

# 基于光子晶体光纤的百瓦超连续谱的产生

赵磊, 李超, 黎玥, 王琳, 张昊宇\*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 为得到脉冲宽度为 12 ps、中心波长为 1064 nm 的高功率超连续谱, 提出了一种全光纤结构的超连续谱光源。将该光源作为抽运源, 其输出功率在芯径为 10 mm 的掺镱光纤中被放大至 189 W。利用窄带滤波器、级间隔离器对脉冲信号进行放大, 将放大后的脉冲信号注入长度为 0.5 m 的光子晶体光纤, 产生了光谱范围为 460~1700 nm、输出功率为 102.8 W 的超连续谱。由于存在量子亏损和光谱传输损耗, 当抽运功率从 1.5 W 提高至 189 W 时, 超连续谱光-光斜率效率从 90% 降低至 20%。

**关键词** 激光光学; 光纤光学; 超连续谱; 光子晶体光纤; 斜率效率

**中图分类号** TN253

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0201018

## Hundred-Watt-Level Supercontinuum Spectrum Generation Based on Photonic Crystal Fiber

Zhao Lei, Li Chao, Li Yue, Wang Lin, Zhang Haoyu

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** A supercontinuum spectrum source with all-fiber structure is proposed to obtain high power supercontinuum spectrum with the pulse width of 12 ps and the center wavelength of 1064 nm. The source is used as the pump source, and the output power is amplified to 189 W in a Yb-doped fiber with a length of 10 mm. A narrow-band filter and a interstage isolator are used to amplify the pulse signal. The amplified pulse signal is injected into a photonic crystal fiber with a length of 0.5 m, and supercontinuum spectrum is generated with the spectrum range of 460-1700 nm and the output power of 102.8 W. For the existence of quantum defect and spectrum transmission loss, the light-light slope efficiency of the supercontinuum spectrum decreases from 90% to 30% when the pump power increases from 1.5 W to 189 W.

**Key words** laser optics; fiber optics; supercontinuum spectrum; photonic crystal fiber; slope efficiency

**OCIS codes** 060.3510; 060.2310; 320.6629

## 1 引 言

1996 年, Knight 等<sup>[1]</sup>提出了光子晶体光纤(PCF)的制作方法, 在此后的 10 年内, 超连续谱生成技术迅速发展<sup>[2-5]</sup>。2013 年, Devine 等<sup>[6]</sup>提出了超连续谱发展的 3 个重点方向, 分别为高功率超连续谱、低功率超连续谱以及紫外超连续谱。可见光波段的高功率超连续谱在遥感成像以及天文光学频率梳领域具有广阔的应用前景<sup>[7-8]</sup>, 因此这种超连续谱是目前的研究重点。

2008 年, Travers 等<sup>[9]</sup>得到了光谱范围为 600~1900 nm、输出功率为 28 W 的超连续谱。2010 年, Chen 等<sup>[10]</sup>将超连续谱的功率提高至 39 W, 并将光谱范围拓宽至 400~2250 nm。2011 年, Hu 等<sup>[11]</sup>利用飞秒激光器来抽运超连续谱, 实现了光谱范围为 500~1700 nm、功率为 49.8 W 的超连续谱。2013 年, Chen 等<sup>[12]</sup>将纤芯直径为 15 mm 的 PCF 用于制作光纤放大器, 产生了光谱范围为 700~1700 nm、输出功率为 92.5 W

**收稿日期:** 2016-09-21; **收到修改稿日期:** 2016-10-24

**作者简介:** 赵磊(1983—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事光纤激光器、超连续谱方面的研究。

E-mail: 386397752@qq.com

\* **通信联系人.** E-mail: hao\_yu\_zhang@126.com

的超连续谱。随后,Chen 等<sup>[13]</sup>使用单芯 PCF 将超连续谱的输出功率进一步提高至 101 W;但实现的光谱范围为 930~1600 nm,未包含可见光波段。同年,Song 等<sup>[14]</sup>将芯径为 25  $\mu\text{m}$ 、包层直径为 400  $\mu\text{m}$  的大模场掺镱光纤(YDF)用于放大器的放大级,实现了 216 W 的功率输出;但是,由于大模场光纤的非线性效应较弱,光谱未能展宽至可见光波段。2015 年,Hooper 等<sup>[15]</sup>为实现高功率且包含可见光波段的超连续谱输出,使用 7 $\times$ 1 的集束器,产生输出光的光谱范围为 405~2660 nm,输出功率为 51.5 W。综上所述,若使用大模场 PCF 光纤,光谱无法展宽至可见光波段;若使用芯径较小的 PCF 光纤,由于热管理较为困难,功率难以进一步提升。因此,就目前的技术而言,产生包含可见波段的百瓦超连续谱仍具有一定难度。

