

doi:10.3788/gzxb20134205.0521

# 基于八字腔锁模 Yb 光纤激光器的超连续谱激光源

钱凯<sup>1</sup>, 魏凯华<sup>1</sup>, 陈滔<sup>1</sup>, 姜培培<sup>1</sup>, 蔡双双<sup>2</sup>, 吴波<sup>1</sup>, 沈永行<sup>1</sup>

(1 浙江大学 光电系 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 温州医学院 信息与工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:**报道了一种利用八字腔锁模的全光纤化结构的亚纳秒脉冲光纤激光器,其输出脉冲经过光纤化的一级衍射声光调制器实现了可变的脉冲选单以降低脉冲重复频率.从 2.78MHz 降低重频至 93kHz 后的激光脉冲经过第二级功率放大,放大斜率效率为 68.1%,获得脉冲峰值功率超过 25kW 的激光输出.以此激励一段经优化后 3 m 长的 Bi 离子掺杂的石英光纤和 20m 普通单模石英光纤,最终获得了波长覆盖 1100~2200nm、光谱平坦度优于 3dB 的稳定超连续谱激光光源输出.

**关键词:**光纤激光器;锁模;放大;超连续谱

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)05-0521-5

## All Fiberized Supercontinuum Laser Source Based on “Figure of Eight” Cavity Mode-locked Yb Fiber Laser

QIAN Kai<sup>1</sup>, WEI Kai-hua<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, JIANG Pei-pei<sup>1</sup>,

CAI Shuang-shuang<sup>2</sup>, WU Bo<sup>1</sup>, SHEN Yong-hang<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 Department of Information and Engineering, Wenzhou Medical College, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

**Abstract:** An all fiberized novel sub-ns pulsed fiber laser was presented based on the “figure-of-eight” cavity mode-locking. The output pulse train was directed to pass a fiberized acousto-optic modulator based on first-order diffraction to reduce the pulse repetition rate from 2.78 MHz to 93 kHz by adjustable pulse picking. After the repetition rate decreasing, the peak power of the pulse laser was over 25 kW with the second amplifier, of which slope efficiency was 68.1%. Then the laser was used to excite bismuth doped silica fiber with optimization fiber length of 3m for supercontinuum generation. Finally the obtained laser spanned a spectral range of 1 100 ~ 2 200 nm with flatness better than 3 dB.

**Key words:** Fiber lasers; Mode-locking; Amplification; Supercontinuum

## 0 引言

超连续谱光源(Super-Continuum, SC)具有高输出功率、平坦的宽带光谱和高度的空间相干性等特点,能极大地提高测量信噪比、减少测量时间、加宽光谱测量范围.因此,SC光源在光谱分析、显微

成像、光通信和光相干摄影技术方面具有极大的应用价值和研究意义.人们对于产生SC的不同非线性材料进行了广泛而深入的研究,发现光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)可以根据设计获得合适的零色散波段,具有宽波段的单模工作特性,并拥有很高的非线性光学转换效率<sup>[1-3]</sup>.但是,PCF

基金项目:国家自然科学基金(No. 61078015)、国家重点基础研究发展计划(No. 2011CD311803)和温州市科技计划项目(No. H20100024)资助

第一作者:钱凯(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为被动锁模光纤激光器及其放大. Email: qzltzk@163.com

导师(通讯作者):沈永行(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤激光器、中红外光参量振荡器、光纤传感和光谱检测技术. Email: physyh@zju.edu.cn

收稿日期:2012-10-26;录用日期:2012-12-19

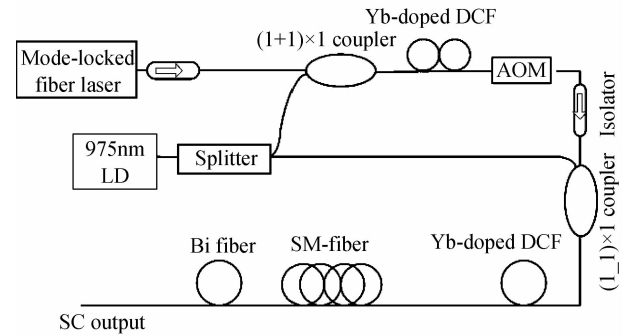
的芯径尺寸一般较小(2~4  $\mu\text{m}$ ),受限于石英材料的损伤阈值,输入激光脉冲的脉冲能量也受到限制,并因此限制了输出 SC 的光谱功率密度;PCF 较难维护,未封装的 PCF 末端小孔会吸取空气中的水蒸气,增大光纤损耗;PCF 与常规石英光纤的熔接也具有相当的挑战性,需要特殊的熔接设备和熔接工艺.此外,PCF 价格高昂,也在一定程度上限制了它的广泛应用.因此,色散-位移光纤<sup>[4-7]</sup>或普通单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)也被用来作为产生 SC 的波导介质<sup>[8-9]</sup>,并获得了较好的结果.

