

高功率纳秒光纤激光器抽运锥形光子晶体光纤产生超连续谱

郭春雨¹ 欧阳德钦¹ 阮双琛^{1*} 闫培光¹ 韦会峰² 林怀钦¹ 伍一鸣¹ 杨锦辉¹

(¹ 深圳大学电子科学与技术学院深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060
² 长飞光纤光缆有限公司研发中心光纤光缆制备技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430073)

摘要 对半导体激光器进行调制得到了中心波长为 1060.14 nm、谱宽为 0.63 nm、重复频率为 1.55 MHz、脉宽为 11 ns 的纳秒种子激光, 进而对其进行三级主振荡功率放大(MOPA), 实现了 18.2 W 高功率、高重复频率纳秒光纤激光器。利用此纳秒光纤激光器及自主研发的光纤模场适配器, 抽运 145 m 锥形光子晶体光纤, 实现了最大输出功率为 2.2 W 的全光纤化白光超连续谱光源, 光谱范围为 440~1700 nm, 在整个光谱可探测范围内具有 15 dB 的光谱平坦度。

关键词 激光器; 主振荡功率放大; 纳秒光纤激光器; 锥形光子晶体光纤; 超连续谱

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0405003

Supercontinuum Generation from a Tapered Photonic Crystal Fiber Pumped with a High-Power Nanosecond Fiber Laser

Guo Chunyu¹ Ouyang Deqin¹ Ruan Shuangchen¹ Yan Peiguang¹
Wei Huifeng² Lin Huaqin¹ Wu Yiming¹ Yang Jinhui¹

¹ Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

² State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Company Ltd. R&D Center, Wuhan, Hubei 430073, China

Abstract By modulating the laser diode, a nanosecond laser with center wavelength of 1064.14 nm, spectral width of 0.63 nm, repetition frequency of 1.55 MHz and pulse width of 11 ns is realized. This seed laser is then amplified to a high-power, high-repetition rate nanosecond fiber laser with an average output power of 18.2 W using a tri-stage master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. This nanosecond fiber laser is used to pump a 145 m long tapered photonic crystal fiber with a self-made mode field adaptor (MFA), and a 2.2 W all-fiber white light supercontinuum source is realized with a 15 dB spectral flatness in the detected spectral range from 440 nm to 1700 nm. The spectral edge also corresponds well with the theoretical value.

Key words lasers; master oscillator power amplifier; nanosecond fiber laser; tapered photonic crystal fiber; supercontinuum

OCIS codes 140.3538; 060.2320; 060.3510; 060.5295; 060.4370

1 引言

近些年来,光子晶体光纤(PCF)的出现使超连

续谱(SC)的研究不断实现突破。光子晶体光纤通过改变其空气孔大小及占空比来提供高的非线性系

收稿日期: 2012-10-31; 收到修改稿日期: 2013-01-10

基金项目: 国家 973 计划(2010CB735904)、国家自然科学基金(61275144)、教育部博士点基金(20104408110002)、深圳市科技研发基金基础研究计划(JC201005250048A,1104300029783024)和深圳大学科研基金资助面上项目(201203)资助课题。

作者简介: 郭春雨(1981—),男,博士,主要从事高功率光纤激光器及超连续谱光源等方面的研究。

E-mail: cyguo@szu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: scruan@szu.edu.cn

