

文章编号: 1000-7032(2015)02-0225-06

石英光子晶体光纤中高功率中红外超连续谱的产生

高娟娟^{1,2}, 李夏^{1,2}, 高松^{1,2}, 薛天峰¹,
胡丽丽¹, 高伟清³, 廖梅松^{1*}

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光单元技术研发中心, 上海 201800;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 非石英光纤在产生大功率超连续谱方面存在难以克服的局限性。本文首次报道了采用石英光纤产生大功率中红外超连续谱。精心设计光纤结构使色散有利于超连续谱向中红外波段展宽, 同时保证相对较大的芯径以承受较高的泵浦功率。合理选择光纤长度, 在保证光谱展宽到 3.4 μm 的情况下使光纤损耗的影响降低到最小限度。研究表明, 在 1.95 μm 皮秒脉冲泵浦下, 采用色散适宜的石英光子晶体光纤可以产生 20 dB 带宽覆盖 1 550 ~ 3 420 nm 的超连续谱。超连续谱的平均功率可达 56.6 W。

关 键 词: 非线性光学; 中红外; 超连续谱; 石英光子晶体光纤

中图分类号: O437 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153602.0225

High Power Mid-infrared Supercontinuum Generation in Silica Photonic Crystal Fiber

GAO Juan-juan^{1,2}, LI Xia^{1,2}, GAO Song^{1,2}, XUE Tian-feng¹,
HU Li-li¹, GAO Wei-qing³, LIAO Mei-song^{1*}

(1. Research and Development Center of High Power Laser Components, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Academy of Opto Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding Author, E-mail: liaomeisong@siom.ac.cn

Abstract: Non-silica fibers have the intrinsic limitations in high power supercontinuum generation. High power mid-infrared supercontinuum generation in silica photonic crystal fiber is firstly investigated in our studies. The dispersion of fiber is designed to be beneficial to supercontinuum broadening to mid-infrared region. Meanwhile, to withstand high pumping power, a relatively large core diameter is essential. On the premise of supercontinuum broadening to 3.4 μm, fiber length is optimized to reduce the loss of the optical fibers. The results show that it is feasible to generate supercontinuum spectrum with 20 dB-bandwidth covering from 1 550 nm to 3 420 nm by injecting 1.95 μm picosecond pulse into silica photonic crystal fiber with appropriate dispersion. The average power of the supercontinuum spectrum can reach 56.6 W.

Key words: nonlinear optics; mid-infrared; supercontinuum spectrum; silica photonic crystal fiber

收稿日期: 2014-11-27; 修訂日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61475171, 11374084, 61307056); 浦江人才计划(14PJ1409200); 中国科学院与日本学术振兴会共同研究项目(GJHZ1412)资助

1 引言

中红外超连续谱在光谱学^[1]、显微镜、医学诊断^[2]及生物医学^[3]等领域都有重要应用,现已成为非线性光学领域的研究热点之一。在氟化物^[4-5]、碲酸盐^[6-7]、硫族化物^[8]等软玻璃光纤中产生中红外超连续谱的研究已被广泛报道。Swiderski 等在 ZBLAN 光纤中得到的中红外超连续谱的平均功率为 5 W。国防科技大学与北京工业大学也分别报道了采用 ZBLAN 光纤产生中红外超连续谱,得到的中红外超连续谱的平均功率分别为 13 W^[9] 和 21.8 W^[10]。21.8 W 是目前得到的中红外超连续谱的最高功率。由于软玻璃本身的局限性,使得软玻璃光纤中产生的中红外超连续谱的平均功率很难进一步提高。首先,软玻璃很难拉制成微结构光纤,色散和非线性的调控比较困难;其次,软玻璃光纤很难与泵浦光源高效熔接;最后,也是最重要的一点,软玻璃的转变温度较低,难以承受大功率泵浦。因此,由软玻璃光纤得到的中红外超连续谱功率较低。然而,中红外超连续谱在定向红外对抗^[11]、自由空间通信^[11]、生物医学^[12]等领域的应用都需要很高的功率。因此,我们把目光转移到了抗损伤阈值很高的石英玻璃光纤。

迄今为止,利用石英玻璃光子晶体光纤,在连续光^[13]或超短脉冲^[14-16]的泵浦下,产生可见、近红外波段的超连续谱的研究已有很多报道,但尚没有关于中红外波段的超连续谱的报道。采用石英玻璃光子晶体光纤产生高功率中红外超连续谱具有以下优势:

(1) 石英玻璃具有很高的转变温度,使用温度可达 1 000 ℃ 以上,而典型的氟锆玻璃只略高于 200 ℃,所以石英玻璃光纤能够承受大功率泵浦;

(2) 大部分光纤激光器的输出尾纤都是石英玻璃光纤,因此石英玻璃光纤易与泵浦光纤激光器熔接;

(3) 石英玻璃的粘性随温度变化小,且玻璃化温度和结晶温度之间温差大,所以能很容易地拉制成微结构光纤;

(4) 石英玻璃光纤具有很高的强度,至少比软玻璃光纤大一个数量级;

(5) 石英玻璃光纤原材料易于获得且价格相

对较低。

然而,石英玻璃在中红外波段巨大的材料吸收使得中红外光很难透过石英光纤。要在石英光纤中得到高功率中红外超连续谱,必须精心设计光纤结构并合理选择泵浦方式,把光纤损耗的不利影响降低到最小限度。本文首次对此做了系统研究,并在充分考虑光纤功率耐受性、激光器技术可行性的基础上,提出了较完整的采用石英光纤产生高功率中红外超连续谱的方案。

2 技术方案

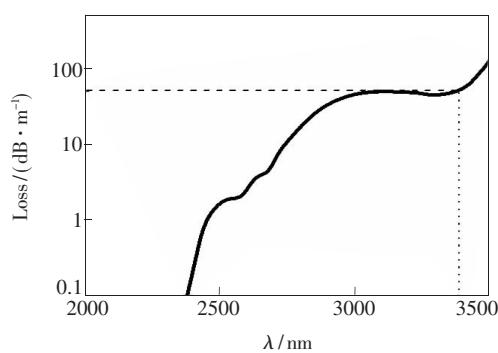
超连续谱的产生主要取决于激光泵浦源和高非线性光纤。通常须在高非线性光纤的零色散波长附近泵浦,才能使超连续谱有效展宽。

2.1 激光泵浦源

利用中心波长为 800, 1 064, 1 550 nm 的激光器泵浦石英光子晶体光纤产生高功率超连续谱的报道较多^[17-20],但是由于石英光纤色散和累计损耗的限制都无法将光谱展宽到 3 μm 以上。要产生中红外超连续谱需要使用长波泵浦,因此本研究改用 1.95 μm 激光器为泵浦源。连续光与石英光纤作用时产生的非线性效应较弱,很难在短光纤中将超连续谱展宽到中红外波段。超短脉冲包括皮秒和飞秒脉冲,可以产生较高的非线性效应,能够在短光纤中将光谱展宽到中红外波段。但是,目前飞秒激光器的平均功率很有限,一般在数百毫瓦到瓦量级,无法产生高功率中红外超连续谱。而 2 μm 皮秒脉冲激光器的功率较高,平均功率可达 80 W^[21],在高功率中红外超连续谱产生中有很大优势。本研究选用中心波长为 1.95 μm、峰值功率为 50 kW、平均功率为 80 W、脉宽为 2 ps 的脉冲为泵浦源。

2.2 高非线性石英光纤

在石英光纤中,中红外超连续谱的产生面临的最大难题是如何克服石英光纤的损耗。从石英玻璃的材料吸收光谱(图 1)可以看出:当波长大于 2.7 μm 时,石英的材料吸收开始迅速增大,在 3 μm 左右达到一个极值点。这是由于羟基在该处有一个吸收峰,若更彻底地除去石英玻璃中的水,该处的吸收可降低。当波长大于 3.4 μm 时,石英玻璃的吸收才再次迅速增大。由以上分析可以得出,设计光纤结构使光谱展宽到 3.4 μm 是可行的。此外,应尽量降低光纤的波导损耗,减少由

图1 石英的材料吸收谱^[22]Fig. 1 Bulk attenuation spectrum of dry synthetic silica^[22]

