

1.9~4.3 μm 全光纤中红外超连续谱光源

张 斌 杨未强 侯 静* 吕信明 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 利用在中红外波段具有低损耗的 ZBLAN(ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 - NaF)氟化物单模光纤搭建了全光纤结构的超连续谱光源,将超连续谱在长波方向扩展到中红外波段。系统以波长为 1550 nm 的纳秒脉冲半导体激光器作为种子源,采用主振荡功率放大结构实现了级联超连续谱产生。在前级超连续谱产生中将光谱预展宽到 2.6 μm ,再经掺铥双包层光纤放大器放大位于铥离子增益带宽内的光谱分量,最后抽运 10 m 长的 ZBLAN 单模光纤,在光纤色散和非线性效应的作用下,获得了光谱覆盖 1.9~4.3 μm 范围的中红外超连续谱输出,平均功率为 185 mW。

关键词 激光器;中红外超连续谱;掺铥双包层光纤放大器;氟化物玻璃光纤

中图分类号 O437; TN212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1102013

All-Fiber Mid-Infrared Supercontinuum Source from 1.9 μm to 4.3 μm

Zhang Bin Yang Weiqiang Hou Jing Lü Xinming Jiang Zongfu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract All-fiber mid-infrared supercontinuum source is obtained using ZBLAN (ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 - NaF) single-mode fiber, which has low transmission loss in this wavelength region. The supercontinuum is extended to mid-infrared wavelength. This scheme is based on multi-stage supercontinuum generation in master oscillator power amplifier with nanosecond pulsed semiconductor seed laser operating at 1550 nm. The spectrum of seed laser is extended to 2.6 μm in Tm/Ho co-doped fiber, and the wavelength components lying in the gain band of Tm doped fiber are amplified in Tm doped double-clad fiber amplifier and then pump 10-m ZBLAN single-mode fiber. Spectral broadening from 1.9 μm to 4.3 μm with average output power of 185 mW is achieved resulting from the interaction between dispersion and nonlinear effects.

Key words lasers; mid-infrared supercontinuum; thulium doped double-clad fiber amplifier; fluoride glass fiber

OCIS codes 190.4370; 140.3510; 060.2390

1 引 言

中红外(mid-IR)常用的激光光源有化学激光器、光学参量放大器、光纤激光器等,这些激光光源具有高亮度和高相干度,但光谱宽度有限。而热辐射源虽能提供中红外波段的宽光谱,但在亮度和方向性方面不如激光光源。中红外超连续谱(MIR-SC)激光器同时具有光谱宽、亮度高和空间相干性好等优点,因此在光学测量^[1]、分子光谱学、生物医

学成像^[2]及光学生物组织蚀除等方面有着广泛的应用,是超连续谱光源领域的研究热点之一。目前,可见光和近红外波段的超连续谱光源研究已相当成熟,并进入实用化阶段。这些光源普遍采用石英玻璃材料光纤作为非线性介质,但石英光纤对 2.4 μm 以上波段吸收严重,不能用于产生中红外超连续谱,需选择在中红外波段具有低损耗的光纤作为非线性介质。常用于产生中红外超连续谱的光纤主要有氟

收稿日期: 2013-06-08; 收到修改稿日期: 2013-07-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235008)

作者简介: 张 斌(1981—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及超连续谱等方面的研究。

E-mail: zhangbin203@yahoo.com.cn

导师简介: 姜宗福(1963—),男,博士,教授,主要从事高能激光技术、光束控制及光动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: houjing25@sina.com

化物、碲化物和硫化物玻璃光纤。

目前美国、法国、日本、丹麦和波兰等国的研究人员采用 $0.5\sim 4.5\ \mu\text{m}$ 波长范围有较高透过率的 ZBLAN($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) 氟化物光纤作为非线性介质,用于产生中红外超连续谱,然而很难将光谱展宽到 $4\ \mu\text{m}$ 以上^[3-8]。在已展宽到 $4\ \mu\text{m}$ 以上的超连续谱中^[9-14], Xia 等^[9] 研制的第一代中红外超连续谱光源虽然平均功率达 $10.5\ \text{W}$,但长波边光谱功率密度较低。第二代光源虽然解决了上述问题,但平均功率却降低到了 $2.6\ \text{W}$ 。NKT Photonics 与丹麦科技大学合作研制的中红外超连续谱达到 $550\ \text{mW}$ ^[11],而国际上其他单位采用各种中红外光纤研制的 $4.0\ \mu\text{m}$ 以上超连续谱光源,明确给出的平均功率都不足 $150\ \text{mW}$ ^[12-16]。国内在该领域的研究仍处于起步阶段,尚未见相关文章报道。本文采用 ZBLAN 单模光纤作为非线性介质,搭建全光纤结构中红外超连续谱光源。 $1550\ \text{nm}$ 波长的纳秒脉冲光在铒/镱共掺光纤放大器、铥共掺光纤放大器、掺铥光纤放大器以及 ZBLAN 光纤中相继获得光谱展宽,最终获得了 $1.9\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 中红