数和可控的色散特性^[1],结合当前成熟的高功率光纤激光器作为其抽运源,可实现全光纤化、高功率、宽带和平坦超连续谱光源,在高精度光学相干层析、生物成像、传感和雷达等领域具有重要的应用。产生超连续谱一般有飞秒、皮秒、纳秒脉冲和连续波几种抽运方式。飞秒激光抽运成本高、体积比较庞大、而且难以实现全光纤化。连续波抽运通常需要几十瓦到上百瓦的抽运功率或百米级光子晶体光纤非线性介质,而且要实现覆盖可见光波段的宽带超连续谱也比较困难^[2~4]。皮秒脉冲抽运具有较高的脉冲峰值功率,在瓦级抽运功率下结合几米到几十米的光子晶体光纤就可以实现宽带超连续谱输出^[5~13],具有突出的应用优势,近年来取得了突破性的进展。2009年,Chen等^[8]采用基于增益开关半导体激光器种子源的百瓦级主振荡功率放大(MOPA)皮秒光纤激光器实现了输出功率为39 W超连续谱输出,光谱范围为0.40~2.25 μm 。2011年国防科技大学利用基于可饱和吸收体被动锁模皮秒光纤激光器的百瓦级皮秒光纤激光器^[9],实现了35.6 W全光纤化超连续谱输出^[10],并在此基础上进一步优化结构,使全光纤化超连续谱光源实现了70 W输出^[11],最近又报道其功率已提高到了177.6 W^[12],但其光谱范围主要位于红外波段。中国科学院西安光学精密机械研究所利用模式耦合技术,降低了高功率皮秒光纤激光器与光子晶体光纤的熔接损耗,实现了50 W高功率全光纤化超连续谱光源,输出光谱短波限扩展到了500 nm^[13]。纳秒激光抽运超连续谱的输出功率较低,研究也相对较少,主要原因是常用的基于调制半导体激光器和调Q技术的纳秒激光器重复频率一般比较低,为千赫兹量级,高功率放大后脉冲能量和峰值功率很高,易对系统内部造成较大的损伤,且非线性效应严重。

光子晶体光纤经拉锥处理后,其零色散点向短波方向移动,有利于短波超连续谱的产生。2004年,Saval等^[14]利用普通光纤的拉锥技术实现了对PCF的拉锥,并且利用Nd:YAG激光器倍频后首次在纤芯直径小于1 μm 的锥形PCF中产生了超连续谱,频谱扩展到紫外350 nm。2006年,Kudlinski等^[15]报道了纳秒和皮秒脉冲抽运不同长度的锥形PCF,产生了可扩展到紫外波段的超连续谱,当采用脉宽为3 ps、重复频率为51 MHz、中心波长为1064 nm的激光脉冲抽运时,光谱范围为372~1750 nm。2011年,本实验室利用1064 nm固体皮秒激光器抽运145 m长的锥形光子晶体光纤,产生了输出功率为

1.1 W、光谱范围为430~2020 nm的超连续谱^[16]。2012年又报道了500 m长锥光子晶体光纤的制备及其超连续谱的产生^[17]。

近年来由于光子晶体光纤和常规光纤的熔接耦合效率的提高,超连续谱光源逐步向全光纤化过渡,以增强其实际应用能力。本文对中心波长为1060 nm的半导体激光器进行调制,使其重复频率高达1.55 MHz,利用掺镱光纤对其进行主振荡功率放大(MOPA),实现了平均功率为18.2 W的纳秒激光输出,进而对145 m锥形光子晶体光纤进行全光纤耦合抽运,得到了输出功率为2.2 W的全光纤化超连续谱光源,在440~1700 nm的光谱可测范围内光谱平坦度为15 dB。

2 高功率纳秒光纤激光器

2.1 纳秒半导体激光器种子源

纳秒脉冲放大后所得到激光脉冲峰值功率及单脉冲能量都非常高,容易引起强烈的非线性效应和系统内部及端面损伤,限制放大器的平均功率放大水平。为了提高MOPA后的纳秒脉冲输出功率,需要采用高重复频率脉冲输出。对中心波长为1060 nm的电路调制半导体激光器进行全光纤化光学外调制,使输出激光脉冲重复频率高达1.55 MHz;输出光脉冲上升沿、下降沿小于10 ns;脉冲宽度在11~100 ns之间可调;输出激光平均功率随着重复频率及脉冲宽度的增大而增大,在0.5~4.0 mW之间;脉冲峰值功率约为0.5 W。实验中将纳秒激光器种子源重复频率调到最大(1.55 MHz),脉宽为11 ns,输出功率为3 mW。输出激光脉冲序列及光谱如图1所示,中心波长为1060.14 nm,谱宽(半峰全