为了获得一个全光纤化的结构紧凑、输出光谱宽而平坦的实用化 SC 光源,并避免使用 PCF,需要一些特殊的脉冲激光激励源和非线性波导介质.本文采用“8 字形腔”被动锁模的 Yb 光纤激光器获得了一个全光纤化的高重频亚纳秒脉冲激光种子,并经过选单和功率放大获得了较高的脉冲峰值功率.以此作为激励光源,激励一段 Bi 离子掺杂的单模石英光纤,获得了一个波长覆盖 1 100~2 200 nm、光谱强度不均匀性优于 3 dB 的实用化新型 SC 光源.

## 1 系统结构配置

本文所研制的 SC 光源的系统配置基本结构如图 1.采用全光纤化的“8 字形腔”被动锁模光纤激光器作为种子源.经过隔离器后,先通过一级放大,再利用两端带尾纤的声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)进行激光脉冲选单,以降低脉冲重复频率.选单后的脉冲激光进行二级放大<sup>[10]</sup>,以进一步提升脉冲峰值功率和脉冲能量.二级放大后的激光用于激励一段特殊制作的 Bi 离子掺杂的单模石英光纤,通过光纤中的非线性作用产生超连续谱输出<sup>[11]</sup>.系统中,一级和二级脉冲放大共同采用一个波长 976 nm、最大输出功率为 10 W 的 LD 作为泵源,以节省系统成本.通过一个 4:6 的多模光纤分束器将泵光分为两部分,一级放大部分获得 40%的泵光,二级放大部分获得 60%的泵光.一级放大中所用增益光纤为 4.8 m 长度的直径为 7/125  $\mu\text{m}$  的 Yb 掺杂光纤,其对 976 nm 泵光的吸收系数为 2.1 dB/m;二级放大中所用增益光纤为 2.5 m 的 Yb 掺杂光纤,直径为 10/125  $\mu\text{m}$ ,对 976 nm 泵光的吸收系数为 6.1 dB/m.放大后的激光用于激励一段优化长度为 3 m、直径为 4.5/125  $\mu\text{m}$  的 Bi 离子掺杂石英光纤以产生超连续谱激光输出,其中 Bi 的掺杂原子数分数约 0.1%,其吸收光谱和荧光光谱图见文献<sup>[12]</sup>.Bi 离子的掺杂,使得光纤具有较高的非线性效应.系统中采用光纤化的声光调制器作为降低脉冲重频的调制器件,并以声光调制器的一级

衍射信号作为通路信号<sup>[3]</sup>.虽然一级衍射信号的传输效率较低(约 70%),但是可以干净、彻底地杜绝被滤除脉冲信号的残余信号通过.系统中,为保证系统的稳定工作,在种子源和一级光纤激光放大级之后都加了光纤化的激光隔离器,以保护激光系统的稳定安全工作.



(DCF: double-clad fiber; AOM: acousto-optical modulator; SC: supercontinuum)

