

文章编号 1004-924X(2014)05-1138-05

## 纳秒声光调 Q 光纤激光器产生超连续谱

高 静, 于 峰, 匡鸿深, 葛廷武, 王智勇\*

(北京工业大学 激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

**摘要:**根据现有生成超连续谱方案的不足, 搭建了一台全光纤结构的纳秒声光调 Q 激光器。该激光器中心波长为 1 064.3 nm, 重复频率为 20 kHz, 脉冲宽度为 250 ns; 经过一级放大得到的输出功率为 13.02 W。将信号光耦合进自行研制的高功率模场适配器 (MFA), 得到了 10.7 W 的信号光输出, 耦合效率高达 82.2%。将 MFA 与光子晶体光纤 (PCF) 熔接, 得到了平均功率为 5.43 W 的超连续谱输出, 光谱覆盖为 900~1 700 nm。由于实验采用的声光调制器 (AOM) 脉宽较宽, 导致泵浦光峰值较低, 非线性效应较弱, 未能使超连续谱向可见光展宽。因此, 建议采用较窄脉宽的 AOM 作为调 Q 元件来实现高峰值功率输出, 以改善纳秒脉冲 PCF 产生的超连续谱特性。

**关键词:**声光调 Q; 光子晶体光纤; 超连续谱; 光纤激光器

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142205.1138

## Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber lasers

GAO Jing, YU Feng, KUANG Hong-shen, GE Ting-wu, WANG Zhi-yong\*

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

\* Corresponding author, E-mail: zywang@bjut.edu.cn

**Abstract:** For the shortcomings of current schemes to generate laser supercontinuum spectra, an acousto-optic Q-switched nanosecond all fiber laser is established. The laser shows its central wavelength at 1 064.3 nm, repetition rate of 20 kHz and a pulse duration of 250 ns. After primary amplification, the output power is 13.02 W. When the amplified pulse is launched into a self-made high power Mode Field Adaptor (MFA), the signal light output can be 10.7 W and the coupling efficiency is up to 82.2%. After the MFA is spliced with a piece of Photonic Crystal Fiber (PCF), the output supercontinuum spectrum with an average output power of 5.43 W can be obtained at a wavelength range from 900 nm to 1 700 nm. As the Acoustic Optical Modulator (AOM) in the experiment has a wider pulse duration, which leads to a lower peak value of pump light and a lower nonlinear effect, so that the supercontinuum spectra do not include the visual part. It suggests that the AOM with narrower pulse duration should be used to generate high peak power to widen the spectral bandwidth and flatten the supercontinuum spectra.

**Key words:** acousto-optic Q-switch; photonic crystal fiber; supercontinuum spectrum; fiber laser

收稿日期: 2013-06-21; 修订日期: 2013-08-13.

基金项目: 科研基地-科技创新平台-光纤激光器研究平台-高功率全光纤激光器开发项目 (No. PXM2011\_014204\_09\_000060)

## 1 引 言

当光脉冲在光纤中传输时, 其时域和频域演化不仅受自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM)、受激拉曼散射 (SRS) 和四波混频 (FWM) 等多种非线性效应的影响, 而且还受光纤色散特性的影响。这些非线性过程能在脉冲频谱内产生新的频率, 对足够强的脉冲, 其频谱能变得很宽, 以至于频率范围超过 10 THz。这种极端的频谱展宽称为超连续谱产生, 大约是 1970 年在固体和气体非线性介质中发现的<sup>[1]</sup>。超连续谱由于具有平坦的宽带光谱、高度的空间相干性等, 能大大提高信噪比、减小测量时间以及加宽光谱测量范围, 因此可广泛应用于光纤衰减测量、干涉测量仪、光相干摄影技术和光谱学分析等研究, 特别是高功率、高亮度、宽光谱以及谱密度集中在可见光波段的超连续谱激光光源, 它在军用和民用方面具有更广阔的前景<sup>[2-4]</sup>。

目前, 普遍采用连续激光或超短脉冲激光激励具有较高非线性和色散可控的微结构光纤 (光子晶体光纤) 得到超连续谱激光<sup>[5]</sup>, 若要实现大功率的超连续谱输出, 一般利用连续光作为超连续产生的泵浦源<sup>[6]</sup>, 但这往往不能满足谱密度集中在短波范围的应用需要; 另一种常用方案是采用高重复频率的脉宽为皮秒或者飞秒量级的超短脉冲种子源 (脉宽还有纳秒量级脉冲泵浦源<sup>[7]</sup>),

