**摘 要:**报道了一种基于非线性偏振旋转效应的被动锁模光纤激光器。采用 980 nm 分布式反馈激光器作为泵浦源, 0.5 m 长的高掺杂掺铒光纤作为增益介质。实现了脉冲宽度为 822 fs 的传统孤子锁模脉冲, 输出脉冲的平均功率为 2.8 mW, 信噪比为 55.8 dB。通过微调腔内的偏振控制器, 实现了传统孤子脉冲和孤子分子脉冲间的切换, 孤子分子的脉冲宽度为 312 fs, 信噪比为 53.86 dB。孤子分子脉冲经掺铒光纤放大器放大后泵浦一段 57 m 长的高非线性光纤, 产生了位于第三近红外窗口 (1 600 nm~1 870 nm) 的超连续谱, 其 20 dB 谱宽为 355.8 nm。

**关键词:** 光纤激光器; 非线性偏振旋转; 传统孤子; 孤子分子; 超连续谱

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0308002](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0308002)

## Flat fiber super-continuum spectrum generation in the third near-infrared window

Ji Haiying<sup>1,2</sup>, Wang Tianshu<sup>1,2</sup>, Xiong Hao<sup>1,2</sup>, Ma Wanzhuo<sup>1,2</sup>,

Yuan Quan<sup>1,2</sup>, Sun Mengru<sup>1,2</sup>, Lin Peng<sup>1,2</sup>

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A passively mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation mechanism was reported. The 980 nm distributed feedback laser was used as the pump source and the highly doped erbium-doped fiber with length of 0.5 m was used as the gain medium. The traditional soliton mode-locked pulse with the pulse width of 822 fs was realized, the average power of the output pulse was 2.8 mW, and the signal-to-noise ratio (SNR) was 55.8 dB. By adjusting the polarization controller slightly in the cavity, the switch between traditional soliton pulse and soliton molecule pulse was realized, the pulse width and the SNR of the soliton molecule were 312 fs and 53.86 dB, respectively. The soliton molecule pulse was amplified by the erbium-doped fiber amplifier to pump a 57 m long high nonlinear fiber, which produced a super-continuum spectrum located in the third near-infrared window (1 600 nm~1 870 nm) with a 20 dB spectrum width of 355.8 nm.

**Key words:** fiber laser; nonlinear polarization rotation; conventional soliton; soliton molecule; super-continuum spectrum

## 引言

锁模光纤激光器具有转换效率高、散热性能好、结构紧凑、价格低廉等优点, 是获得皮秒或飞

秒量级超短脉冲的有效来源之一。当超短脉冲入射到高非线性光纤中时, 在色散和非线性效应的共同作用下, 脉冲频谱内产生新的频率成分, 使得

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-02-11

基金项目: 国家自然科学基金 (61975021)

作者简介: 纪海莹 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器技术方面的研究。E-mail: [2018100262@mails.cust.edu.cn](mailto:2018100262@mails.cust.edu.cn)

通信作者: 王天枢 (1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间激光通信、光纤激光器方面的研究。

E-mail: [wangts@cust.edu.cn](mailto:wangts@cust.edu.cn)

出射光的光谱宽度远大于入射光谱,输出的宽带光谱称为超连续谱。超连续谱光源具有光谱范围宽、方向性好、亮度高、空间相干性好等优点,在光学频率计量<sup>[1]</sup>、光学相干层析<sup>[2-3]</sup>、生物医学显微成像<sup>[4-5]</sup>、光通信<sup>[6]</sup>、光纤传感<sup>[7]</sup>、光频梳<sup>[8]</sup>等领域<sup>[9-11]</sup>具有重要的研究与应用价值。