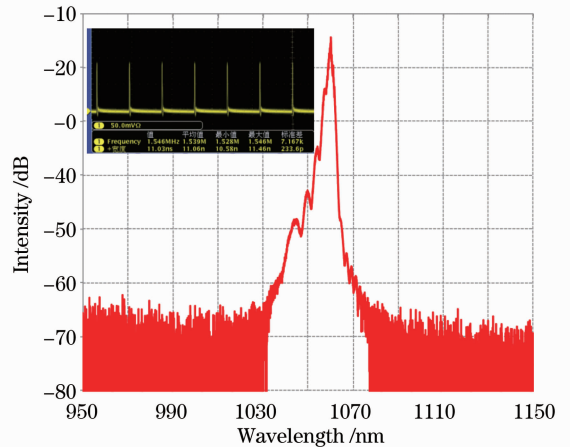


图1 纳秒激光器种子源输出光谱及脉冲序列
Fig. 1 Output spectrum and pulse train of the nanosecond seed laser

宽)为 0.63 nm。

2.2 纳秒种子源的放大

利用此纳秒半导体激光器作为种子源进行三级

放大,前两级为预放大,第三级为功率放大,实现高功率的纳秒激光输出,实验装置图如图 2 所示。

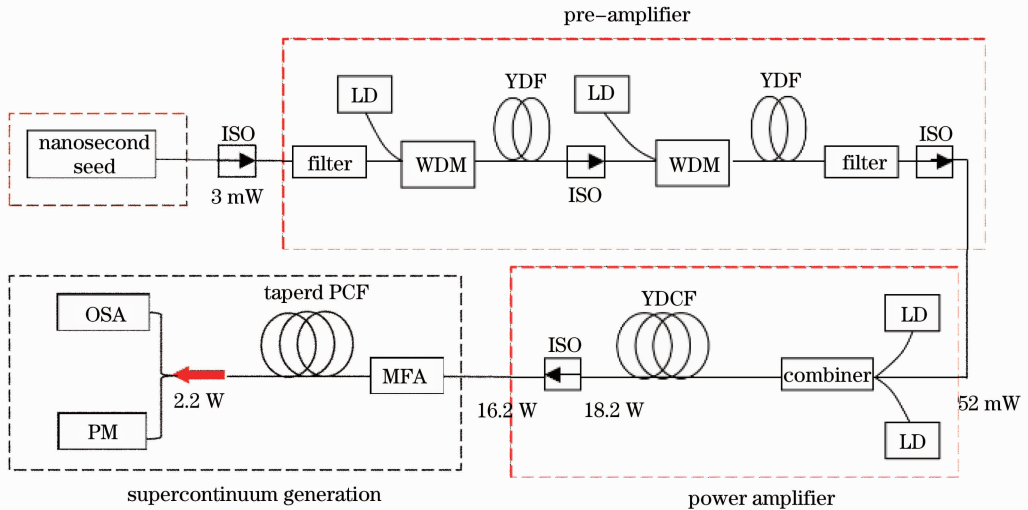


图 2 高功率纳秒光纤激光器及超连续谱产生实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of high power nanosecond fiber laser and supercontinuum generation

纳秒种子源通过光纤隔离器 (ISO) 后耦合到一级预放大级,一级和二级预放大器中使用的掺 Yb 光纤 (YDF) 均为对 976 nm 抽运光、吸收系数为 250 dB/m 的 Yb 高掺杂单模光纤,以缩短腔长,减小非线性效应;抽运源采用 975 nm 单模半导体激光器 (LD),利用波分复用器 (WDM) 耦合到掺 Yb 光纤中。一级预放大、二级预放大及功率放大级之间都加入光纤隔离器以避免激光反馈对种子源及抽运源的损坏。预放大中的两个滤波器以消除预放大级中产生的放大的自发辐射 (ASE),并且稳定激光波长,为主放大级提供高质量的种子。

主放大采用大模场高吸收掺 Yb 双包层光纤 (YDCF),纤芯直径为 20 μm ,数值孔径为 0.08,内包层直径为 125 μm ,数值孔径为 0.46,光纤长度为 5 m。抽运源为两个 975 nm 大功率多模光纤输出半导体激光器,每个激光器最大输出功率为 18 W,利用 $(6+1) \times 1$ 光纤合束器耦合到双包层光纤中,耦合效率为 95%,信号光插入损耗为 0.41 dB。功率放大级输出端接入一个插入损耗为 0.55 dB 的高功率光纤隔离器进行输出。