外超连续谱输出。

2 实验装置

中红外超连续谱光源的实验装置如图 1 所示,系统采用主振荡功率放大(MOPA)结构。种子激光为电调制的纳秒脉冲半导体激光器,输出波长 λ 为 $1550\ \text{nm}$,脉冲宽度为 $6.4\ \text{ns}$,重复频率为 $20\ \text{kHz}$,平均功率为 $2\ \text{mW}$ 。第一级放大器为掺铒光纤放大器(EDFA),掺铒光纤(EDF)长为 $3.5\ \text{m}$,在 $975\ \text{nm}$ 处的吸收系数约为 $14.3\ \text{dB/m}$,波长为 $975\ \text{nm}$, $500\ \text{mW}$ 单模半导体激光(LD1)通过 $975/1550\ \text{nm}$ 波分复用器(WDM)注入到 EDF 中。第二级放大器为铒/镱共掺光纤放大器(EYDFA),增益介质为单模双包层铒/镱共掺光纤(EYDF),纤芯、包层直径分别为 $7/130\ \mu\text{m}$,长为 $5.5\ \text{m}$,纤芯数值孔径为 0.17 ,包层数值孔径为 0.46 ,光纤在 $975\ \text{nm}$ 处的吸收系数约为 $2\ \text{dB/m}$ 。输出波长为 $975\ \text{nm}$ 的多模半导体激光器(LD2)最大输出功率为 $8\ \text{W}$,通过 $(1+1)\times 1$ 合束器注入到 EYDF 中。

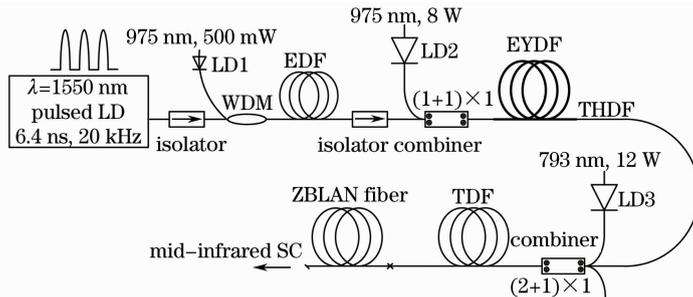


图 1 全光纤中红外超连续谱激光光源原理图

Fig. 1 Schematic of all-fiber mid-IR supercontinuum laser source

实验中在 EYDFA 中脉冲光谱已经展宽,在 EYDF 之后连接一段约 $90\ \text{cm}$ 的单模铒/镱共掺光纤(THDF)可将光谱进一步向长波方向扩展,在下一节中将详细讨论这一过程。THDF 的纤芯、包层直径分别为 $8/125\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.18 ,光纤在 $1550\ \text{nm}$ 的吸收系数约为 $13\ \text{dB/m}$ 。经 THDF 展宽后的超连续谱通过双包层掺铥光纤放大器(TDFA)进行功率放大。掺铥光纤(TDF)的纤芯、包层直径分别为 $10/130\ \mu\text{m}$,长为 $7\ \text{m}$,在 $793\ \text{nm}$ 波长的吸收系数约为 $3\ \text{dB/m}$ 。放大器的抽运源为 $793\ \text{nm}$ 多模半导体激光器(LD3),输出最大功率为 $12\ \text{W}$,通过一个 $(2+1)\times 1$ 的合束器注入 TDF 中。放大器的输出经过抽运光滤除后用于抽运中红外 ZBLAN 光纤。ZBLAN 光纤通过机械连接的方式和石英光纤连接。