超连续谱的研究最早开始于上世纪六七十年代, Alfano 和 Shapiro 利用倍频锁模铷玻璃皮秒激光泵浦 BK7 光学玻璃,首次获得 400 nm~700 nm 的超连续谱<sup>[12]</sup>。2017 年,王方等人利用飞秒脉冲泵浦氟碲酸盐微结构光纤,得到了 620 nm~2700 nm 范围内的超连续谱<sup>[13]</sup>。2018 年, Chauhan 等人利用飞秒脉冲泵浦高非线性硫化物光子晶体光纤,获得了 437 nm~2850 nm 的超连续谱<sup>[14]</sup>。2019 年,王凯杰等人在实验中观测到束缚态耗散孤子脉冲,并利用该脉冲光泵浦光子晶体光纤,获得了近红外超连续谱<sup>[15]</sup>。2020 年,邹宝英等仿真模拟了飞秒量级的束缚态脉冲在高非线性单模光纤中的传输,并研究了不同子脉冲间隔对产生的超连续谱的影响<sup>[16]</sup>。综上所述,目前对于光纤中产生超连续谱的研究多集中于实现更宽的谱宽,其中很大比例的光谱成分没有实际应用价值,缺少针对实际应用的特定波段的研究。此外,束缚态脉冲泵浦高非线性光纤产生超连续谱的研究报道较少。针对上述问题,本文开展了对位于第三近红外窗口(1600 nm~1870 nm)内的超连续谱的研究,一方面这一窗口内富含脂质分子、聚合物材料等吸收峰,在聚合物材料加工、生物组织成像、气体分子检测等领域具有潜在的应用价值<sup>[17]</sup>;另一方面,开展束缚态脉冲泵浦高非线性光纤产生超连续谱的研究对于超连续谱的优化和应用具有参考价值。

本文搭建了基于非线性偏振旋转锁模的被动锁模掺铒光纤激光器,通过微调腔内的偏振控制

器,可以实现传统孤子锁模脉冲与束缚态锁模脉冲的切换。通过放大束缚态脉冲泵浦高非线性光纤,优化光纤长度,实现了在第三近红外窗口内的平坦超连续谱输出。在第三近红外窗口内的光谱成分平坦度小于 1.62 dB,对于这一窗口内的超连续谱光源的实际应用具有极高的价值。

## 1 实验结构与工作原理

实验所采用的结构如图 1 所示。我们采用 980 nm 分布式反馈激光器通过一个 980 nm/1550 nm 波分复用器背向泵浦一段 0.5 m 长的高掺杂掺铒光纤(Er80-8/125, nLIGHT)。掺铒光纤吸收 980 nm 的泵浦光,由 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 能级跃迁产生自发辐射以及受激辐射产生 1.5  $\mu\text{m}$  波段光被不断增益放大。腔内的两个偏振控制器和一个偏振相关的隔离器共同构成类可饱和吸收体结构,用来实现腔内激光的模式锁定。腔内 10% 的光经过光纤耦合器 1 输出到腔外,剩下的 90% 的光反馈回腔内。输出到腔外的激光经过耦合器 2 的 20% 端口输入光谱分析仪用于显示并记录光谱,经过 80% 端口被连接到腔外的掺铒光纤放大器。腔外的掺铒光纤放大器由 980 nm 半导体激光器、980 nm/1550 nm 波分复用器和 2 m 长的掺铒光纤组成,采用背向泵浦的放大结构。放大后的脉冲光泵浦一段 57 m 长的高非线性光纤,实验中采用的高非线性光纤的数值孔径为 0.35,传输损耗小于 1.5 dB/km,非线性系数为  $10 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。整个结构腔内直接输出和经过高非线性光纤后输出的光谱均由光谱分析仪(optical spectrum analyzer, YOKOGAWA AQ6375)观测并采集,光谱仪最小分辨率为 0.01 nm。脉冲序列通过 10 GHz 高速光电探测器(photodetector)采集,由高速示波器(oscilloscope, Agilent DSO9254A)观测并存储。脉冲信号的频谱通过频谱分析仪(FSA, Agilent N1996A)观测,自相关曲线通过自相关仪(Auto-correlator, FR-103XL)采集。