图 1 全光纤化超连续谱激光光源的系统配置

Fig. 1 Setup of the all fiberized SC laser source

图 2 给出了作为系统脉冲激光种子的全光纤化的“8 字形腔”被动锁模光纤激光器的原理结构示意图和锁模工作时的激光输出光谱。

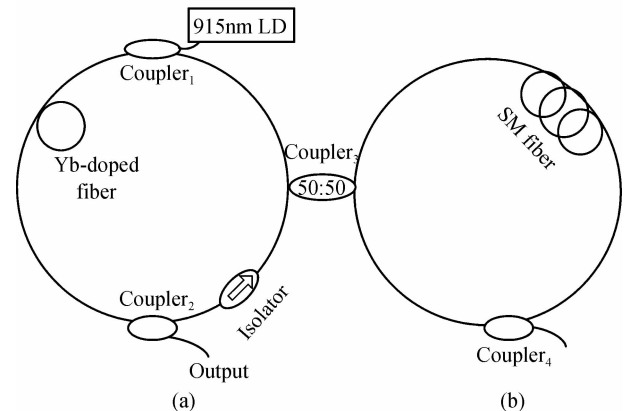


图 2 “8”字形腔被动锁模 Yb 光纤激光器原理结构

Fig. 2 Schematic diagram of “figure-of-eight” cavity mode-locked Yb fiber laser

图 2(a)中,光纤耦合器 3 是一个分束比为 50:50 的  $2 \times 2$  多模光纤合束器,用于左右两个光纤环之间的相互耦合.一个输出波长稳定的 975 nm 波长工作的多模 LD,通过多模光纤合束器泵浦一段长度为 2 m 的 Yb 掺杂双包层增益光纤,耦合器 2 与耦合器 4 都是分束比为 20:80 的单模光纤合束器.耦合器 2 的 20% 端口用于激光输出,而另一个环中的耦合器 4 也采用类似的分束比,主要用于调制环内光强,使能在该环中调制正反向运作的脉冲的相位.系统右侧环中还熔接了 60 m 的普通 HI1060 单模光纤,用于色散补偿.该段单模光纤的存在还可以增加锁模激光器的腔内长度,降低锁模

光纤激光器的激光脉冲重频(接近 3 MHz),使得后端采用声光调制器进行脉冲选单成为可能.图 2(a)环中的隔离器用来保证环内激光的单向运行.

### 2 结果分析

实验中,对锁模激光种子、光纤激光放大系统和 SC 的功率、脉冲形状和光谱进行了测量.分别采用 OPHIR 公司的 3 W 和 50 W 的功率计进行激光功率测量, Yokogawa 公司的 AQ6317C(光谱测试波段 600~1 750 nm)和 AQ6375(光谱测试波段 1 200~2 400 nm) 光谱分析仪测量激光输出光谱, Tektronix 的 12.5GHz 宽带示波器 DSA71254 测量激光的脉冲序列和脉冲波形.

首先测试了“8 字形腔”被动锁模 Yb 光纤激光器的激光输出光谱和激光脉冲特性.种子源产生的锁模激光的光谱如图 3 所示,其 3 dB 光谱宽度约为 6.1 nm;图 4 给出了相应的锁模激光的激光脉冲序列,其重频为 2.78 MHz,脉冲宽度约 980 ps.在泵浦功率为 860 mW 时,锁模激光输出的平均功率为 43 mW.

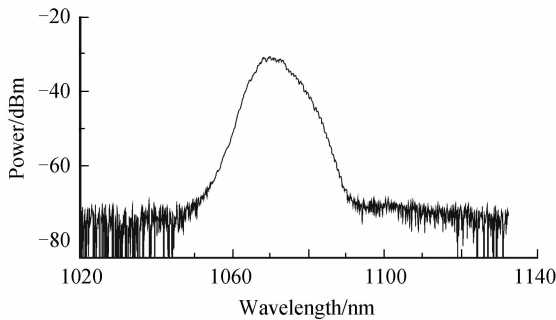


图 3 被动锁模光纤激光的输出光谱  
Fig. 3 The output spectrum of the passively mode-locked fiber laser

锁模输出的激光脉冲,经过光纤隔离器后先进行一级放大,再通过 AOM 选单,最后进行二级放大.之所以选择在选单前进行一级放大,主要是考虑到直接从种子源输出的激光功率不高,如果直接通过声光调制器完成脉冲选单后再进行放大,存在剩余的种子激光功率过小的问题,放大过程中光纤放大器很容易产生过强的放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE),不利于系统的稳定工作.实验中采用 AOM 进行选单以降低脉冲重频,降频的比例控制为 30 : 1,即从初始的 2.78 MHz 降到了 93 kHz.选单前后的激光脉冲序列图如图 4 (a)和(b).此外,插图中给出了单脉冲的形状,可以清楚地看出脉冲的宽度约 980 ps.