实验中 ZBLAN 单模光纤的长度约为 $10\ \text{m}$,纤芯直径为 $8\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.27 。

3 实验结果与分析

半导体激光器输出的纳秒脉冲种子激光经 EDFA 预放后,输出功率为 $102.6\ \text{mW}$,对应的输出激光光谱如图 2(a)所示。由图 2(a)可知,激光输出没有出现非线性效应导致的光谱畸变,具有很高的边模抑制比。然而,在 EYDFA 对长脉冲进行放大的过程中,出现因调制不稳定性(MI)而引起的非线性光谱展宽,甚至产生宽带的超连续谱^[17]。实验中正是利用该机制,通过 EYDFA 将 $1550\ \text{nm}$ 脉冲光的输出光谱展宽到 $2\ \mu\text{m}$ 波段。当抽运光功率为 $5.11\ \text{W}$ 时 EYDFA 的输出光谱如图 2(b)所示,输出

光谱出现了极大的非线性展宽,长波长扩展到 2.4 μm。实验中,图 2(a)的光谱是由 Agilent 光谱

分析仪测量的,其他超连续谱的光谱采用由单色仪和红外探测器构成的光谱仪测量。

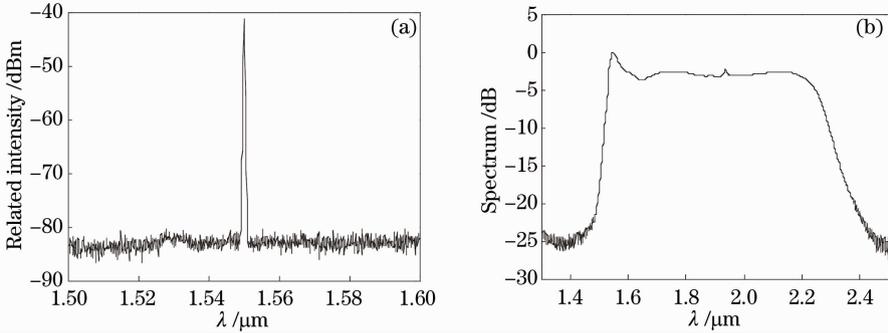


图 2 EYDFA 的(a)输入和(b)输出光谱

Fig. 2 (a) Input spectrum and (b) output spectrum of EYDFA

为进一步将光谱向长波方向拓展,在钕铽共掺光纤后连接一段约 90 cm 长的 THDF。上述 EYDFA 中产生的超连续谱经过 THDF 光纤传输后,在抽运功率为 5.11 W 时,THDF 的输出光谱如图 3 所示,产生了平坦的超连续谱,在 20 dB 的范围内,长波边扩展到了 2.6 μm。与图 2(b)中入射光谱比较可知,由于 THDF 中掺杂离子的吸收,1600~1750 nm 范围内的光谱分量消失。THDF 中 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 粒子在超连续谱产生的过程中起着重要的作用, Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 粒子在光谱展宽过程的能级跃迁图如图 4 所示^[18-20]。 Tm^{3+} 离子的一个吸收带位于 1550~1800 nm 范围,所以 1600~1750 nm 范围内的光被 Tm^{3+} 离子吸收,并通过同带抽运的方式使 Tm^{3+} 从 3H_6 能级跃迁到 3F_4 能级,并通过受激辐射产生 1.8~2.1 μm 范围内的光。 Tm^{3+} 粒子和 Ho^{3+} 之间的能量传输主要是 3F_4 和 5I_7 能级之间的共振传输,这一过程中 3F_4 能级上的 Tm^{3+} 粒子将能量传输给 Ho^{3+} 粒子,使基态上的 Ho^{3+} 粒子跃迁到 5I_7 能级。 5I_7 到 5I_8 的能级跃迁可以辐射约 2.1 μm 激光^[21]。另外, Tm^{3+} 粒子 3F_4 能级激发态吸收可以实现 3H_4 能级的粒子数反转, 3H_4 到 3H_5 的能级跃迁可辐射 2.2~2.5 μm 波段的光。同时通过波长上转换, 3H_4 到 3H_6 的能级跃迁可辐射约 0.78 μm 的光,实验中也观察到了光纤中辐射出的红光。在放大的过程中,由于被放大的信号光是因调制不稳定性而分裂成的子脉冲,这种短脉冲具有很高的峰值功率^[22],同时也具有很宽的光谱。光谱中的高频分量作为抽运,通过拉曼效应将能量不断地转移到低频部分(脉冲内拉曼散射),从而使得孤子中心频率不断红移,该过程称为孤子自频移(SSFS)^[23]。通过孤子自频移,光谱进一步向长波