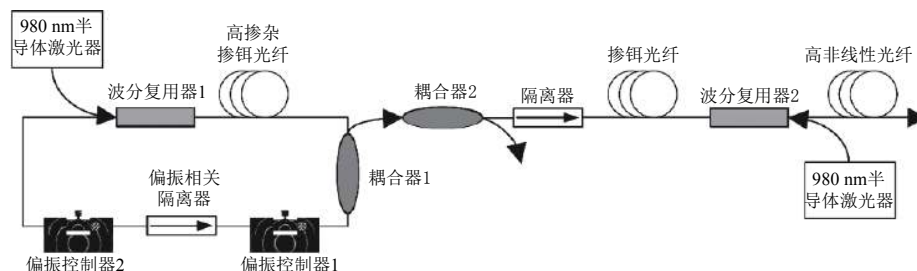


图 1 近红外超连续谱光纤激光器实验结构

Fig. 1 Experimental structure of fiber laser with near-infrared super-continuum spectrum

## 2 实验结果与分析

实验中通过调节偏振控制器和 980 nm 半导体激光器的输出功率来改变环形腔输出的激光的状态。当泵浦功率达到 234 mW 时, 达到激光器锁模阈值, 观测到 1560 nm 脉冲激光输出, 光谱如图 2(a) 所示。光谱两侧对称的分布着的 Kelly 边带表明激光器处于传统孤子锁模状态, 其中心波长为 1562.9 nm, 光谱 3 dB 带宽为 7.39 nm。此时, 激光器工作在基频被动锁模状态, 其脉冲序列如图 2(b) 所示, 可以看到在 800 ns 范围内所有的脉

冲均匀分布, 每个脉冲幅度基本一致, 相邻脉冲间隔为 29.85 ns, 对应于脉冲的重复频率为 33.5 MHz。整个光纤环形腔的长度约为 6 m, 可以理论计算出重复频率值为 33.3 MHz, 非常接近实际测量值。通过图 2(c) 中自相关曲线可以看出输出脉冲的脉冲宽度为 822 fs, 为典型的传统孤子自相关迹。图 2(d) 所示为所测得脉冲的频谱, 55.8 dB 的信噪比表明锁模脉冲的运行状态非常稳定, 当泵浦功率增加到 439 mW 时, 输出功率为 2.8 mW, 对应的单脉冲能量为 83.6 pJ。