针对以上问题,提出了一种兼顾功率与超连续谱的产生方法。在此方法中,使用自研的锁模激光器产生脉冲信号,脉冲信号通过二级放大系统后进入 PCF,所产生的超连续谱的光谱范围可拓宽至可见光波段,功率可达到百瓦级。

## 2 实验方案

产生超连续谱的方案如图 1 所示,利用主振荡器功率放大(MOPA)结构对脉冲信号进行放大,将放大后的信号注入 PCF,从而产生高功率超连续谱。所采用激光器的输出脉冲信号的重复频率为 80 MHz[图 2(a)],输出单脉冲信号的谱宽为 0.4 nm[图 2(b)],输出单脉冲信号的脉宽为 12 ps[图 2(c)]。为提高放大效率,采用时分复用(TDM)方式将激光器的重复频率增加至 160 MHz,与此同时,输出功率从 130 mW 降低至 60 mW,由于光束劈裂比率不是严格的 1:1,因此脉冲在时域上的分布并不均匀。采用三级放大系统对脉冲信号进行放大,其中前两级为预放系统,第三级为主放系统。前两级预放系统均包括包层光剥离器(CPS)、长度为 4 m 的掺镱光纤、(2+1) $\times$ 1 光纤集束器、激光二极管(LD)抽运源以及隔离器(ISO)。为抑制放大自发辐射(ASE),在预放系统中采用反向抽运技术。主放大器由一个(6+1) $\times$ 1 光纤集束器、6 个 LD 抽运源、一段长度为 5 m 的掺镱光纤以及自研的高功率在线 CPS 构成。为确保光束质量,三级放大过程中所采用的掺镱光纤均为双包层光纤(LMA-YDF-10/130,Nuferm 公司)。三级放大后的脉冲信号通过自制的模场适配器(MFA)进入长度为 0.5 m 的单芯 PCF 并产生超连续谱。PCF 的纤芯直径为 5  $\mu\text{m}$ ,孔径为 1.3  $\mu\text{m}$ 。为减少返回的光,将 PCF 输出端连接至多模端帽。此方案所采用的 PCF 型号为 NKT photonics 公司生产的 LMA-5。LMA-5 光纤纤芯直径为 5  $\mu\text{m}$ ,零色散波长(ZDW)为 1053 nm,光纤端面及光纤色散、光纤损耗曲线如图 3 所示。

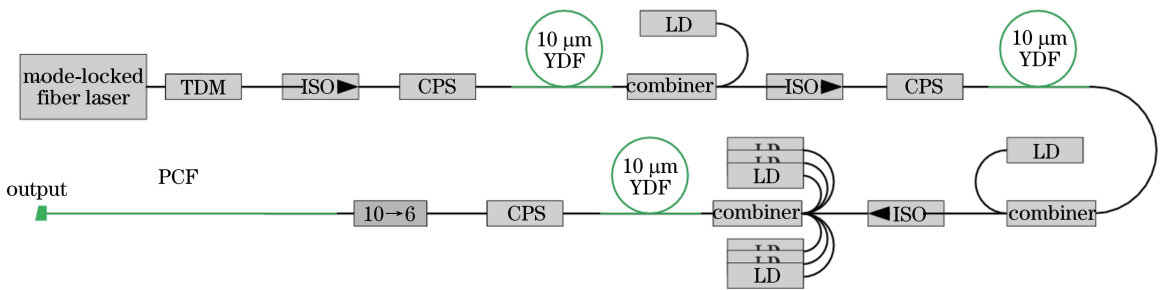


图 1 超连续谱产生方案示意图

Fig. 1 Diagram of supercontinuum spectrum generation scheme

当脉冲信号较弱时,信号放大过程中会产生较强的 ASE,为抑制 ASE,需使用多级放大系统对脉冲信号进行逐级放大。脉冲经过第一级预放系统后,功率仅为 1.5 W;脉冲经过第二级预放系统后,功率放大至 10 W;脉冲经过第三级放大系统后,使用 6 支功率为 50 W 的 LD 进行抽运,将脉冲进一步放大,放大后脉冲的平均功率为 189 W,放大后的信号光谱如图 4 所示。将此信号注入 PCF,使用 Ophir 公司生产的热功率计对信号进行检测,得到超连续谱的平均输出功率为 102.8 W。超连续谱的输出功率随抽运功率的变化如图 5(a)所示,不同输出功率下的超连续光谱如图 5(b)所示。使用两种不同的光谱仪(HR4000 and NIRQuest, Ocean Optics)来检测光谱。为获得可靠的光谱数据,两种光谱仪都使用标准光源进行校准,为减小空间啁啾对输出光谱的影响,使用积分球对光谱进行匀滑。

