

文章编号: 1000-7032(2014)11-1376-06

基于碲酸盐微结构光纤的超连续光源

高雪健, 王善德, 刘 来, 康 喆, 赵 丹, 秦伟平, 秦冠仕*

(集成光电子学国家重点联合实验室 吉林大学实验区, 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 采用自制的碲酸盐微结构光纤作为非线性介质, 利用实验室自己搭建的 1 560 nm 飞秒光纤激光器作为泵浦源, 研究了泵浦功率、光纤长度、非线性系数和群速度色散对超连续谱展宽的影响, 并通过优化碲酸盐微结构光纤的结构获得了覆盖 1 300 ~ 2 200 nm 的全光纤超连续光源。

关键词: 超连续光源; 碲酸盐微结构光纤; 飞秒光纤激光器

中图分类号: TN437 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fgxb20143511.1376

Supercontinuum Light Source Based on Tellurite Microstructure Fibers

GAO Xue-jian, WANG Shan-de, LIU Lai, KANG Zhe,

ZHAO Dan, QIN Wei-ping, QIN Guan-shi*

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science & Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding Author, E-mail: qings@jlu.edu.cn

Abstract: Supercontinuum generation in homemade tellurite microstructured fibers by using a homemade 1 560 nm femtosecond fiber laser as pump source was demonstrated. The effects of the pump power, the length of fiber, the nonlinear coefficient and group velocity dispersion on the supercontinuum generation were investigated in detail. By optimizing the fiber structure, we archived an all-fiber supercontinuum source covering the range from 1 300 to 2 200 nm.

Key words: supercontinuum light source; tellurite microstructure fiber; femtosecond fiber lasers

1 引 言

当一束窄带激光在非线性介质中传输时, 在多种非线性效应的协同作用下, 光谱会大大展宽, 最后输出具有超宽谱带的光, 这类光源习惯上被称为超连续光源^[1-3]。与其他类型超连续光源不同, 基于光纤的超连续光源具有效率高、光束质量好、结构紧凑以及便于携带与集成等特性。尤其在微结构光纤出现之后, 全光纤超连续相干光源器件成为宽带光源研究的主要方向^[4]。

全光纤超连续光源在前沿科学研究、环境监测、医疗、国防安全等领域中有着重要的应用^[5-7]。实现宽波段超连续光源是世界上各主要发达国家学术界和工业界努力追求的目标。目前, 基于石英光纤的 0.3 ~ 2 μm 波段超连续光源已经商业化。与 0.3 ~ 2 μm 波段光源相比, 波长大于 2 μm 的中红外波段光源^[8]有着特点鲜明的不同应用。例如: 由于这个波段包含了许多重要分子的特征谱线——“分子指纹谱”, 这使得该波段激光成为分子生物学、分子痕迹探测等的理想

收稿日期: 2014-05-15; 修订日期: 2014-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(51072065, 61178073, 60908031, 60908001, 61077033, 61378004)资助项目

光源;又由于这个波段覆盖“水与氨基化合物的吸收峰”,可被所有含羟基或氨基的物质强烈吸收,这使得该波段激光可用于医疗手术等领域^[9-10]。因此,进一步将超连续光源波长拓展到中红外波段,研制波长大于 $2\ \mu\text{m}$ 的中红外波段的超连续相干光源具有非常重要的意义。

但石英光纤的光学透过窗口相对较窄(仅覆盖 $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$),这限制了它在中红外波段超连续光源产生中的应用。为了产生中红外波段的超连续相干光源,国内外研究者们已经把目光转向了新型的硝酸盐、氟化物和硫化物微结构光纤,这些光纤的光学透过窗口可覆盖中红外波段^[11]。在基于硝酸盐光纤的超连续光源研究方面, Qin 等^[12]利用拉锥的硝酸盐微结构光纤实现了覆盖可见到近红外波段的超连续光源。但是,截至目前,有关硝酸盐微结构光纤超连续光源的系统性研究还未见报道。