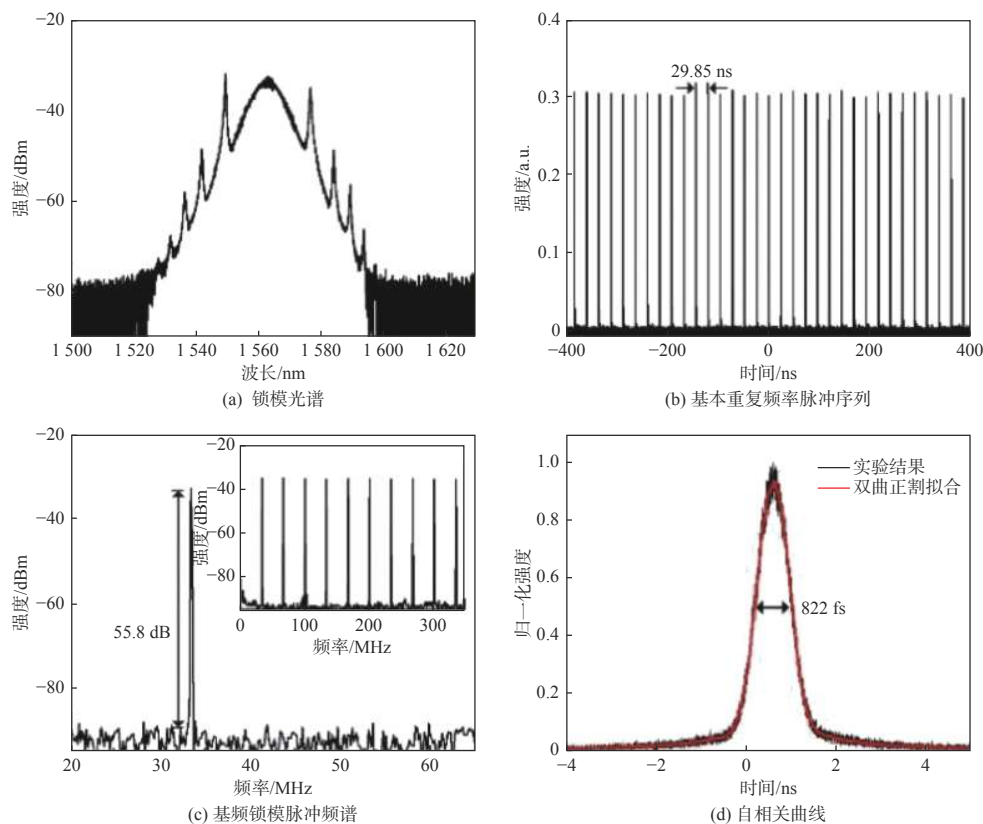


图 2 实验结果

Fig. 2 Experimental results

保持泵浦功率为 439 mW, 在微调偏振控制器的过程中, 非线性偏振旋转机制中类可饱和吸收体的损耗发生变化, 导致泵浦功率超过了脉冲分裂的阈值, 原脉冲将分裂为多个间隔很近的新脉冲即实现了孤子分子脉冲输出。光谱如图 3(a) 所示, 呈现出 Kelly 边带与束缚态孤子共存的状态, 在两个边带之间存在 4 个干涉条纹。这与先前论文中束缚态脉冲的形成与 Kelly 边带相关的色散波这一说法相契合, 从第一脉冲发射的色散波与

第二脉冲产生非线性结合相互作用, 即孤子-连续体相互作用(soliton-continuum interaction)<sup>[18]</sup>。在图 3(b) 自相关曲线中, 脉冲间隔为 493 fs, 在双曲正割拟合下的中心峰值的半高全宽为 312 fs。脉冲的频谱如图 3(c) 所示, 信噪比为 53.86 dB, 显示了脉冲很好的稳定性。示波器测得的脉冲序列如图 3(d) 所示。通过微调偏振控制器, 可以在耦合器 2 的 20% 输出端口分别探测到传统孤子和孤子分子两种脉冲输出, 可以很好地实现两种状态的切换。