光纤波导损耗引起的超连续谱功率的降低。

所设计的光纤如图2(a)所示。为了尽量降低制备难度, 光纤采用了按六角形规则排列的周

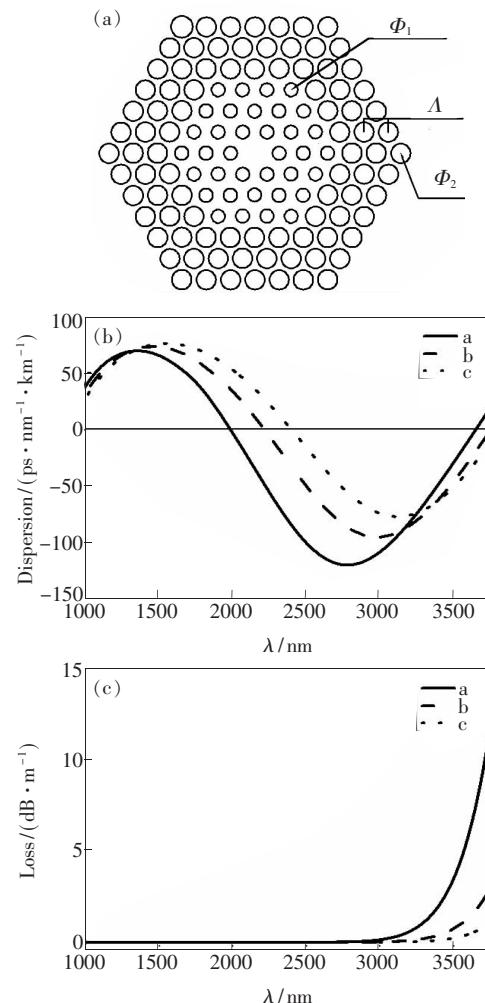


图2 (a) 光纤横截面图; (b) 光纤a、b、c的色散曲线; (c) 光纤a、b、c的波导损耗曲线。

Fig. 2 (a) Cross section of the PCF. (b) Dispersion curves of three fibers. (c) Confinement loss curves of three fibers.

期性包层结构。内3圈孔径 Φ_1 较小, 这是调整光纤色散的需要, 同时较小的孔径也使得光纤可以耐受更高的泵浦功率。外3圈空气孔孔径 Φ_2 较大, 可以有效降低光纤在长波处的波导损耗。我们设计了3种具有不同的空气孔直径与孔间距的光纤。光纤a: $\Phi_1 = 0.99 \mu\text{m}$, $\Phi_2 = 1.44 \mu\text{m}$, $\Lambda = 1.80 \mu\text{m}$; 光纤b: $\Phi_1 = 1.08 \mu\text{m}$, $\Phi_2 = 1.57 \mu\text{m}$, $\Lambda = 1.96 \mu\text{m}$; 光纤c: $\Phi_1 = 1.14 \mu\text{m}$, $\Phi_2 = 1.66 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.08 \mu\text{m}$ 。

由光纤的色散和波导损耗曲线(图2(b)、(c))可以看出:3种光纤均有一个零色散波长在2 μm附近(光纤a为1.98 μm, 光纤b为2.21 μm, 光纤c为2.38 μm);光纤a、b、c在截止到3750 nm处的波导损耗分别为11.8, 2.8, 1.1 dB/m, 与吸收损耗相比较小;光纤a、b、c的芯径分别为2.61, 2.84, 3.01 μm, 均可承受几十千瓦峰值功率及上百瓦平均功率的泵浦脉冲^[13, 23-24]。光纤色散与波导损耗特性符合高功率中红外超连续谱产生的基本要求。

3 超连续谱分析

3.1 理论基础

非线性薛定谔方程^[25]是非线性光学的基本方程, 可写为如下形式:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} \left(|A|^2 A - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right) \right], \quad (1)$$

方程左边表示线性传播过程, 线性损耗及色散效应。其中, 正比于 A 的项表示光纤的损耗, α 是与角频率 ω 有关的损耗系数。方程右边表示非线性效应。其中, 第一项为自相位调制。时间导数项为非线性偏振的一阶导数, 与自陡峭和光学冲击有关。正比于 T_R 项的起因与延迟拉曼有关, 对应于脉冲内拉曼散射引发的自频移。

为了在超连续谱的模拟分析过程中将石英光纤的损耗考虑在内, 使计算结果更符合实际情况。我们将图1所示的石英材料吸收损耗及图2(c)所示的光纤波导损耗包含在损耗系数 α 内, 利用分步傅里叶方法求解该非线性薛定谔方程, 模拟超连续谱的产生。其中, 延时拉曼响应对非线性极化的贡献 f_R 为0.18。石英的非线性折射率系

数为 $2.73 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。由光纤结构参数计算得到光纤 a、b、c 的模场面积 A_{eff} 分别为 6.912, 7.189, 7.336 μm^2 , 非线性系数 γ 分别为 12.3, 11.6, 11.0 $\text{m}^{-1} \cdot \text{kW}^{-1}$ 。