本文利用实验室自己搭建的 $1\ 560\ \text{nm}$ 飞秒光纤激光器作为泵浦源,采用自制的硝酸盐微结构光纤作为非线性介质,研究了光纤结构参数的变化对超连续谱产生的影响,并通过优化光纤结构获得了覆盖 $1\ 300\sim 2\ 200\ \text{nm}$ 的全光纤超连续光源。

2 实验装置

图 1 为超连续谱测试系统的结构图。由图 1 可以看出,用于测试超连续谱的系统分为三大部分:一是实验室自己搭建的输出中心波长为 $1\ 560\ \text{nm}$ 、脉冲宽度为 $440\ \text{fs}$ 的碳纳米管锁模光纤激光器;二是由一级掺铒光纤放大器(EDFA)、 $2\ \text{m}$ 色散补偿光纤、二级 EDFA 组成的飞秒脉冲光纤放大器;三是由微调架和硝酸盐微结构光纤组成的光纤耦合系统。超连续谱产生的过程如下:首先将输出波长为 $1\ 560\ \text{nm}$ 、脉冲宽度为 $440\ \text{fs}$ 的碳纳米管锁模光纤激光器作为种子光并利用一级掺铒光纤放大器进行低功率放大;经过一级放大后的飞秒脉冲通过 $2\ \text{m}$ 长的色散补偿光纤将脉冲宽度展宽到皮秒量级,然后再通过第二级掺铒光纤放大器来进行高功率放大;经二级放大后的飞秒激光再通过光纤耦合系统耦合进硝酸盐微结构光纤的纤芯中,最后利用具有大场模面积的多模光纤将输出光导入到光谱分析仪(OSA)中进行测试分析。

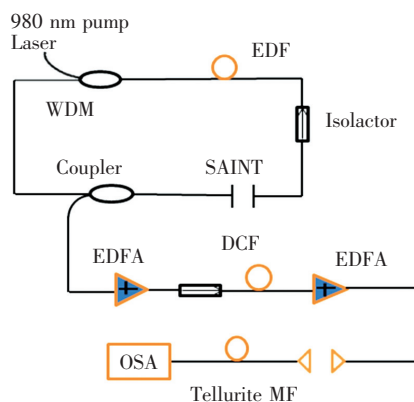


图 1 超连续谱测量系统

Fig. 1 Supercontinuum generation system

经过两级放大后飞秒激光的中心波长为 $1\ 560\ \text{nm}$,重复频率为 $\sim 50\ \text{MHz}$,平均功率最高可达到 $506\ \text{mW}$ 。图 2(a)和(b)分别是经过两级放大后所得到的飞秒激光的自相关轨迹和光谱图。通过自相关仪可以测得经放大后的飞秒激光的脉冲宽度为 $280\ \text{fs}$ 。由图 2(b)可以看出,经过两级放大后的飞秒激光的光谱很宽,这是因为自相位调制(Self phase modulation, SPM)等非线性效应的影响。

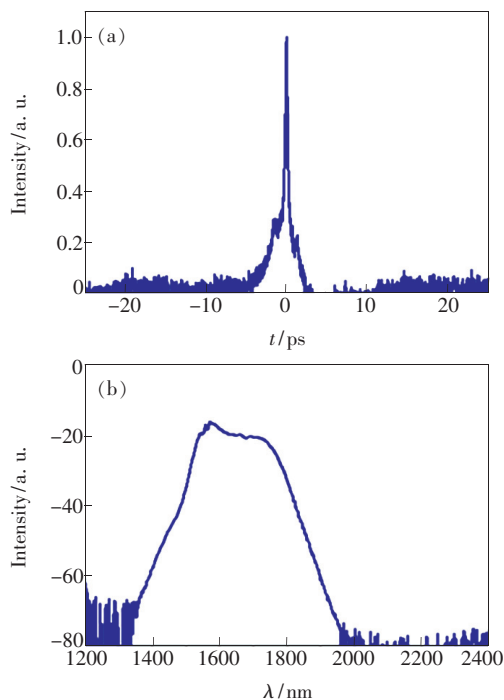


图 2 放大后的飞秒激光的自相关轨迹(a)和光谱图(b)
Fig. 2 Autocorrelation trace (a) and spectrum (b) of amplified femtosecond laser