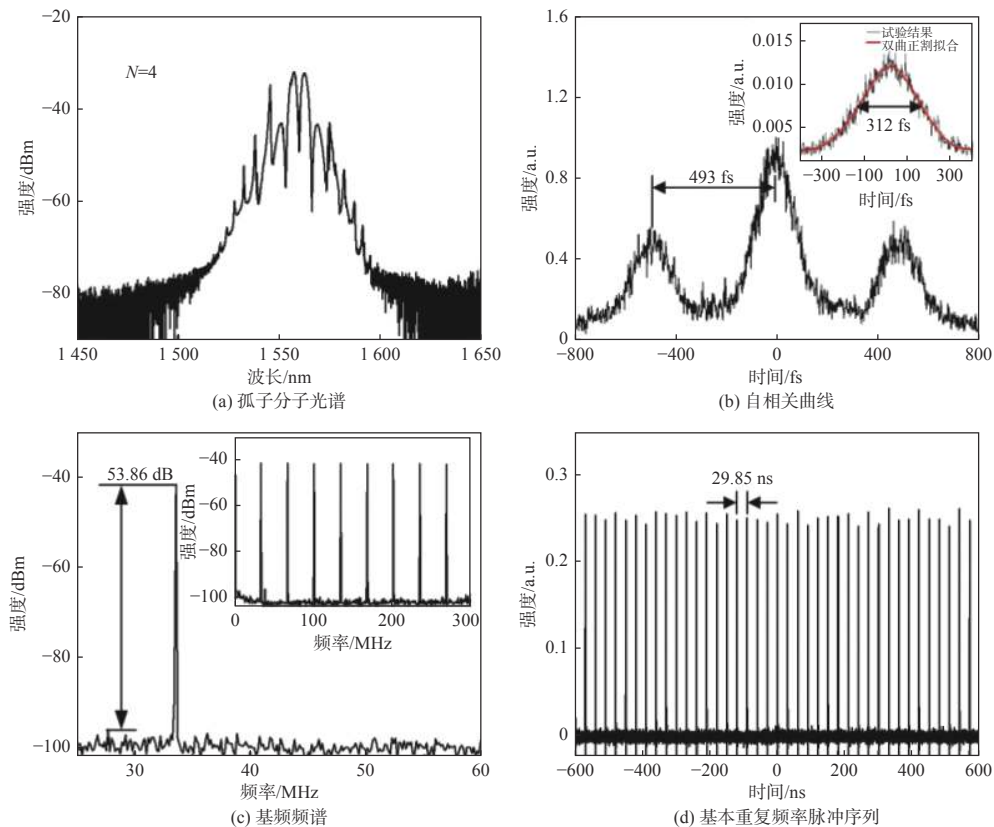
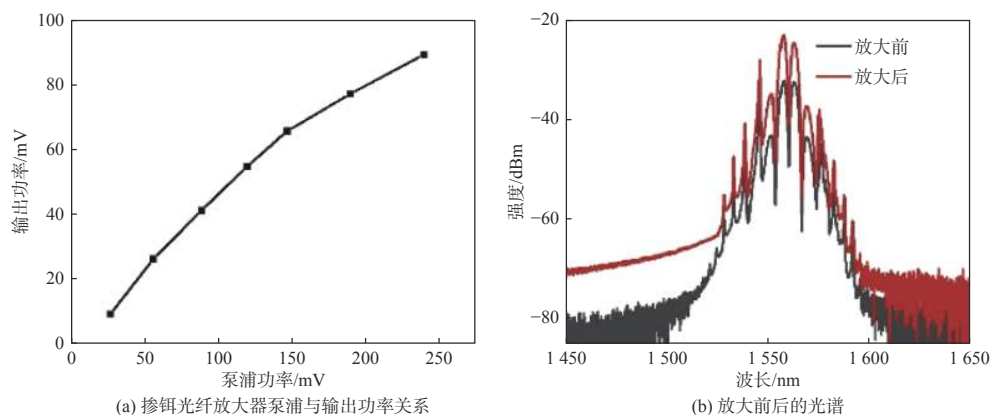


图3 实验结果

Fig. 3 Experimental results

通过掺铒光纤放大器放大后的泵浦功率和输出功率的关系如图4(a)所示。当泵浦功率达到239 mW时, 2.8 mW的信号光被放大到89 mW。放大前后的光谱在图4(b)中, 掺铒光纤放大器中的掺铒光纤在c波段具有更高的增益, 可以明显看出c波段的放大效果优于l波段。放大后的脉冲经大功率光纤隔离器注入57 m的高非线性光纤。在高非线性光纤中, 受到受激拉曼散射、自相位调制、交叉相位调制和四波混频等非线性效应的共同作用, 泵浦光的光谱得到展宽。图4(c)表示不同泵浦功率输出的超连续谱, 可以明显看出, 随着