3.2 结果分析

在前文提到的理论基础上,由数值模拟可得到利用前述皮秒脉冲泵浦 3 种光纤产生的超连续谱演化图,如图 3 所示。

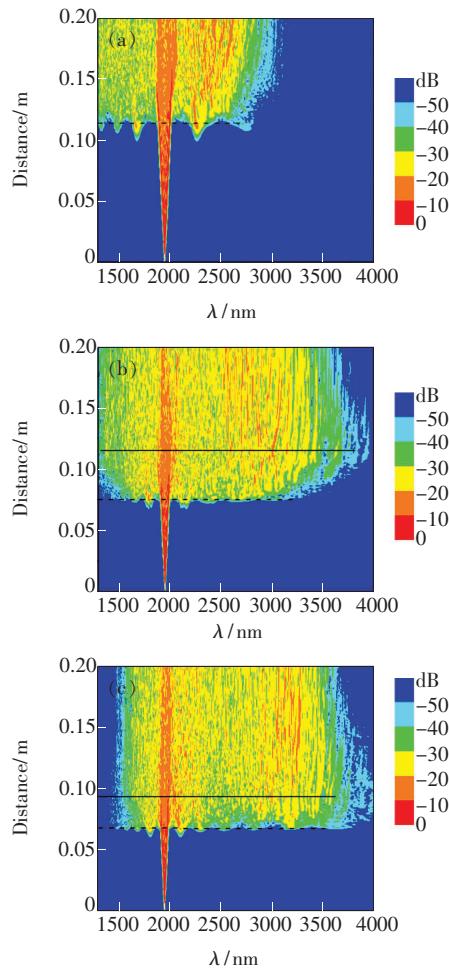


图 3 利用 50 kW、80 W、2 ps 脉冲分别泵浦光纤 a(a)、b(b)、c(c)产生的超连续谱演化图。

Fig. 3 SC evolution figures generated by injecting 50 kW, 80 W, 2 ps pulse into fiber a (a), b (b), and c (c), respectively.

从图 3(a)可以看出:在 20 cm 光纤 a 中,20 dB 超连续谱不能展宽到中红外区域,不适合高功率中红外超连续谱的产生。由图 3(b)、(c)可以看出:随着脉冲传播距离的增加,超连续谱逐渐展宽,达到一定距离后,由于光纤损耗的影响光谱变窄。图中虚线给出超连续谱开始迅速展宽时的光

纤长度,实线给出超连续谱展到最宽时的光纤长度,分别为 11 cm 和 9.6 cm。由此可得出在 11 cm 光纤 b 与 9.6 cm 光纤 c 中产生的超连续谱(如图 4(a)所示)。

由前文的分析可以得出:首先,光纤 b、c 的纤芯直径分别为 2.84 μm 和 3.01 μm ,足以承受平均功率为 80 W 的泵浦脉冲^[13,24-25]。其次,假设耦合效率为 80%,耦合进光纤的脉冲平均功率为 64 W,结合图 4(a)可计算得出在考虑光纤损耗的情况下,光纤 b、c 的超连续谱平均功率 P 分别为 56.6 W 和 54.4 W。利用峰值功率 50 kW、平均功率 80 W、脉宽 2 ps 的 1.95 μm 脉冲泵浦 11 cm 长的石英 PCF b 可以得到平均功率高达 56.6 W、20 dB 带宽为 1 870 nm、覆盖 1 550 ~ 3 420 nm 的中红外超连续谱;泵浦 9.6 cm 长的石英光子晶体光纤 c 可以得到平均功率为 54.4 W、20 dB 带宽为 1 940 nm、覆盖 1 630 ~ 3 570 nm 的超连续谱。光纤 c 产生的中红外超连续谱较宽,而平均功率相对低于光纤 b,这是由光纤的色散及损耗特性