方向展宽。由于输入到 THDF 中的超连续谱中存在抽运光、信号光以及放大过程,所以此处级联的 THDF 可称为铽/钬共掺光纤放大器。

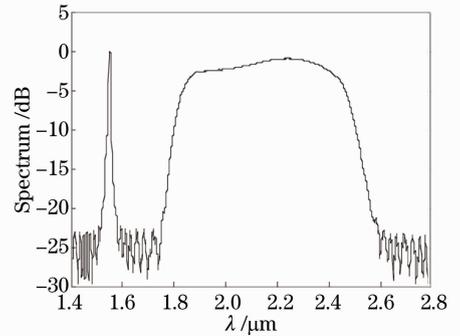


图 3 THDF 的输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of THDF

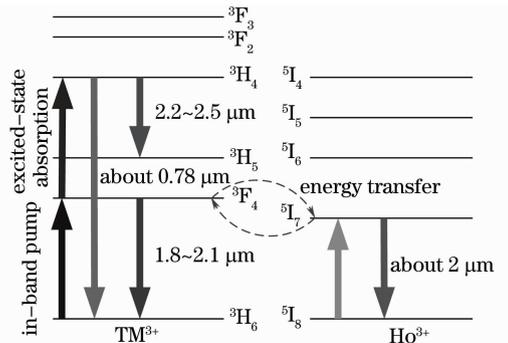


图 4 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 能级图

Fig. 4 Energy level diagram of Tm^{3+} and Ho^{3+}

为了进一步提高抽运光的平均功率和峰值功率,THDF 输出的超连续谱经掺铽双包层光纤放大器(TDFA)放大后,抽运 10 m 长 ZBLAN 单模光纤。光纤的不同群速度色散区决定了超连续谱产生机理的差异,可采用全矢量有限元法计算该 ZBLAN 光纤的群速度色散。由于 ZBLAN 光纤中各种组分分配比未知,可采用文献^[24]中的 Sellmeier

公式,对应各组分的摩尔比为 56:14:6:4:20,公式适用波长范围为 0.5~4.8 μm,其表达式为

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^k \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}, \quad (1)$$

式中 $k=2, a_1=1.168, a_2=2.77, \lambda$ 为波长,单位为微米, $\lambda_1=0.0954 \mu\text{m}, \lambda_2=25 \mu\text{m}$ 。图 5 为实验测量和数值计算的该光纤的群速度色散 D 的曲线^[25],其中零色散波长为 $1.49 \mu\text{m}$ 。因为在 ZBLAN 光纤中,入射抽运光为分裂后的一系列超短子脉冲,而且波长位于远离零色散波长的反常色散区,所以在 ZBLAN 单模光纤中,入射的脉冲因脉冲内拉曼散射而不断红移,使得光谱不断向长波方向展宽。最终产生的中红外超连续谱如图 6 所示,光谱展宽范围为 $1.9 \sim 4.3 \mu\text{m}$,10 dB 带宽大于 2000 nm,而且 10 dB 范围的光谱在长波方向超过 $4.0 \mu\text{m}$ 。由图 6 可知,输出光谱中不含残留的 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的抽运光,整个中红外超连续谱输出功率为 185 mW。需要注意的是,在实验测量光谱时使用长波通滤波片以消除高级次衍射而引入的伪光谱,滤波片在 $1.4 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 波长范围内反射率达 99.2%, $2.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长范围的透射率达 92%。

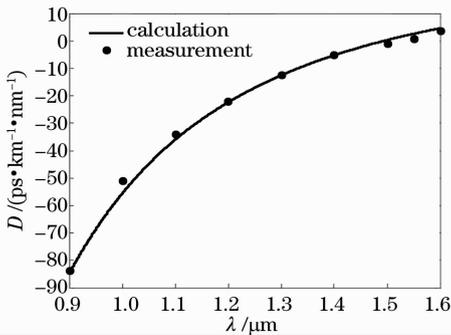


图 5 测量和计算的 ZBLAN 光纤群速度色散曲线
Fig. 5 Measured and calculated group velocity dispersion of ZBLAN fiber