利用主振荡功率放大 (MOPA) 结构的光纤激光器得到高功率的超短脉冲<sup>[7-8]</sup>, 再耦合进光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF)。为了提高非线性效应的产生阈值, 放大器采用大模场直径光纤; 而为增强 PCF 中的非线性效应, PCF 的模场直径通常较小, 这就导致放大器最后一级掺杂光纤与 PCF 的模场直径相差较大, 它们之间的耦合很困难。提高二者的耦合效率是实现高功率超连续谱输出的关键<sup>[9-14]</sup>。本文搭建了一套全光纤纳秒声光调 Q 光纤激光光源。激光器振荡级采用线型腔, 经过一级功率放大, 放大器输出尾纤为 20/130  $\mu\text{m}$  的双包层光纤, 通过熔接自制的泵浦剥离器剥除残余泵浦光, 采用新方法直接熔接 5/125  $\mu\text{m}$  小模场直径 PCF。在激光器信号的光功率输出为 13.02 W 时, 得到了 82.2% 的耦合效率, 超连续谱的输出功率为 5.43 W, 谱宽为 900~1 700 nm。

## 2 实验装置

本实验采用一级放大的声光调 Q 脉冲光纤激光器, 振荡级 (种子源) 为线型腔结构, 由泵浦源 ( $\text{LD}_1$ )、泵浦耦合器 ( $\text{Combiner}_1$ )、掺杂光纤 ( $\text{Yb}_1$ )、声光调制器 (AOM) 和一对光纤光栅 ( $\text{FBG}_1$ 、 $\text{FBG}_2$ ) 组成; 放大级由泵浦源 ( $\text{LD}_2$ )、泵浦耦合器 ( $\text{Combiner}_2$ )、掺杂光纤 ( $\text{Yb}_2$ ) 组成。为防止放大级反向光对振荡级器件造成损害, 振荡级

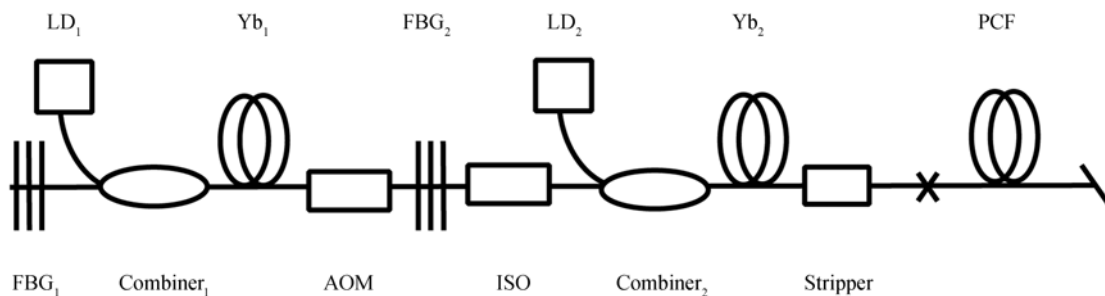


图 1 纳秒声光调 Q 全光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of acousto-optic nanosecond Q-switched all fiber laser

之后熔接一个工作波长为 1 064 nm、隔离度为 40 dB 的光隔离器 (ISO)。激光器放大级输出端熔接一个泵浦剥离器 (Stripper), 用于剥掉残余泵浦光, 之后熔接一段 PCF, 产生超连续谱输出, 结

构如图 1 所示。其中  $\text{Combiner}_1$  为  $(2+1) \times 1$ , 输入输出端均为 10/130  $\mu\text{m}$  的双包层光纤;  $\text{LD}_1$  为一个波长为 975 nm 的半导体激光器, 最大输出功率为 9 W, 通过 105/125  $\mu\text{m}$ , NA 0.22 的光