3 实验数据及分析

影响超连续谱展宽的两个主要因素是微结构

光纤的群速度色散 (Group velocity dispersion, GVD) 和非线性系数。因此,要想获得更宽的超连续谱,需要对光纤的群速度色散和非线性系数进行优化。这两个参数的优化是通过优化微结构光纤的结构来实现的。首先我们采用棒管法拉制了芯径为 $8\ \mu\text{m}$ 的组分为 $78\ \text{TeO}_2\text{-}5\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}5\text{ZnO-}12\text{Na}_2\text{CO}_3$ (TBZN)^[13] 的碲酸盐微结构光纤,微结构光纤的纤芯被 6 个空气孔包围,如图 3 中插图所示。空气孔尺寸为 $9\ \mu\text{m}$,孔径比为 2.25,孔间距为 $1.7\ \mu\text{m}$,拉制出的碲酸盐微结构光纤在 $1560\ \text{nm}$ 处的损耗为 $\sim 8\ \text{dB/m}$ 。图 3 所示是纤芯直径为 $8\ \mu\text{m}$ 的碲酸盐微结构光纤端面的扫描电镜图和色散曲线。由图可知,该碲酸盐微结构光纤的零色散点在 $1680\ \text{nm}$ 附近。图 4 是其受限损耗曲线,可以看出该碲酸盐微结构光纤在 $1200\sim 2400\ \text{nm}$ 范围内的受限损耗很小,可忽略不计。接着选用长度为 $19\ \text{cm}$ 的碲酸盐微结构光纤来进行测试。利用图 2 所示的飞秒激光作为泵

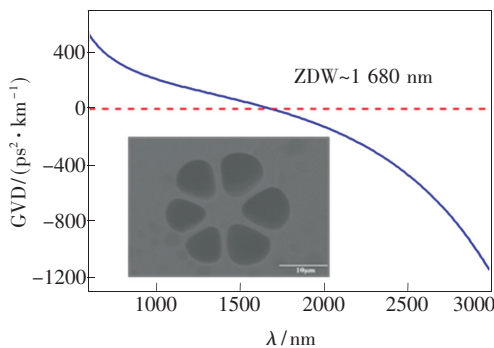


图 3 芯径为 $8\ \mu\text{m}$ 的碲酸盐微结构光纤的色散曲线,插图 为光纤端面的扫描电镜照片。

Fig. 3 GVD profile of the tellurite microstructured fiber with core diameter of $8\ \mu\text{m}$. Inset is the crosssection of the tellurite microstructured fiber.

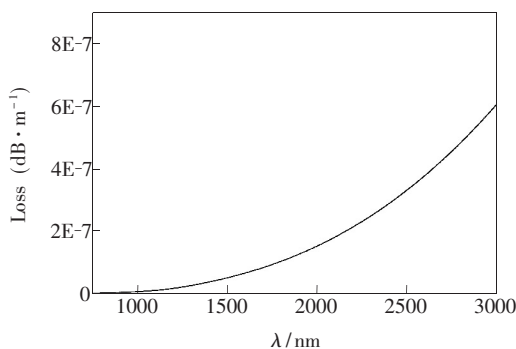


图 4 芯径为 $8\ \mu\text{m}$ 的碲酸盐微结构光纤的受限损耗曲线
Fig. 4 Confinement loss of the tellurite microstructured fiber with core diameter of $8\ \mu\text{m}$