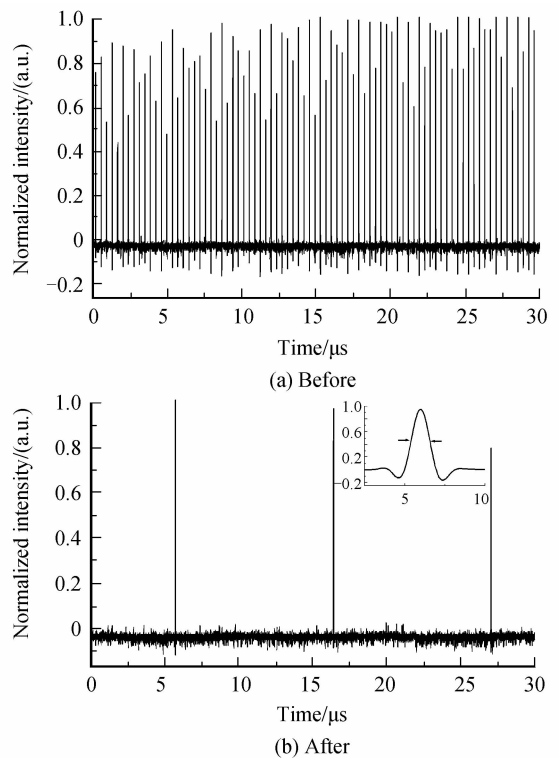


图 4 选单前的脉冲与选单后的脉冲序列图及单个脉冲图  
Fig. 4 The pulse train before and after selected and the profile of single pulse

图 5 给出了两级光纤激光放大的输出功率与泵浦功率的关系曲线图,其中一级放大的斜率效率为

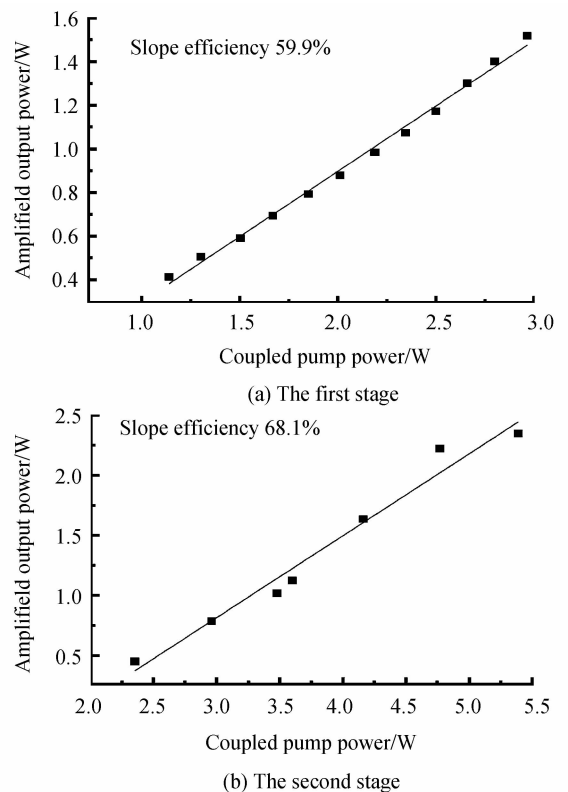


图 5 选单前后两级光纤激光放大器的输出功率与输入泵浦的关系  
Fig. 5 The power dependence of the fiber amplifiers

59.9%，二级放大的斜率效率为 68.1%。种子激光经过一级放大后获得功率 1.41 W。在泵浦激光二极管工作电流为 9 A 时，第二级放大对应的泵浦功率为 5.4 W，此时脉冲光纤激光的输出功率约 2.35 W，对应的脉冲峰值功率超过 25 kW。

经过二级放大的亚纳秒脉冲激光通过光纤熔接直接耦合到后端的 Bi 离子掺杂石英光纤，用于产生宽带的超连续谱激光输出。在早期实验中发现掺 Bi 光纤能够更好地产生超连续谱激光输出，但是其机理尚不是非常明确。其可能的因素主要有两点：第一是  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  分子的极化率比较大，原理上就应该比普通石英光纤具有更强的非线性效应；第二是掺 Bi 光纤在 1 100~1 300 nm 之间有较强的荧光，这在一定程度上会通过非线性作用增强超连续谱的产生。实验中采用一段掺 Bi 光纤确实能够使得输出的超连续光谱变得更加平坦。图 6 为在超连续光源输出功率最大和输出光谱最平坦时得到的超连续光源光谱图。从最平坦输出光谱图图 6(b) 中可以看到，SC 光谱范围覆盖 1 100~2 200 nm，整体上平整度很好。从 1 300~2100 nm 处不平整度小于 3 dB。SC 光谱中，由于光纤中残余 OH 离子的原因，在 1 380 nm 处的水吸收峰位置呈现出较为严重的光谱凹陷。这