纤进入泵浦耦合器;FBG<sub>1</sub> 为反射率大于 99% 的反射型光栅,中心波长为 1 064 nm,3 dB 带宽为 2 nm;FBG<sub>2</sub> 是反射率为 10% 的透射型光栅,中心波长为 1 064 nm,3 dB 带宽为 0.6 nm;Yb<sub>1</sub> 为 10/130 μm,NA 为 0.08/0.46,长度为 5 m,吸收系数为 4.8 dB/m@975 nm 的掺镱光纤;AOM 工作的中心波长为 1 064 nm,脉冲宽度为 250 ns,插入损耗为 2 dB,调制上升时间为 100 ns,由一台脉冲信号发生器提供驱动信号。Combiner<sub>2</sub> 为(2+1)×1,其输入端为 10/130 μm 双包层光纤,输出端为 20/130 μm 双包层光纤;LD<sub>2</sub> 为一个波长为 975 nm 的半导体激光器,最大输出功率为 25 W,通过 105/125 μm,NA 为 0.22 的光纤进入泵浦耦合器;Yb<sub>2</sub> 为 20/130 μm,NA 为 0.08/0.46,长度为 2 m,吸收系数为 13 dB/m@975 nm 的掺镱光纤。实验采用国产零色散波长为 1 040 nm 的 PCF,其空气孔直径  $d = 1.0 \mu\text{m}$ ,空气孔间距  $\Lambda = 3.8 \mu\text{m}$ ,光纤直径为 5/125 μm,NA 为 0.2,长度为 5 m,输出端面角为 8°。图 2 为 PCF 横截面的扫描电镜图。

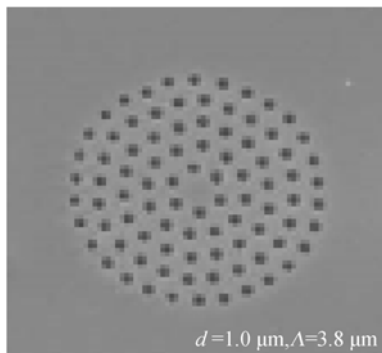


图 2 PCF 横截面扫描电镜图

Fig. 2 Scanning Electron Micrograph (SEM) of PCF cross-section

### 3 实验结果与讨论

激光器振荡级采用腔内泵浦,在泵浦光输入功率为 3.66 W 时,得到输出功率为 0.98 W,中心波长为 1 064.3 nm,3 dB 谱宽为 0.38 nm 的信号光。振荡级的信号光光谱如图 3 所示。利用重频为 20 kHz 的 AOM 进行实验,图 4 是激光器振荡级的输出脉冲图,激光器脉宽约为 250 ns。

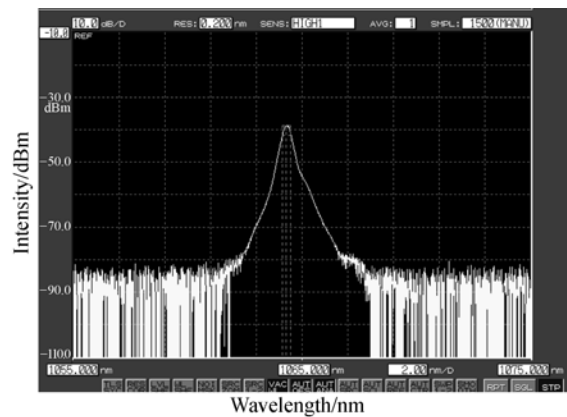


图 3 振荡级输出功率为 0.98 W 时的输出光谱图

Fig. 3 Output spectrum of seed source at output power of 0.98 W

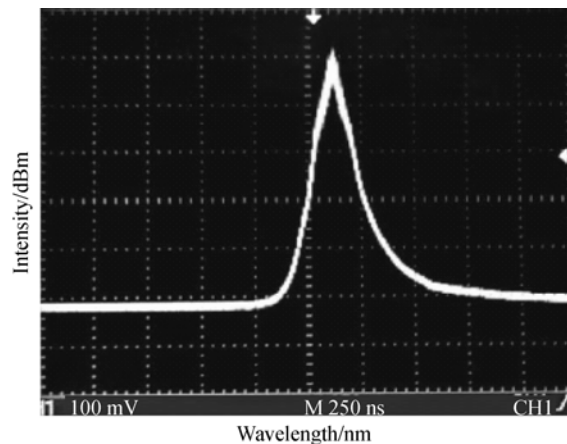


图 4 重频为 20 kHz 时振荡级输出脉冲

Fig. 4 Output pulse of seed source at repetition of 20 kHz

在不加泵浦剥离器,放大级泵浦光的输入功率为 20.79 W 时,放大级掺杂光纤后的输出总功率为 15.05 W,测量得到的光谱如图 5 所示。由图可以看出,放大级输出含有部分剩余泵浦光。在放大级掺杂光纤后熔接一个自制泵浦剥离器,测得剩余信号的光功率为 13.02 W,泵浦剥离器的输出尾纤为 20/130 μm 的双包层无源光纤。