利用自行研制的模场适配器 (MFA) 将输出光高效率地耦合到锥形 PCF 中,从而突现超连续谱的产生。激光脉冲利用 NEWPORT 818BB-31 快速光电探测器 (上升时间、下降时间小于 225 ps) 和 TEK MSO 4032 示波器 (350 MHz) 进行探测显示,其输出光谱利用 YOKOGAWA AQ6370 B (600 ~

1700 nm) 光谱仪 (OSA) 进行记录,输出功率用功率计 (PM) 测量。

2.3 实验结果

图 1 中可以看出,由于种子源中没有加入光纤光栅进行波长选择时稳定,所以输出光谱 40 dB 动态范围所对应的谱宽较宽,大于 20 nm。如果直接对其放大,放大后的激光脉冲在 1060 nm 中心波长的短波方向存在着大量的光谱成分,影响光谱质量,限制了应用。因此在预放大级及主放大级前各加入一个中心波长为 1064 nm、带宽为 10 nm 的滤波器进行波长选择,通过二级预放大,输出功率提高到 52 mW,同时实现了如图 3 所示的高质量激光光谱。

通过功率放大级,输出功率得到进一步的放大,图 4 为 52 mW 的种子注入下,功率放大级输出功率随入纤抽运功率变化的关系,在最大入纤功率为 32 W 时,输出功率达到 18.2 W,功率放大级的光-光转化效率为 56.9%,功率曲线保持良好的线性增长,没有出现功率饱和,接入插耗为 0.55 dB 的光纤隔离器后输出功率为 16.2 W。

图 4 右下角的脉冲序列为最大输出功率下激光脉冲的时域波形,仍保持了稳定的 1.55 MHz 高质量脉冲波形,激光脉宽为 11.81 ns。

图 5 为功率放大级输出功率为 0.2、7.8、18.2 W 时所对应的输出光谱,中心波长为 1060.6 nm,谱宽分别为 0.58、1.43、2.86 nm。随抽运功率的增加未出

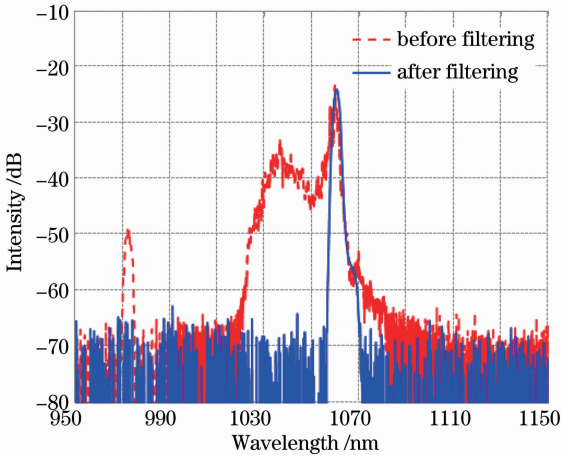


图 3 纳秒种子源直接放大与滤波放大后的激光光谱
Fig. 3 Spectra of the amplified nanosecond seed laser before and after filtering

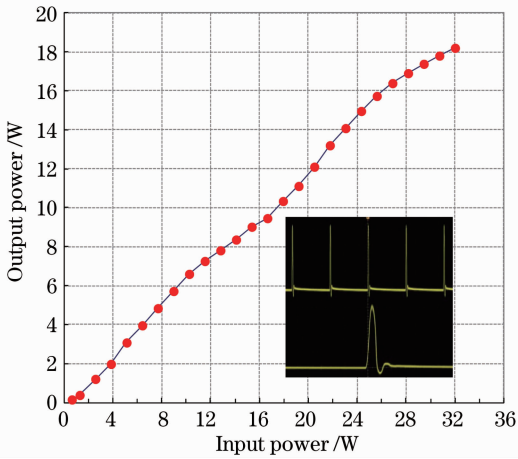


图 4 MOPA 纳秒光纤激光器输出功率特性
Fig. 4 Output power characteristics of MOPA nanosecond fiber laser