泵浦功率的增大, 超连续谱逐渐展宽。在89 mW的泵浦功率下的光谱如图4(d)所示, 在1560 nm附近还残留有泵浦光, 在第三近红外窗口内的超连续谱具有小于1.62 dB的平坦度。整个超连续谱的20 dB谱宽高达355.8 nm, 且完全覆盖住1600 nm~1870 nm的第三近红外窗口。由于在这一窗口范围内存在大量的分子吸收峰, 并且恰好位于水分子的吸收峰之间的波谷, 较小的水吸收系数和大量的分子吸收谱线使得这一波段的宽谱光源在包括深层生物成像、光谱分析和材料处理等应用领域具有潜在的价值。



(a) 掺铒光纤放大器泵浦与输出功率关系

(b) 放大前后的光谱



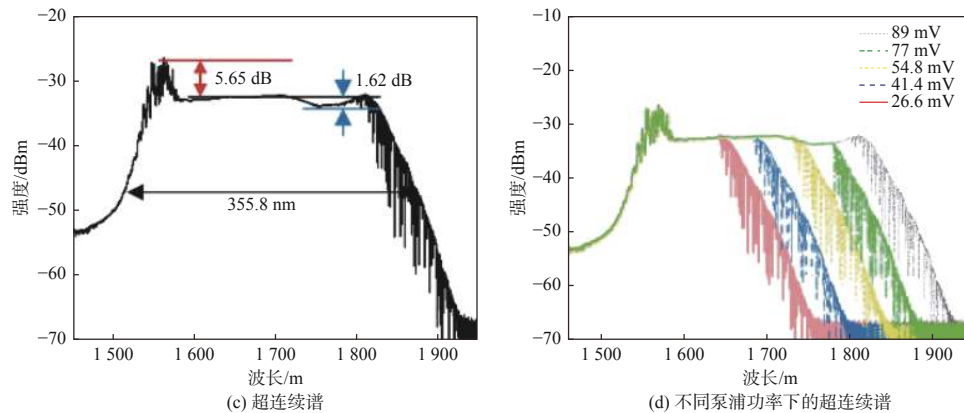


图4 实验结果

Fig. 4 Experimental results

### 3 结论

本文报道了一种基于非线性偏振旋转锁模的光纤激光器,通过调节腔内的偏振控制器控制腔内运行激光的偏振状态,可以分别输出稳定的传统孤子锁模脉冲和束缚态锁模脉冲。通过放大后的束缚态脉冲泵浦高非线性光纤,实现了位于第三近红外窗口、355.8nm(20dB)带宽的平坦超连续谱。激光器整体的结构简单,腔内输出脉冲稳定性好。实验所得的超连续谱完全覆盖第三近红外窗口且平坦度小于1.62 dB,对于在该窗口处的光谱分析、材料处理、生物医用成像等应用具有极高的价值。实验中对于锁模脉冲状态切换的研究存在不足,没有完成对于腔内孤子变化的动力学分析,相关的实验研究将被继续下去。

#### 参考文献:

- [1] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [2] CHEN C L, SHI W S, REYES R, et al. Buffer-averaging super-continuum source based spectral domain optical coherence tomography for high speed imaging[J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(12): 6529-6544.
- [3] MARIA M, GONZALO I B, FEUCHTER T, et al. Q-switch-pumped supercontinuum for ultra-high resolution optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4744-4747.
- [4] SONG Dongsheng, GUO Liang, GUO Bingtao, et al. Modeling and simulation of multi-color CCD detector under super-continuum laser jamming[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(6): 1018-1024.
- [5] BRUPBACHER M C, ZHANG D J, BUCHTA W M, et al. Supercontinuum-laser diffuse reflectance spectroscopy in conjunction with an extended Kubelka -Munk model—a methodology for determination of temperature-dependent quantum efficiency in highly scattering and fluorescent media[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): 2438-2445.
- [6] SU Mingzhe, BI Mingzhe, LIU Peng, et al. 20 Gbit/s atmospheric laser communication based on dense wavelength division multiplexing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(1): 136-139.
- [7] MONRO T M, BELARDI W, FURUSAWA K, et al. Sensing with microstructured optical fibres[J]. *Measurement Science & Technology*, 2001, 12(7): 854-858.
- [8] SCHLIESSER A, PICQUÉ N, HÄNSCH T W. Mid-infrared frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 440-449.
- [9] YU Xiuming, DING Yunfei, CHEN Junda, et al. High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 916-920.
- [10] LEI Yu. The study on supercontinuum generation by

宋冬生, 郭亮, 郭冰涛, 等. 超连续谱激光干扰多色 CCD探测器建模仿真研究[J]. *应用光学*, 2017, 38(6): 1018-1024.