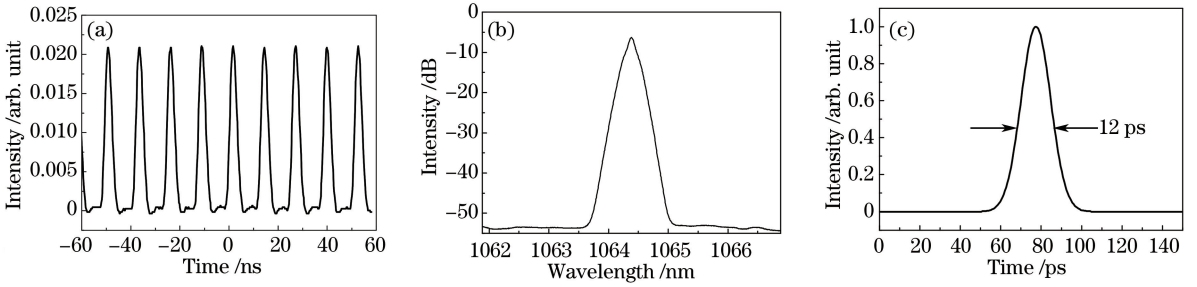


图 2 (a)激光器的输出脉冲信号;(b)单脉冲频域信号;(c)单脉冲时域信号

Fig. 2 (a) Output pulse signal of laser; (b) frequency domain signal of single pulse; (c) time domain signal of single pulse

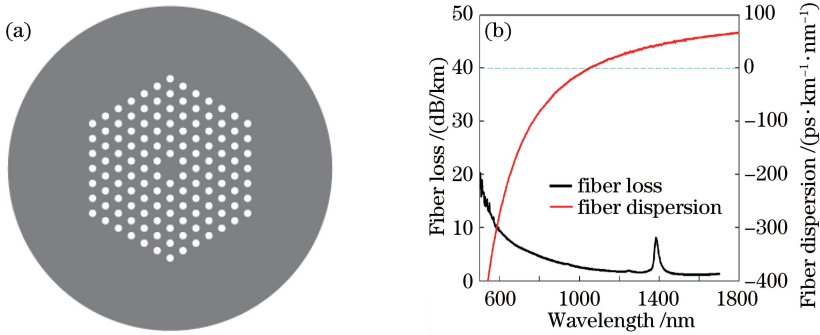


图 3 (a)光纤端面图;(b)光纤色散和光纤损耗随波长的变化

Fig. 3 (a) Cross section of fiber; (b) variations in fiber dispersion and fiber loss with wavelength

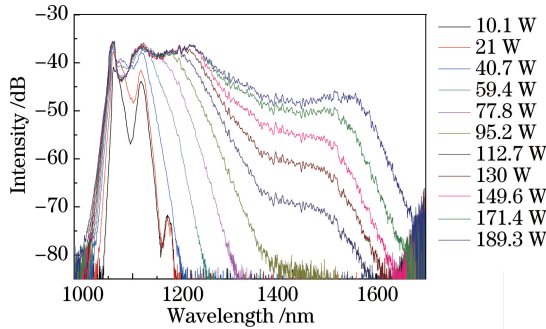


图 4 不同输出功率下放大信号的输出光谱

Fig. 4 Output spectra of amplified signals with different output powers

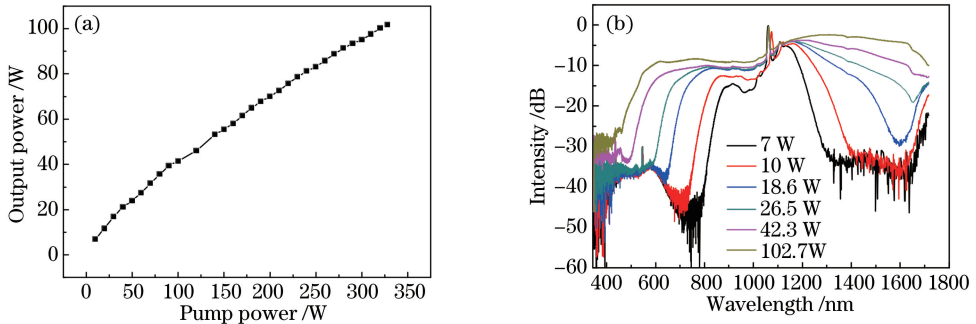


图 5 (a)超连续谱的输出功率随抽运功率的变化;(b)不同输出功率下的超连续光谱

Fig. 5 (a) Variation in output power of supercontinuum spectrum with pump power; (b) supercontinuum spectra with different output powers