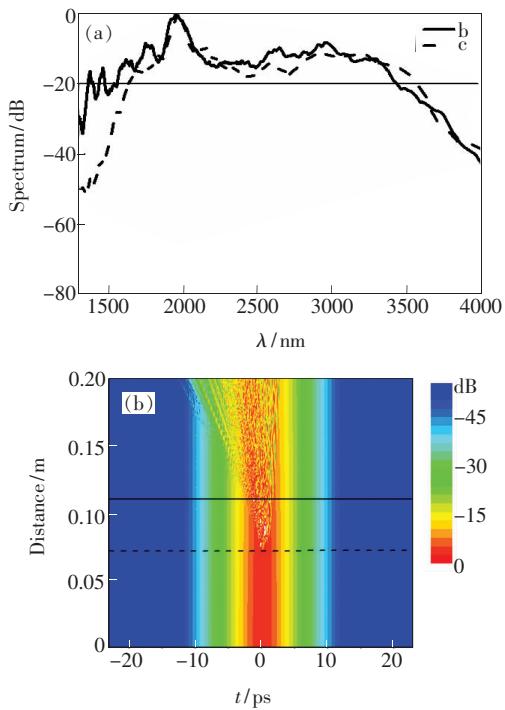


图 4 (a) 超连续谱的频域图;(b) 超连续谱的时域演化图,图中的实线与虚线分别与图 3(b) 中的实线与虚线对应。

Fig. 4 (a) Frequency domain graph of supercontinuum spectra. (b) Time domain figure of SC spectrum. The solid line and dashed line are corresponding to the solid line and dashed line in Fig. 3(b).

决定的。下面以光纤 b 中超连续谱的产生为例对超连续谱产生的原理进行分析。

从超连续谱的频域演化图 3(b) 及时域演化图 4(b) 可以看出: 在脉冲传播的最初阶段, 光谱是对称展宽的; 传播到大约 7.4 cm 左右(图中虚线处)时, 光谱开始迅速不对称展宽, 时域图中也开始出现了精细结构。光谱下一步的演化与长波成分的连续红移有关。

由计算可以得到, 色散长度 $L_D = 33.73 \text{ m}$, 非线性长度 $L_{NL} = 1.69 \times 10^{-3} \text{ m}$, 而光纤长度 $L = 0.11 \text{ m}$ 。因为 $L_D \gg L \gg L_{NL}$, 非线性效应特别是调制不稳定性^[23] 及四波混频^[26] 在脉冲传播的最初阶段起主要作用。在频域, 频率蓝移的 Stokes 边带和频率红移的反 Stokes 边带使光谱近似对称展宽; 在时域, 它们引起超快时间调制的发展。随着脉冲进一步传播, 泵浦脉冲包络开始分裂为一系列超短子脉冲。噪声引起的 Stokes 边带转变为超短孤子序列, 同时在正常色散区辐射出红外色散波, 使超连续谱得到极大展宽。

由此可以看出, 红外色散波的产生对超连续谱的展宽起重要作用。由相位匹配条件^[27-28]:

$$(1 - f_R) \gamma(\omega_p) P_p - \sum_{n \geq 2} \frac{(\omega_{DW} - \omega_p)^n}{n!} \beta_n(\omega_p) = 0, \quad (2)$$

可得出光纤 a、b、c 的红外色散波的中心波长分别为 $2.566, 2.810, 3.533 \mu\text{m}$ 。由此可见: 当泵浦波长位于两个零色散波长之间时, 光纤长波方向的零色散波长越长, 红外色散波的中心波长就越长, 越有利于超连续谱向长波方向展宽。这就使光纤 c 产生的超连续谱的长波限最大。然而, 由光纤 c 的色散波中心波长可知, 当色散波开始出现时中心波长已经超过 $3.4 \mu\text{m}$ 。根据前文对石英吸收损耗的分析, 这会增加超连续谱的损耗, 降低超连续谱的转化效率。由此可见, 光纤 b 更适合高功率中红外超连续谱的产生, 而光纤 c 则更适合将超连续谱向长波方向展宽。

4 结 论

首次报道了石英光纤中高功率中红外超连续谱的产生, 研究了不同色散特性的石英光子晶体光纤对高功率中红外超连续谱产生的影响。通过合理设计光纤结构并精心选择泵浦源, 利用 $1.95 \mu\text{m}$ 皮秒脉冲泵浦零色散波长在 $2 \mu\text{m}$ 附近的低损耗石英光子晶体光纤, 实现了高功率中红外超连续谱的产生。研究表明, 在高功率皮秒脉冲泵浦下, 采用石英光子晶体光纤能够产生 20 dB 带宽为 1870 nm 、覆盖 $1550 \sim 3420 \text{ nm}$ 、平均功率达 56.6 W 的超连续谱。

参 考 文 献:

- [1] Sanders S T. Wavelength-agile fiber laser using group-velocity dispersion of pulsed super-continua and application to broadband absorption spectroscopy [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, 75(6-7):799-802.
- [2] Buchter K, Herrmann H, Langrock C, et al. All-optical Ti:PPLN wavelength conversion modules for free-space optical transmission links in the mid-infrared [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(4):470-472.
- [3] Allen M G. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, 9(4):545-562.
- [4] Xia C N, Xu Z, Islam M N, et al. 10.5 W time-averaged power mid-IR supercontinuum generation extending beyond $4 \mu\text{m}$ with direct pulse pattern modulation [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, 15(2):422-434.
- [5] Qin G S, Yan X, Kito C, et al. Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to $6.28 \mu\text{m}$ in a fluoride fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(16):161103-1-3.
- [6] Domachuk P, Wolchover N A, Cronin-Golomb M, et al. Over 4 000 nm bandwidth of mid-IR supercontinuum generation in sub-centimeter segments of highly nonlinear tellurite PCFs [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(10):7161-7168.
- [7] Liao M S, Chaudhari C, Qin G S, et al. Tellurite microstructure fibers with small hexagonal core for supercontinuum generation [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(14):12174-12182.
- [8] El-Amraoui M, Fatome J, Jules J C, et al. Strong infrared spectral broadening in low-loss As-S chalcogenide suspended core microstructured optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(5):4547-4556.
- [9] Yang W Q, Zhang B, Xue G S, et al. 13 W 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.
- [10] Liu K, Liu J, Shi H X, et al. High power mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode ZBLAN fiber with up to 21.8 W average output power [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(20):24384-24391.
- [11] Razeghi M, Slivken S, Bai Y, et al. The quantum cascade laser: A versatile and powerful tool [J]. *Opt. Photon. News*, 2008, 19(7-8):42-47.
- [12] Anderson R, Farinelli W, Laubach H, et al. Selective photothermolysis of lipid-rich tissues: A free electron laser study [J]. *Laser Surg. Med.*, 2006, 38(10):913-919.
- [13] Cumberland B A, Travers J C, Popov S V, et al. 29 W high power CW supercontinuum source [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(8):5954-5962.
- [14] Chen K K, Alam S U, Price J H V, et al. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(6):5426-5432.
- [15] Chen H W, Guo L, Jin A J, et al. Investigation of hundred-watt-level supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2013, 62(15):154207-1-7 (in Chinese).
- [16] Xia C N, Kumar M, Cheng M Y, et al. Supercontinuum generation in silica fibers by amplified nanosecond laser diode pulses [J]. *IEEE J. Sel. Top Quant. Electron.*, 2007, 13(3):789-797.
- [17] Guo C Y, Ruan S C, Chen Z C, et al. An all fiber supercontinuum source pumped with a 18.4 W picosecond fiber laser [J]. *J. Shenzhen Univ.* (深圳大学学报), 2011, 28(3):118-224 (in Chinese).
- [18] Chen K K, Alam S U, Price J H, et al. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(6):5426-5432.
- [19] Song R, Hou J, Chen S P, et al. Recent developments in high power near-infrared super-continuum generation based on photonic crystal fiber [J]. *Chin. Phys. B*, 2012, 21(9):94211-94215.
- [20] Yamamoto T, Kubota H, Kawanishi S, et al. Supercontinuum generation at 1.55 μm in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, 11(13):1537-1540.
- [21] Wang P, Liu J. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber lasers [J]. *Chin. J. Laser* (中国激光), 2013, 40(6):10-21 (in Chinese).
- [22] Humbach O, Fabian H, Grzesik U, et al. Analysis of OH absorption bands in synthetic silica [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1996, 203:19-26.
- [23] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, 78(4):1135-1140.
- [24] Travers J C, Rulkov A B, Cumberland B A, et al. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a 400 W continuous wave fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(19):14435-14447.
- [25] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd ed. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2002:22-35.
- [26] Sévigny B, Vanvincq O, Valentin C, et al. Four-wave mixing stability in hybrid photonic crystal fibers with two zero-dispersion wavelengths [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(25):30859-30873.
- [27] Fang L, Zhao J L, Gan X T, et al. Generation and control of supercontinuum in photonic crystal fibers with two-zero dispersion wavelengths [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2010, 39(11):1921-1927 (in Chinese).
- [28] Hilligsøe K M, Andersen T, Paulsen H, et al. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(6):1045-1054.



高娟娟(1988-),女,山东德州人,硕士研究生,2011年于青岛理工大学获得学士学位,主要从事石英光子晶体光纤中超连续谱产生的研究。

E-mail: gaosj@siom.ac.cn



廖梅松(1974-),男,湖北枝江人,研究员,2007年于上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光子晶体光纤、特种光纤、高非线性光纤及其非线性效应的研究。

E-mail: liaomeisong@siom.ac.cn