[5] BRUPBACHER M C, ZHANG D J, BUCHTA W M, et al. Supercontinuum-laser diffuse reflectance spectroscopy in conjunction with an extended Kubelka -Munk model—a methodology for determination of temperature-dependent quantum efficiency in highly scattering and fluorescent media[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): 2438-2445.

[6] SU Mingzhe, BI Mingzhe, LIU Peng, et al. 20 Gbit/s atmospheric laser communication based on dense wavelength division multiplexing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(1): 136-139.

苏煜炜, 毕明喆, 刘鹏, 等. 基于密集波分复用的20 Gbit/s大气激光通信[J]. *应用光学*, 2017, 38(1): 136-139.

[7] MONRO T M, BELARDI W, FURUSAWA K, et al. Sensing with microstructured optical fibres[J]. *Measurement Science & Technology*, 2001, 12(7): 854-858.

[8] SCHLIESSER A, PICQUÉ N, HÄNSCH T W. Mid-infrared frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 440-449.

[9] YU Xiuming, DING Yunfei, CHEN Junda, et al. High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 916-920.

于秀明, 丁云飞, 陈俊达, 等. 高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生[J]. *应用光学*, 2018, 39(6): 916-920.

[10] LEI Yu. The study on supercontinuum generation by

- pumping with picosecond-pulses[D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2012.
- 雷宇. 皮秒脉冲泵浦超连续谱产生研究[D]. 湖南: 国防科技大学, 2012.
- [ 11 ] LIU Zhenyi, LIU Shuanglong, HUANG Aiwang, et al. Generation of broadband supercontinuum source with pulse width of one hundred femtosecond[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 33-40.
- 刘正一, 刘双龙, 黄艾旺, 等. 百飞秒级脉宽的宽带超连续谱光源的产生[J]. *光子学报*, 2020, 49(9): 33-40.
- [ 12 ] ALFANO R R, SHAPIRO S L. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(11): 584-587.
- [ 13 ] WANG Fang. Dispersion-engineered fluorotellurite microstructured fibers and their application in supercontinuum generation[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- 王方. 色散调控的氟碲酸盐微结构光纤及其在超连续谱产生中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [ 14 ] CHAUHAN P, KUMAR A, KALRA Y. Mid-infrared broadband supercontinuum generation in a highly nonlinear rectangular core chalcogenide photonic crystal fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 46: 174-178.
- [ 15 ] WANG Kaijie, WANG Hang, DU Tuanjie, et al. Effect of intracavity filtering bandwidth on bound-state soliton generation in normal dispersion regime[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 210-215.
- 王凯杰, 王航, 杜团结, 等. 腔内滤波带宽对正色散束缚态孤子形成的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 210-215.
- [ 16 ] ZHOU Baoying, DAI Jianan, HONG Weiyi. Study on supercontinuum generation of femtosecond double pulses bound-state in optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 382-389.
- 邹宝英, 戴佳男, 洪伟毅. 光纤中飞秒双脉冲束缚态产生超连续谱的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 382-389.
- [ 17 ] LI C, KONG C, WONG K K. High Energy Noise-like pulse generation from a mode-locked thulium-doped fiber laser at 1.7 μm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1-6.
- [ 18 ] OLIVIER M, ROY V, PICHE M. Third-order dispersion and bound states of pulses in a fiber laser[J]. *Optics letters*, 2006, 31(5): 580-582.