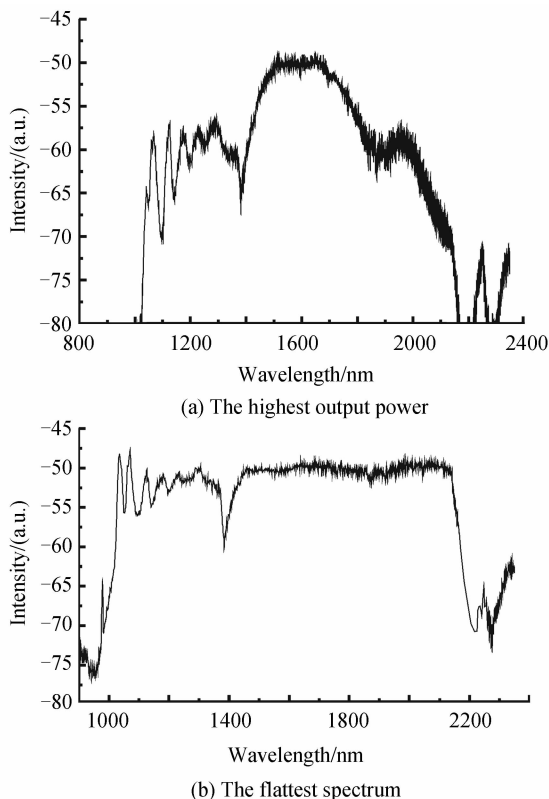


图 6 最大功率和最平坦光谱输出时的超连续谱激光光源光谱图

Fig. 6 The SC spectra of the supercontinuum laser source under the highest output power and the flattest spectrum

一问题有望在以后光纤制作过程中通过改善光纤预制棒制作工艺、降低残余 OH 离子浓度得到解决。

实验中同时测试了超连续谱光源的输出脉冲特性(见图 7)，发现其仍为稳定的脉冲序列，重复频率为 93 kHz，与所预期的相一致。在输出较为平坦的超连续谱情况下(泵浦电流为 9 A 时)，得到从单模 SMF28 光纤输出的超连续谱功率为 166 mW。

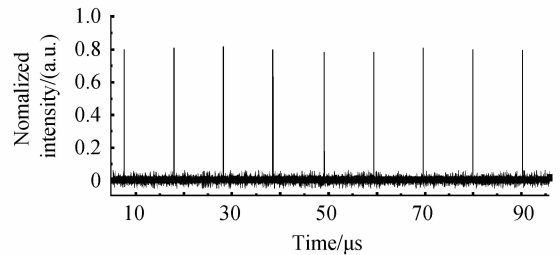


图 7 产生的超连续谱激光光源脉冲序列

Fig. 7 The pulse train of supercontinuum laser source

在实验测试超连续谱输出功率的过程中，发现在 93 kHz 重频下，SC 功率输出随着泵浦功率的增加呈现先增大再减小的趋势。为此，选择不同的脉冲重频，对 83 kHz 和 103 kHz 重频下的 SC 功率都进行了测试。测得的超连续谱输出功率随泵浦功率的变化趋势如图 8。

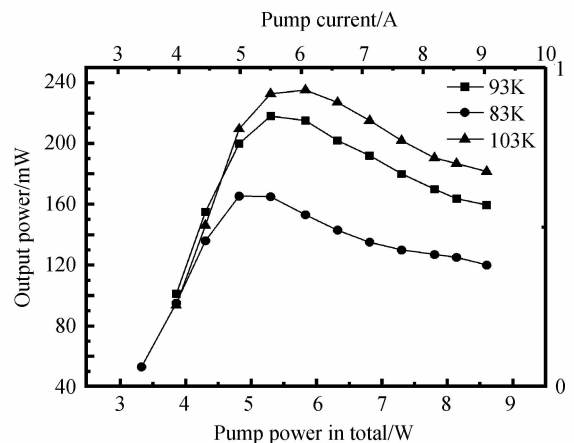


图 8 多个重复频率下 SC 输出功率与泵浦功率及泵浦电流的关系

Fig. 8 The output power dependence of the supercontinuum laser in different frequencies on the pump power and pump current