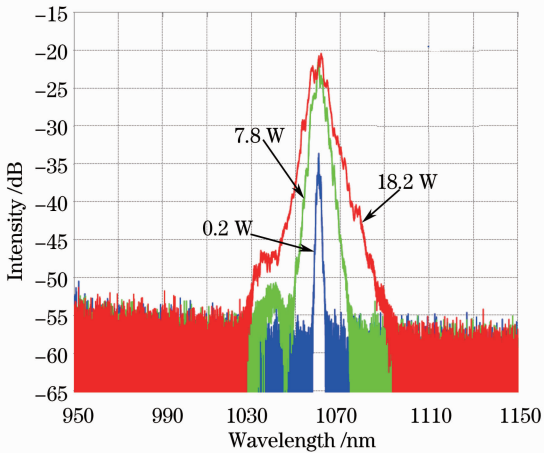


图 5 不同输出功率下纳秒光纤激光器输出光谱
Fig. 5 Output spectra of the nanosecond fiber laser at different output powers

现受激光曼散射谱线,说明高重复频率激光脉冲种子的采用降低了放大后的脉冲峰值功率,结合较短的高掺杂 Yb 双包层光纤很好地克服了通常功率放大级中的较强的非线性效应。但是随着抽运功率的增大,以 1060 nm 为中心的放大的自发辐射成分逐渐增大,30 dB 谱宽从最初的 7.2 nm 扩展到近 60 nm,这是由功率放大级注入的纳秒种子功率过小所导致的。

3 纳秒激光抽运下锥形光子晶体光纤中超连续谱的产生

所用的锥形光子晶体光纤长度为 145 m,沿着光纤长度的方向光纤直径从 110 μm 下降到 80 μm 。通过截断法进行测量,锥形光纤在 1060 nm 处的吸收损耗为 52 dB/km,1380 nm 处水峰吸收为 188 dB/km,如图 6 所示。图 6 也给出了光纤两端面的扫描电镜图,左图是锥形的入口端面,右图为锥形的出口端面。光纤纤芯并非标准的圆形,输入端纤芯的快轴直径为 4.5 μm ,慢轴直径为 5.6 μm ;输出端对应的纤芯尺寸分别为 3.35 μm 和 4.13 μm 。利用有限元法进行计算得出锥形光纤的零色散点从光纤入口处的 1000 nm 下降到出口处的 915 nm[1064 nm 抽运波长对应的色散系数从 14.7 ps/(nm·km)增加到 40.5 ps/(nm·km)];锥形光纤在抽运波长处的非线性系数从入口处的 15 $\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 提高到出口处的 27 $\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ [16]。

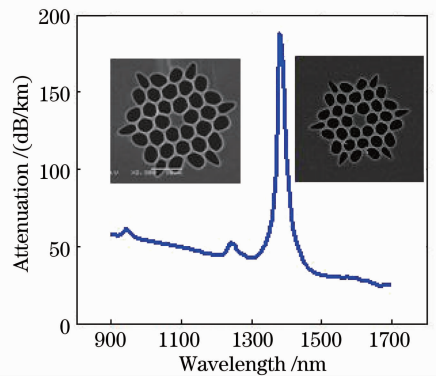


图 6 锥形 PCF 端面及损耗图
Fig. 6 End faces and the loss of the tapered PCF

由于高功率纳秒光纤激光器输出光纤的芯径为 20 μm ,与用于产生超连续谱的光子晶体光纤芯径相差悬殊,若直接熔接耦合,效率很低,采用自行研制的模场适配器实现双包层光纤到光子晶体光纤的高效率耦合,最大入纤功率为 8.6 W,耦合效率为 53.0%。由于用于纳秒放大的掺 Yb 双包层光纤不是严格的单模输出,含有高阶模能量,限制了其耦

合效率。采用两个光谱仪对产生的超连续谱分别进行测量,长波采用型号 YOKOGAWA AQ6370 B (600~1700 nm) 光谱仪,短波采用 YOKOGAWA AQ6373(350~1200 nm) 光谱仪。