浦源,采用上述碲酸盐微结构光纤作为非线性介质,测量了不同泵浦功率下输出超连续谱的光谱图和二维强度分布图,如图 5 (a) 和 (b) 所示。

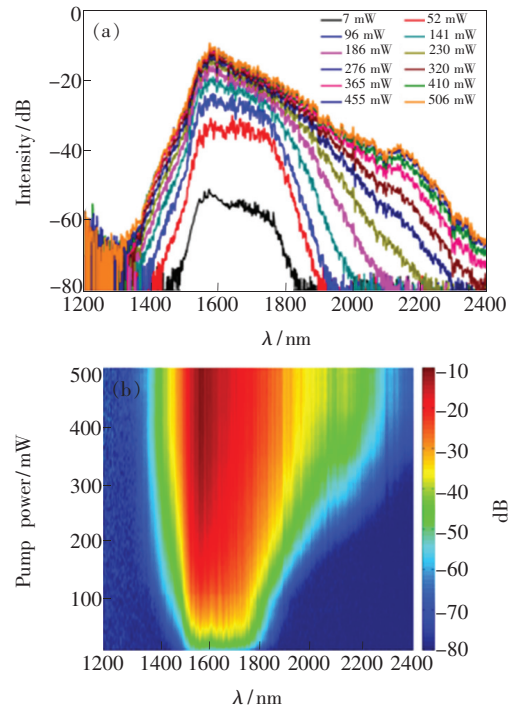


图 5 在 $19\ \text{cm}$ 长、芯径为 $8\ \mu\text{m}$ 的碲酸盐微结构光纤中输出的超连续谱随泵浦功率的变化 (a) 以及二维强度分布图 (b)。

Fig. 5 SC spectra variation with the pump power (a) and 2D intensity distribution (b) from a 19-cm -long tellurite microstructured fiber with core diameter of $8\ \mu\text{m}$

由图 5 可以看出,当泵浦光功率达到 $506\ \text{mW}$ 时,输出光的光谱大大展宽,其长波边展宽至 $2300\ \text{nm}$ 。因为该碲酸盐微结构光纤的零色散波长在 $1680\ \text{nm}$ 附近,所以泵浦光的中心波长位于该光纤的正常色散区,此时超连续谱产生的主要机制是 SPM 效应和受激喇曼散射等效应^[1,14]。另外,在图 5(a) 中,在 $2150\ \text{nm}$ 附近出现了一个小峰,这可能是由于光纤中的四波混频 (four-wave mixing, FWM) 效应等光学参量过程引起的。

为了研究光纤长度对超连续谱展宽的影响,我们把上述 $19\ \text{cm}$ 的光纤截短至 $3\ \text{cm}$,重新测量了不同泵浦功率下输出超连续谱的光谱图和二维强度分布图,如图 6 (a) 和 (b) 所示。当把光纤长度从原来的 $19\ \text{cm}$ 截短至 $3\ \text{cm}$ 后,随着泵浦功率的增加,输出的光谱逐渐展宽。当泵浦功率达到 $506\ \text{mW}$ 时,输出光谱的长波边也展宽至 2300

nm 附近,但是在 2 150 nm 附近没有出现图 5 中的小峰。这是由于在光谱展宽的波长范围内,光纤的损耗很小,对超连续谱产生的影响可以忽略不计,随着光纤长度的增长在 2 150 nm 附近小峰

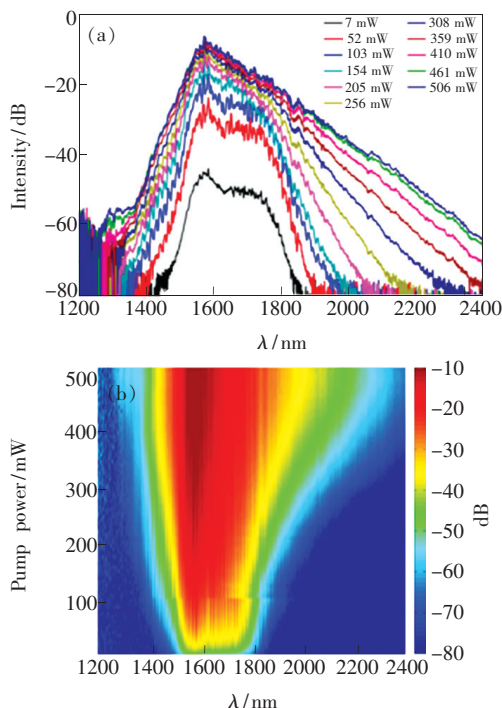


图 6 在 3 cm 长、芯径为 8 μm 的硝酸盐微结构光纤中输出的超连续谱随泵浦功率的变化 (a) 以及二维强度分布图 (b)。

Fig. 6 SC spectra variation with the pump power (a) and 2D intensity distribution (b) from a 3-cm-long tellurite microstructured fiber with core diameter of 8 μm