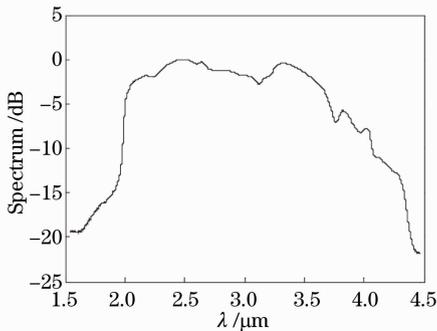


图 6 10 m 长 ZBLAN 单模光纤输出的中红外超连续谱
Fig. 6 Mid-infrared supercontinuum spectrum output from 10-m ZBLAN single-mode fiber

实验中 EYDFA 和 THDF 输出功率随 EYDFA 抽运功率的变化如图 7 所示,TDFA 和中红外超连续谱输出功率随 TDFA 抽运功率的变化如图 8 所示。由图 7、8 可知,实验中 EYDFA 和 TDFA 的放大效率低,尤其是 TDFA。在 TDFA 中,抽运光功率接近 12 W 时,仅有约 810 mW 的激光输出。其效率较低的主要原因有:1) 种子激光的重复频率为 20 kHz,脉冲激光的占空比较小,在放大的过程中容易产生放大自发辐射(ASE);2) 低重复频率导致的高峰值功率脉冲在小芯径光纤中放大时,极易出现非线性光谱展宽,展宽后超出增益带宽范围内的光分量不能被有效放大,从而降低了放大的效率;3) TDFA 中输入信号光为超连续光源,其中在掺铥光纤增益带宽内的光谱分量较弱,无法提供足够的信号光功率。针对上述因素,可通过增加脉冲种子源的重复频率和增加掺铥光纤直径减小非线性效应来提高放大级的效率。当 TDFA 的输出功率约为 810 mW 时,从 ZBLAN 光纤输出的中红外超连续谱的功率为 185 mW,TDFA 的抽运源功率限制了超

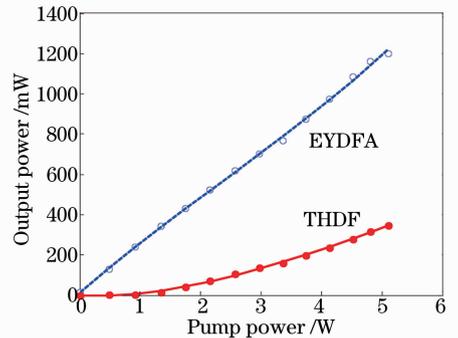


图 7 EYDFA 和 THDF 的输出功率随 EYDFA 抽运功率的变化

Fig. 7 Average output power of the EYDFA and THDF versus EYDFA pump power

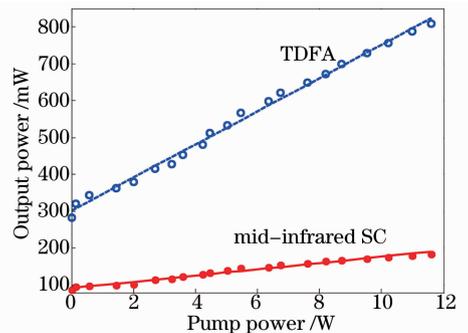


图 8 TDFA 和中红外超连续谱输出功率随 TDFA 抽运功率的变化

Fig. 8 Average output power of TDFA and Mid-IR SC versus TDFA pump power

连续谱功率的进一步提高。抽运激光到中红外超连续谱的光光转换效率不高的原因主要是超连续谱展宽到 ZBLAN 光纤的高损耗区,而 ZBLAN 光纤的长度尚未进行优化。同时光谱长波长分量的损耗受 ZBLAN 光纤的弯曲影响较大。在进一步的研究中,可以通过优化 ZBLAN 光纤长度以及降低弯曲损耗来提高中红外超连续谱的转换效率。

4 结 论

通过级联超连续谱产生的方案,搭建了全光纤结构的中红外超连续谱光源。以 ZBLAN 光纤作为非线性介质,克服了石英光纤在中红外波段高损耗的影响,将中红外超连续谱扩展到 4.3 μm 。实验中在 EYDFA 和 TDFA 中均产生了宽带的超连续谱,并且相继使超连续谱向长波方向扩展,最终在 ZBLAN 光纤中获得光谱覆盖 1.9~4.3 μm 范围的中红外超连续谱输出,平均功率为 185 mW。通过对实验结果进行详细分析,提出了进一步提高中红外超连续谱的转换效率和输出功率的解决方法。