从图 8 中可以看出，随着脉冲重复频率的增加，输出的 SC 平均功率有增加的趋势。重复频率越低，SC 功率越早达到饱和。对于特定的脉冲重复频率，SC 输出功率均在某个泵浦功率下达到饱和后，随着泵浦功率的进一步增加而降低。分析认为，主要是由于作为激励源的脉冲激光的单脉冲能量随着泵浦功率的增加而逐渐增加，导致 SC 光谱中光谱功率的长波成分逐渐增加，这也可由图 6 所示的功率最大输出时和输出光谱最平坦时的输出光谱得到验证。在 SC 输出光谱比较平坦的情况下，实际上已经有

相当一部分的光谱能量处于石英光纤的长波吸收边之外而被石英光纤所吸收. 综合考虑光谱平坦度和 SC 功率的因素, 在光谱功率密度足够高的情况下, 光谱的平坦度可能更为重要, 因此泵源工作点的合理选择将是非常关键的.

### 3 结论

利用全光纤化的“8 字形腔”被动锁模 Yb 光纤激光器作为脉冲激光种子源, 经过声光调制器脉冲降频和光纤激光功率放大, 获得了 93kHz 的亚纳秒的激光脉冲序列. 经过进一步的激光功率放大, 获得激光峰值功率超过 20 kW 的亚纳秒脉冲序列. 以此激励一段自行研制的 Bi 离子掺杂石英光纤, 获得了光谱覆盖 1 100~2 200 nm、在 1 300~2 100 nm 光谱范围内平坦度优于 3 dB 的单模光纤输出激光超连续谱. 发现了最佳 SC 光谱平坦度与最大 SC 输出功率处在不同泵浦工作点的现象.

#### 参考文献

- [1] DUDLEY J M, GENTY G, COEN S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1135-1184.
- [2] LIU C, REES E J, LAURILA T, *et al.* Predicting supercontinuum pulse collisions with simulations exhibiting temporal aliasing[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(24): 4145-4147.
- [3] CHEN Sheng-ping, CHEN Hong-wei, HOU Jing, *et al.* 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(8): 1943-1949.  
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): 1943-1949.
- [4] MOON S, KIM D Y. Generation of octave spanning supercontinuum with 1550nm amplified diode laser pulses and a dispersion shifted fiber[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(1): 270-278.
- [5] MUSSOT A, SYLVESTRE T, PROVINO L, *et al.* Generation of a broadband single mode supercontinuum in a conventional dispersion shifted fiber by use of a subnanosecond microchip laser[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(19): 1820-1822.
- [6] ABEELUCK A K, HEADLEY C, JORGENSEN C G. High power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion shifted fibers by use of a continuous wave Raman fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(18): 2163-2165.
- [7] LI Zhi-yong, WANG Zhao-ying, WANG Yong-qiang, *et al.* Experiment study on supercontinuum in a 100 m dispersion shift fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1064-1067.  
李智勇, 王肇颖, 王永强, 等. 基于 100 m 色散位移光纤的超连续谱实验研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9): 1064-1067.
- [8] WALEWSKI J W, FILIPA J A, HAGEN C L, *et al.* Standard single mode fibers as convenient means for the generation of ultrafast high pulse energy super continua[J]. *Applied Physics B*, 2006, **83**(1): 75-79.
- [9] WATT R S, KAMINSKI C F, HULT J. Generation of supercontinuum radiation in conventional single mode fiber and its application to broadband absorption spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2008, **90**(1): 47-53.
- [10] YANG Zhi, HU Xiao-hong, WANG Yi-shan, *et al.* Millijoule pulse energy picosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(4): 041401(1)-041401(4).
- [11] LIU Wei, CHEN Tao, DAI Jian-ning, *et al.* All-fiber Yb fiber laser with passively generated sub-nanosecond pulse output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1214003(1)-1214003(5).  
刘伟, 陈滔, 戴建宁, 等. 全光纤化的被动式亚纳秒脉冲 Yb 光纤激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1214003(1)-1214003(5).
- [12] QIU Yan-qing, SHEN Yong-hang. Investigation on the spectral characteristics of bismuth doped silica fibers [J]. *Optical Materials*, 2008, **31**(2): 223-228.