为了获得更宽的超连续谱,我们同样采用棒管法又拉制了芯径为 5 μm 的组分为 TBZN 的硝酸盐微结构光纤,微结构光纤的纤芯同样被 6 个空气孔包围,如图 7 中插图所示。空气孔尺寸为 3.1 μm ,孔径比为 1.24,孔间距为 1.1 μm ,拉制出的光纤在 1 560 nm 处的损耗约为 8 dB/m。图 7 是该硝酸盐微结构光纤端面的扫描电镜图及其色散曲线。根据图 7 可知,纤芯直径为 5 μm 的硝酸盐微结构光纤的零色散点在 1 530 nm 附近。图 8 是其受限损耗曲线,与图 4 相比可以看出,纤芯直径为 5 μm 的硝酸盐微结构光纤的受限损耗比纤芯直径为 8 μm 的光纤的受限损耗大,尤其是当波长大于 2 200 nm 后,受限损耗迅速变大。同样利用图 2 所示的飞秒激光作为泵浦光,采用 18 cm 长的纤芯直径为 5 μm 的硝酸盐微结构光

纤作为非线性介质,我们测量了不同泵浦功率条件下输出超连续谱的光谱图和二维强度分布图,如图 9(a) 和 (b) 所示。当泵浦激光的平均功率达到 506 mW 时,获得了 1 300 ~ 2 200 nm 波长范围的超连续谱。由于该硝酸盐微结构光纤的零色散波长在 1 530 nm 附近,所以泵浦光的中心波长 (~1 560 nm) 位于该光纤的反常色散区,此时可能是孤子分裂和孤子自频移产生了超连续谱^[1]。与图 5 相比,图 9 中的超连续谱的短波边明显变宽。这是因为当改变了硝酸盐微结构光纤的结构后,使得影响超连续谱产生的两个重要参数——群速度色散和非线性系数得到了优化。芯径 5 μm 的硝酸盐微结构光纤比芯径为 8 μm 的光纤具有更大的非线性系数和更合适的色散特性。更高的非线性系数意味着在相同泵浦功率下光纤中各种非线性效应更强,更利于超连续谱的产生。另外,当泵浦波长处于光纤的反常色散区时,相对于正常色散区泵浦更有利于超连续谱的展宽。而

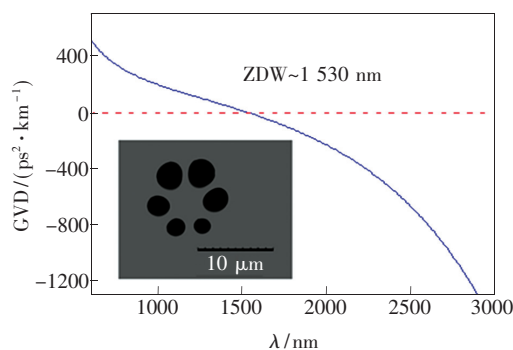


图 7 芯径为 5 μm 的硝酸盐微结构光纤色散曲线,插图为光纤端面的扫描电镜照片。

Fig. 7 GVD profile of the tellurite microstructured fiber with core diameter of 5 μm . Inset is the crosssection of the tellurite microstructured fiber.