为了将大模场直径光纤输出的信号光高效耦合进小模场直径的 PCF 中,一般在放大器与 PCF 之间熔接一个模场适配器(Mode Field Adaptor,MFA)。商用 MFA 多应用于小模场光纤到大模场光纤的模场适配,否则元器件会因长时间工作引起的过热问题而烧损。本实验采用了一种新的耦合方式把放大器的信号光耦合进 PCF,该方式采用 Vytran 光纤熔接机熔接光纤,通过调整

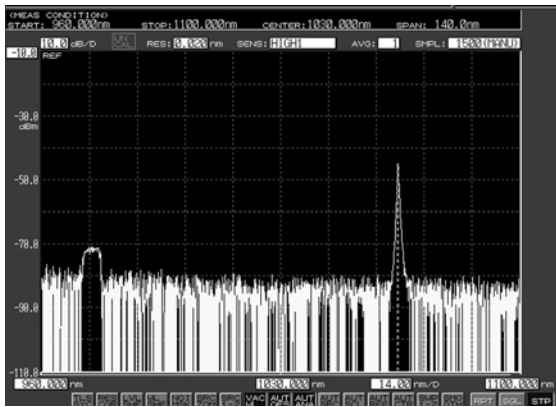


图 5 不加泵浦剥离器放大级输出功率为 15.05 W 时的输出光谱图

Fig. 5 Output spectrum of amplifier without stripper at output power of 15.05 W

熔接机熔接火头的熔接功率和追加多次火头熔接, 最终在火头熔接功率为 43 W, 追加 7 次熔接功率为 29 W, 放大器输出功率为 13.02 W 时, 得到了最大的信号光耦合输出功率, 其值为 10.70 W, 耦合效率为 82.2%。

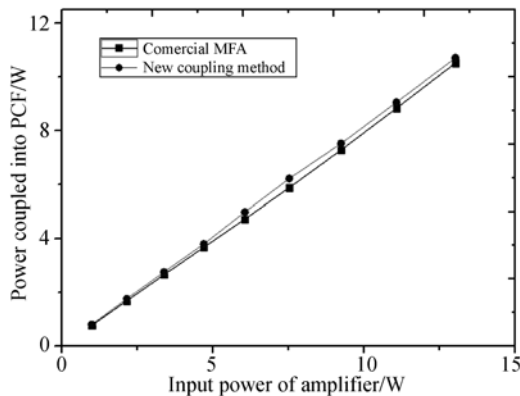


图 6 两种耦合方式的耦合功率对比图

Fig. 6 Comparison of coupling power between two coupling methods

为了进行对比, 在放大器泵浦剥离器后熔接了一个商用的 MFA, MFA 两端尾纤分别为 20/125  $\mu\text{m}$  无源光纤和 Hi1060 光纤, 插入损耗为 0.5 dB, 在放大器输出功率为 13.02 W 时, 测得信号光的耦合输出功率为 10.51 W, 耦合效率为 80.7%。由此可知, 新耦合方法的效率稍高, 这是因为新方法采用直接光纤熔接而没有增加额外的元器件, 只需处理好光纤熔点的散热, 其可靠性更高。图 6 为本实验采用的耦合方式和熔接商

用 MFA 耦合方式得到的 PCF 信号光功率的对比图。

实验测得超连续谱的输出功率为 5.43 W, 转换效率为 50.7%。图 7 为采用光谱仪(YOKOGAWA-AQ6370C)测得的超连续谱输出图, 光谱覆盖 900~1 700 nm。由图可以看出, 输出的超连续谱中含有未转化的 1 064 nm 泵浦光, 且光谱短波方向展宽有限。由于振荡级采用的 AOM 脉宽为百纳秒量级, 最终进入 PCF 的信号光峰值功率为 2 kW 左右, 非线性效应较弱, 不足以产生更短波段的超连续谱。