### 3 实验结果及讨论

如图 5(a)所示,超连续谱的输出功率随着抽运功率的增加而增加,但抽运功率越大,输出功率的增幅越平缓,这一现象表现为光-光斜率效率的降低。图 5(a)中曲线的斜率即为超连续谱的光-光斜率效率。最初,光-光斜率效率高达 90%,然而,当输出功率增加至 102.8 W 时,光-光斜率效率下降为 20%。造成这种现象的原因包括量子亏损和光谱传输损耗。量子亏损是由受激拉曼散射(SRS)等受激非线性效应引起的,光谱传输损耗主要决定于 PCF 的结构,波长小于 500 nm 的光信号在 PCF 中损耗很大。如图 5(b)所示,相比长波长,随着功率的增加,光谱在短波长的展宽速度较慢,且展宽至 500 nm 后光谱几乎不再向短波方向展宽。

抽运脉冲信号的波长接近 PCF 的 ZDW,且脉冲持续时间短,峰值功率较大,有利于非线性效应的产生。因此,在初始阶段,自相位调制和 SRS 使得光谱迅速展宽。值得注意的是,在此阶段,短波方向在 550 nm 左右出现峰值,此现象主要是由三色阶散对脉冲信号的扰动引起的,该现象被称为切连科夫辐射或非孤子辐射<sup>[16-18]</sup>。当超连续谱的长波长超过 ZDW 时,由于孤子自频移效应,出现了 1400 nm 以上的光谱成分。调制不稳定、四波混频、交叉相位调制等现象将不同的峰融合到一起,形成了宽带超连续谱。因此,随着抽运光功率的提高,输出功率进一步提高,光谱随之进一步展宽。若继续增加抽运功率,当输出功率由 26.5 W 提高至 42.3 W 时,短波成分从 600 nm 展宽至 500 nm,同时,长波成分扩展至 1700 nm(已达到光谱仪的测量量程上限)。在此过程中,光-光斜率效率维持在 80%以上。当短波成分展宽超过 500 nm 后,光-光斜率效率逐渐降低,当输出功率增加至 102.8 W 时,短波成分展宽至 460 nm,光-光斜率效率降低为 20%。高平均输出功率状态下的低光-光斜率效率预示着大量热沉积,因此,热管理是 PCF 中迫切需要关注的重点,本实验中使用水冷金属平台放置 PCF,获得了较好的冷却效果。

### 4 结 论

提出了一种全光纤结构的超连续谱光源,实现了百瓦功率超连续谱输出,光谱范围覆盖可见波段。所设计的全光纤结构的输出光谱和输出功率都比较理想,但光谱的进一步拓宽和功率的进一步提升仍然比较困难。一方面,光谱向短波方向进一步展宽受 PCF 结构和材料的限制,需要设计新型 PCF;另一方面,光谱向长波方向进一步展宽以及输出功率的提高需要提升抽运功率,但增加抽运功率会给热管理带来新的难题,尤其是 PCF 与匹配光纤熔点处的热管理。今后可针对熔点处的热管理开展研究,以便进一步提高超连续谱的输出功率和拓宽光谱范围。

### 参 考 文 献

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [2] Husakou A V, Herrmann J. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(20): 203901.
- [3] Herrmann J, Griebner U, Zhavoronkov N, *et al.* Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(17): 173901.
- [4] Dudley J M, Taylor J R. Ten years of nonlinear optics in photonic crystal fibre[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(2): 85-90.
- [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] Devine A, Clowes J. Technology roadmap for supercontinuum fiber lasers[C]. *Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications*, 2013: T3. 5.
- [7] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [8] Alfano R R. The supercontinuum laser source: Fundamentals with updated references[M]. New York: Springer Science + Business Media, 2006.
- [9] 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.

- [10] Chen K K, Alam S, Price J H V, *et al.* Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power[J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5426-5432.
- [11] Hu X, Zhang W, Yang Z, *et al.* High average power, strictly all-fiber supercontinuum source with good beam quality [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2659-2661.
- [12] Chen H, Chen Z, Chen S, *et al.* Hundred-watt-level, all-fiber-integrated supercontinuum generation from photonic crystal fiber[J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(3): 032702.
- [13] Chen H, Wei H, Guo L, *et al.* High average power all-fiber-integrated supercontinuum sources[C]. *Advanced Solid State Lasers*, 2013: ATu3A. 33.
- [14] Song R, Hou J, Liu T, *et al.* A hundreds of watt all-fiber near-infrared supercontinuum[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(6): 065402.
- [15] Hooper L, Kalita M, Devine A, *et al.* White light 50 W supercontinuum: Roadmap to kW truly white lasers[C]. *SPIE*, 2015, 93440: 93440X.
- [16] Cheng J, Pedersen M E V, Charan K, *et al.* Intermodal Čerenkov radiation in a higher-order-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4410-4412.
- [17] Cherif R, Zghal M, Tartara L, *et al.* Supercontinuum generation by higher-order mode excitation in a photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 2147-2152.
- [18] Swiderski J, Michalska M. High-power supercontinuum generation in a ZBLAN fiber with very efficient power distribution toward the mid-infrared[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 910-913.