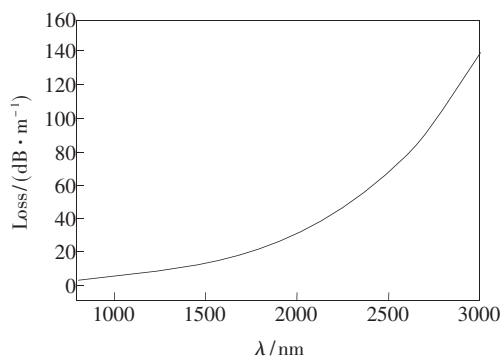


图 8 芯径为 5 μm 的硝酸盐微结构光纤的受限损耗曲线
Fig. 8 Confinement loss of the tellurite microstructured fiber with core diameter of 5 μm

超连续谱的长波边反而向短波边移动,这是由于在长波边光纤的损耗不可忽略,所以在相同泵浦条件下,超连续谱的长波边展宽没有图 5 中的宽。

同样,将该光纤截短至 3 cm,测量了不同泵浦功率条件下输出超连续谱的光谱图和二维强度分布图,如图 10(a)和(b)所示。泵浦光位于光纤的反常色散区,超连续谱的长波端主要由孤子形成。随着光纤长度的增加,形成的孤子在脉冲内拉曼散射的作用下会进一步向长波边移动。然而图 9 与图 10 相比,超连续谱的长波边却向短波边移动。这主要是由于小芯径碲酸盐微结构光纤在长波边的限制损耗较大,使得移动到长波边的孤子损失能量,削弱了孤子自频移的作用,从而限制了超连续谱长波边的展宽。同样,超连续谱的短波边是由于孤子辐射出的色散波形成,红移减弱的孤子进一步限制了蓝端色散波的形成,因此

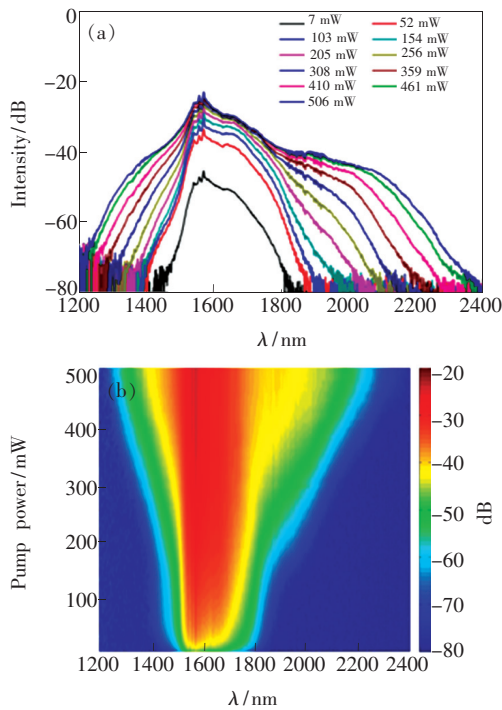


图 9 在 19 cm 长、芯径为 5 μm 的碲酸盐微结构光纤中输出的超连续谱随泵浦功率的变化(a)以及二维强度分布图(b)。

Fig. 9 SC spectra variation with the pump power (a) and 2D intensity distribution (b) from a 19-cm-long tellurite microstructured fiber with core diameter of 5 μm

参 考 文 献:

- [1] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, 78

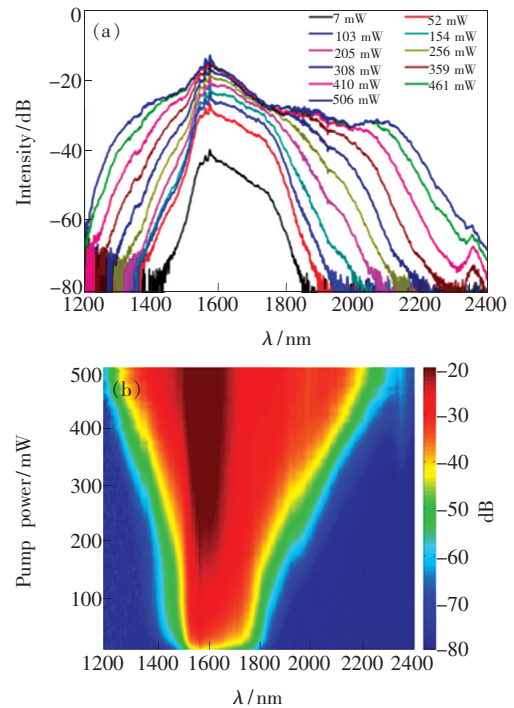


图 10 在 3 cm 长、芯径为 5 μm 的碲酸盐微结构光纤中输出的超连续谱随泵浦功率的变化(a)以及二维强度分布图(b)。

Fig. 10 SC spectra variation with the pump power (a) and 2D intensity distribution (b) from a 3-cm-long tellurite microstructured fiber with core diameter of 5 μm

对于长光纤,超连续谱的蓝端进一步向长波端移动。

4 结 论

利用实验室自己搭建的中心波长为 1 560 nm、重复频率为 ~ 50 MHz、脉冲宽度为 280 fs 的光纤激光器作为泵浦源,通过选用不同长度、不同结构的碲酸盐微结构光纤作为非线性介质,研究了泵浦功率、光纤的色散和非线性系数变化对超连续谱产生的影响,并通过优化碲酸盐微结构光纤的结构最终获得了宽带的波长覆盖范围为 1 300 ~ 2 200 nm 的超连续光源。该光源包含了 1 310 nm 和 1 550 nm 两个重要的通信波段,有望在光通信系统中获得重要的应用。而且,该光源的长波边展宽到了中红外波段,这使其在光电对抗、红外光传感等领域中有着潜在的应用价值。

- (4):1135-1184.
- [2] Alfano R R, Shapiro S L. Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, 24(11):592-564.
- [3] Kuang Q Q, Sang M H, Liang P S, *et al.* Supercontinuum generation and multi-wavelength output in fiber [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1):137-140 (in Chinese).
- [4] Zhang R R. Experimental research on supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Opt. Tech.* (光学技术), 2006, 32(z):516-521 (in Chinese).
- [5] Gao J, Yu F, Kuang H S, *et al.* Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber lasers [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2014, 22(5):1138-1142 (in Chinese).
- [6] Holzwarth R. White-light frequency comb generation with a diode-pumped Cr: LiSAF laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26(17):1376-1378.
- [7] Yang W Q, Zhang B, Xue G H, *et al.* Thirteen watt all-fiber mid-infrared supercontinuum generation in a single mode ZBLAN fiber pumped by a 2 μm MOPA system [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(7):1849-1852.
- [8] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser [J]. *Nat. Photon.*, 2012, 6(7):423-431.
- [9] Gibson E A, Shen Z, Jimenez R. Three-pulse photon echo peak shift spectroscopy as a probe of flexibility and conformational heterogeneity in protein folding [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2009, 473(4-6):330-335.
- [10] Xu B, Coello Y, Lozovoy V V, *et al.* Two-photon fluorescence excitation spectroscopy by pulse shaping ultrabroad-bandwidth femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(32):6348-6353.
- [11] Price J H V, Monro T M, Heike E H, *et al.* Mid-IR supercontinuum generation from nonsilica microstructured optical fibers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, 13(3):738-748.
- [12] Qin G S, Yan X, Kito C, *et al.* Zero-dispersion-wavelength-decreasing tellurite microstructured fiber for wide and flattened supercontinuum generation [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(2):136-138.
- [13] Yan X, Qin G S, Liao M S, *et al.* Transient Raman response effects on the soliton self-frequency shift in tellurite microstructured optical fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, 28(8):1831-1836.
- [14] Liu L, Qin G S, Tian Q J, *et al.* Numerical investigation of mid-infrared supercontinuum generation up to 5 μm in single mode fluoride fiber [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(11):10041-10048.



高雪健(1991 -),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,2013年于吉林大学获得学士学位,主要从事近红外与中红外超连续光源的研究。
E-mail: gao_xue_jian@163.com



秦冠仕(1976 -),男,河南安阳人,教授,博士生导师,2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事特种光纤及其光子学器件方面的研究。
E-mail: qings@jlu.edu.cn。