参 考 文 献

- 1 T Udem, R Holzwarth, T W Hansch. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- 2 B Guo, Y Wang, C Peng, *et al.*. Laser-based mid-infrared reflectance imaging of biological tissues[J]. *Opt Express*, 2004, 12(1): 208-219.
- 3 C L Hagen, J W Walewski, S T Sanders. Generation of a continuum extending to the midinfrared by pumping ZBLAN fiber with an ultrafast 1550-nm source[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(1): 91-93.
- 4 M Duhant, W Renard, G Canat, *et al.*. Improving mid-infrared supercontinuum generation efficiency by pumping a fluoride fiber directly into the anomalous regime at 1995 nm[C]. *CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest*, Optical Society of America, 2011. CD9_1.
- 5 M Eckerle, C Kieleck, J Wierski, *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.
- 6 J Swiderski, M Maciejewska. Supercontinuum generation with the use of nanosecond pulses at the wavelength of 1550 nm[C]. *SPIE*, 2013, 8702: 870205.
- 7 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.
- 8 J Swiderski, M Michalska. Over three-octave spanning supercontinuum generated in a fluoride fiber pumped by Er & Er: Yb-doped and Tm-doped fiber amplifiers [J]. *Opt & Laser*

- Technol, 2013, 52: 75-80.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Peter M Moselund, Christian Petersen, Sune Dupont, *et al.*. Supercontinuum-broad as a lamp bright as a laser, now in the mid-infrared[C]. *SPIE*, 2012, 8381: 83811A.
- 12 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.
- 13 N Ducros, A Labruyère, S Février, *et al.*. Mid-IR Supercontinuum in a Fluorozirconate Fiber Pumped by a Femtosecond CPA System at 1.6 μm [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2010, CPDB7.
- 14 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.
- 15 P Domachuk, N A Wolchover, M Cronin-Golomb, *et al.*. Over 4000 nm bandwidth of mid-IR supercontinuum generation in sub-centimeter segments of highly nonlinear tellurite PCFs[J]. *Opt Express*, 2008, 16(10): 7161-7168.
- 16 L B Shaw, R R Gattass, J Sanghera, *et al.*. All-fiber mid-IR supercontinuum source from 1.5 to 5 μm [C]. *Fiber Lasers VIII: Technology, Systems, and Applications*, 2011. 79140P.
- 17 B Zhang, J Hou, P Z Liu, *et al.*. Flat supercontinuum generation covering C-band to U-band in two-stage Er/Yb co-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Laser Phys*, 2011, 21(11): 1895-1898.
- 18 J Geng, Q Wang, S Jiang. High-spectral-flatness mid-infrared supercontinuum generated from a Tm-doped fiber amplifier[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(7): 834-840.
- 19 C A Evans, Z Ikonik, B Richards, *et al.*. Numerical rate equation modeling of a $\sim 2.1 \mu\text{m}$ -Tm³⁺/Ho³⁺ co-doped tellurite fiber laser [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(19): 4280-4288.
- 20 A Louchev, Y Urata, N. Saito, *et al.*. Computational model for operation of 2 μm co-doped Tm, Ho solid state lasers[J]. *Opt Express*, 2007, 15(19): 11903-11912.
- 21 S Kurkov, E M Sholokhov, O I Medvedkov, *et al.*. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber[J]. *Laser Phys Lett*, 2009, 6(9): 661-664.
- 22 Xia, M Kumar, M Y Cheng, *et al.*. Supercontinuum generation in silica fibers by amplified nanosecond laser diode pulses[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 789-796.
- 23 J P Gordon. Theory of the soliton self-frequency shift[J]. *Opt Lett*, 1986, 11(10): 662-664.
- 24 R N Brown, J J Hutta. Material dispersion in high optical quality heavy metal fluoride glasses[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(24): 4500-4503.
- 25 A J Jin, Z Wang, J Hou, *et al.*. Experimental measurement and numerical calculation of dispersion of ZBLAN fiber [C]. *2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, 2011. V3181.