随着耦合到光子晶体光纤中的抽运功率的增大,输出光谱逐渐展宽,形成超连续谱。图 7 为不同抽运功率下,输出超连续谱的光谱演化。由于光谱仪探测范围的限制,长波方向只能探测到 1700 nm。从图 7 中可以看出,随着抽运功率的增大,超连续谱光谱不断扩展,在最大的抽运功率下,最短波长达到了 440 nm。对于常规光子晶体光纤,利用 1060 nm 皮秒/纳秒激光在其零色散点处抽运时,受到光纤波导及散射损耗的影响,超连续谱最大波长限制到 2200 nm,进而限制了所对应的相位匹配四波混频过程中更短波长的产生,通常超连续谱短波方向难以突破 525 nm^[18]。从实验中可以看出通过锥形光纤色散渐减的特性可以实现更短波长超连续谱的产生。

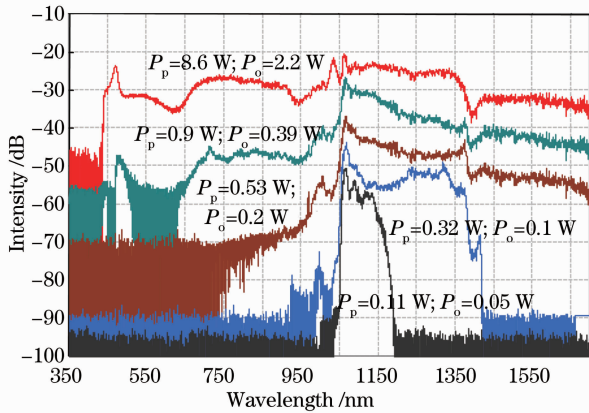


图 7 不同抽运功率下锥形 PCF 产生超连续谱演化图 (P_p 和 P_o 分别为抽运功率和输出功率)

Fig. 7 Evolution of supercontinuum in tapered PCF at different pumping powers (P_p and P_o represent the pump power and the output power, respectively)

对锥形光子晶体光纤两端的群折射率匹配条件进行了计算,输入端对应的短波和长波匹配波长是 505 nm 和 2050 nm,输出端对应的是 440 nm 和 2050 nm^[16],短波限接近实验值,也进一步证实了锥形光纤在短波超连续谱产生中的作用。

图 8 为超连续谱输出功率与入纤功率的关系曲线,在最大抽运功率下实现了输出功率为 2.2 W 的超连续谱,光-光转化效率为 25.6%。在输出功率大于 1.5 W 以后转化效率明显降低,主要是由于所用的锥形光子晶体光纤过长(140 m),且该光纤吸收损耗比较大,引起了较大损耗所导致的。

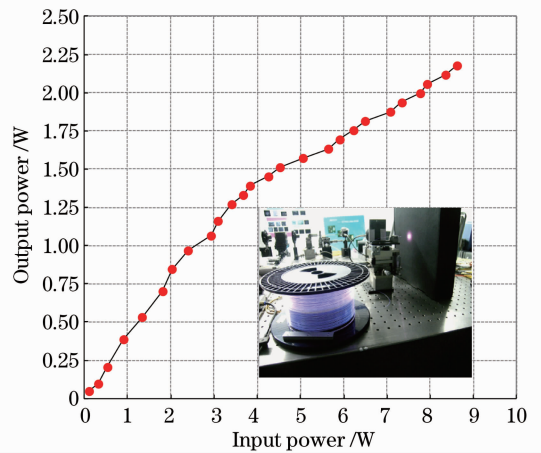


图 8 锥形 PCF 超连续谱输出功率曲线
Fig. 8 Output power of the supercontinuum versus the input power

另外,对纳秒激光抽运锥形光子晶体光纤中超连续谱的产生机理进行了分析,在锥形光纤的输入端,激光脉冲位于靠近光纤零色散点的反常色散区,通过调制不稳定性产生了拉曼孤子,并利用孤子自频移向长波方向进行波长扩展。随着抽运功率的增加,高能孤子将能量以色散波的形式转移到正常色散区;并且产生的色散波与长波高能孤子通过交叉相位调制和四波混频非线性效应相互作用,使色散波波长向更短波长方向移动。长波孤子通过不断红移,减小群速度,仍然可以和蓝移色散波的群速度匹配,继续进行非线性作用,通过“孤子捕获过程”使色散波实现持续蓝移。而随着孤子及色散波在锥形光纤中的传输,由于光纤的零色散点逐渐减小,根据群速度匹配条件,长波孤子所对应的色散波波长也逐渐减小,可使色散波向更短波长扩展,“孤子捕获”过程持续进行到长波孤子自频移的截止^[4,18]。这样截止到 2200 nm 的长波孤子对应的短波色散波扩展到了 440 nm,最终实现了带宽超过 1700 nm 的白光超连续谱,在整个光谱可探测范围内都具有 15 dB 的光谱平坦度。