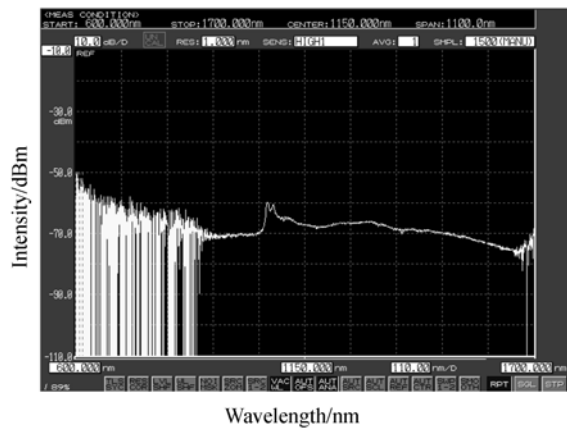


图 7 PCF 超连续谱输出图

Fig. 7 Output supercontinuum spectrum of PCF

## 4 结 论

本文搭建了一台全光纤结构的纳秒声光调 Q 激光器, 经过一级放大得到了输出功率为 13.02 W, 中心波长为 1 064.3 nm 的信号光输出。同时提出了一种新的耦合方式, 即在放大级增益光纤后熔接一个自制泵浦剥离器, 将剥离器与 PCF 熔接, 从而实现了高功率下大模场直径掺杂光纤到小模场直径 PCF 的高效率耦合, 耦合效率达 82.2%, 所得的超连续谱输出的平均功率为 5.43 W, 谱宽覆盖 900~1 700 nm。由于实验采用的 AOM 脉宽较宽, 导致泵浦光峰值较低, 非线性效应较弱, 未能使超连续谱向可见光展宽。因此, 作者建议采用脉宽较窄的 AOM 作为调 Q 元件来实现高功率输出, 改善纳秒脉冲激励 PCF 产生的超连续谱特性, 使光谱范围向可见光波段展宽, 输出光谱的平坦度更好。

## 参考文献:

- [1] AGRAWAL G P. *Nonlinear Fiber Optics Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Second Edition. Singapore: Elsevier Pte. Ltd., 2009.
- [2] SMIMRNOV S V, CASTANON J D, ELLINGHAM T J, *et al.*. Optical spectral broadening and supercontinuum generation in telecom applications [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, 12:122-147.
- [3] HULT J, WATT R S, KAMINSKI C F. High bandwidth absorption spectroscopy with a dispersed supercontinuum source [J]. *Optics Express*, 2007, 15(18):11385-11395.
- [4] FRANK J H, ELDER A D, SWARTLING J, *et al.*. A white light confocal microscope for spectrally resolved multidimensional imaging [J]. *Journal of Microscopy*, 2007, 227(3):203-215.
- [5] RANKA J K, WINDELER R S, STENTZ A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(1):25-27.
- [6] 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]. *Optics Express*, 2008, 16(19):14435-14447.
- [7] ZHU S L, GAO C X, HE H D, *et al.*. All fiber supercontinuum light source using photonic crystal fibers pumped by nanosecond fiber laser pulses [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(9):1629-1632.
- [8] 刘楚, ERIC R, TONI L, 等. 纳秒脉冲在普通单模光纤中产生超连续谱的实验研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38:0705003.
- LIU CH, ERIC R, TONI L, *et al.*. Experimental research on supercontinuum generation from nanosecond pulse and conventional single mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38:0705003. (in Chinese)
- [9] 李燕, 刘燕格, 王超, 等. 输出功率大于 10 W 的掺镱双包层微结构光纤激光器 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):151-154.
- LI Y, LIU Y G, WANG CH, *et al.*. Yb-doped double cladding microstructure fiber laser with output power exceeded 10 W [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):151-154. (in Chinese)
- [10] 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):1943-1948.
- CHEN SH P, CHEN H W, HOU J, *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8):1943-1948. (in Chinese)
- [11] SONG R, HOU J, CHEN S P, *et al.*. 157 W all-fiber high-power picosecond laser [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(13):2497-2500.
- [12] YU H, ZHOU J, WUSHOUER X, *et al.*. 40 W picosecond fiber amplifier with the large mode-area polarized crystal fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(9):653.
- [13] CHEN K K, ALAM S, PRICE J H, *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power [R]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, California, United States*, 2010(5):16-21.
- [14] CHEN S P, WANG J H, CHEN H W, *et al.*. 20 W all fiber supercontinuum generation from picosecond MOPA pumped photonic crystal fiber [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(3):519-521.

## 作者简介:



高 静(1988—), 女, 山东临沂人, 博士生, 主要从事脉冲光纤激光器, 超连续谱光纤激光器方面的研究。  
E-mail: gaojinggigi@163.com



王智勇(1970—), 男, 重庆人, 研究员, 博士生导师, 1992年于北京理工大学获得学士学位, 1995年与1998年于北京工业大学分别获得硕士和博士学位, 主要从事大功率半导体激光器, 大功率半导体激光关键器件制备与集成, 大功率光纤激光器方面的研究。  
E-mail: zywang@bjut.edu.cn