4 结 论

对半导体激光器进行调制实现了重复频率为 1.55 MHz、中心波长为 1060.14 nm、脉宽为 11 ns、谱宽为 0.63 nm 的纳秒脉冲输出。将其作为种子源,利用 MOPA 结构对其进行二级预防大及一级功率放大实现了 18.2 W 的纳秒光纤激光器。利用此纳秒光纤激光器抽运锥形光子晶体光纤,实现了 440~1700 nm 范围内具有 15 dB 光谱平坦度的

2.2 W超连续谱输出。实验进一步证实了脉冲抽运条件下,锥形光子晶体光纤由于零色散点渐减特性在短波超连续谱产生方面的优势。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 J. C. Travers, R. E. Kennedy, S. V. Popov *et al.*. Extended continuous-wave supercontinuum generation in a low-water-loss holey fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(15): 1938~1940
- 3 J. C. Travers, A. B. Rulkov, B. A. Cumberland *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
- 4 B. A. Cumberland, J. C. Travers, S. V. Popov *et al.*. Toward visible CW-pumped supercontinua [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18): 2122~2124
- 5 Sun Tingting, Wang Zhi, Li Chuanqi. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by using quasi-continuous pump[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 154~159
孙婷婷, 王志, 李传起. 准连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱[J]. *中国激光*, 2010, **36**(1): 154~159
- 6 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1943~1949
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): 1943~1949
- 7 Chen Hongwei, Chen Shengping, Hou Jing. 4.6 W all fiber supercontinuum generation using homemade photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2541~2543
谌鸿伟, 陈胜平, 侯静. 国产光子晶体光纤实现4.6 W全光纤超连续谱输出[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2541~2543
- 8 K. K. Chen, S. Alam, J. H. V. Price *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5426~5432
- 9 S. Chen, H. Chen, J. Hou *et al.*. 100 W all fiber picosecond MOPA laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 24008~24012
- 10 H. Chen, S. Chen, J. Wang *et al.*. 35 W high power all fiber supercontinuum generation in PCF with picoseconds MOPA laser [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(12): 5484~5487
- 11 Song Rui, Chen Shengping, Hou Jing *et al.*. All-fiber 70 W supercontinuum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 569~570
宋锐, 陈胜平, 侯静等. 70 W全光纤超连续谱光源[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 569~570
- 12 Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping *et al.*. All-fiber 177.6 W supercontinuum source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(5): 054217
宋锐, 侯静, 陈胜平等. 177.6 W全光纤超连续谱光源[J]. *物理学报*, 2012, **61**(5): 054217
- 13 X. Hu, W. Zhang, Z. Yang *et al.*. High average power, strictly all-fiber supercontinuum source with good beam quality[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(14): 2659~2661
- 14 S. Leon-Saval, T. Birks, W. Wadsworth *et al.*. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13): 2864~2869
- 15 A. Kudlinski, A. K. George, J. C. Knight *et al.*. Zero-dispersion wavelength decreasing photonic crystal fibers for ultraviolet-extended supercontinuum generation [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5715~5722
- 16 P. Yan, H. Wei, S. Ruan *et al.*. Fabrication of a 145-m long microstructured optical fiber taper and its supercontinuum generation[J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(10): 105003
- 17 P. Yan, H. Wei, S. Ruan *et al.*. Fabrication and characteristic of long photonic crystal fiber taper[C]. *SPIE*, **8240**: 82401R
- 18 J. M. Dudley, J. R. Taylor. Supercontinuum Generation in Optical Fibers [M]. New York: Cambridge University Press, 2010. 119~137

栏目编辑: 王晓琰