

文章编号: 0258-7025(2010)08-1943-07

30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生

陈胜平 湛鸿伟 侯 静 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 采用三级主振荡功率放大(MOPA)结构,建立了一台平均输出功率 30 W 的皮秒脉冲掺镱光纤激光器。其输出尾纤芯径为 30 μm ,输出激光脉宽约 20 ps,重复频率为 59.8 MHz,光束质量因子 M^2 小于 1.5。将该高功率脉冲激光耦合到芯径 7 μm 的国产光子晶体光纤(PCF)中,实现了近 3 W 的超连续谱输出。为了增加耦合效率并避免光纤端面损伤,在皮秒激光源与光子晶体光纤之间加上一段芯径 15 μm 的过渡光纤,得到的输出超连续谱具有很好的平坦性。-10 dB 谱宽超过 1100 nm(其中 1064 nm 处残留的激光峰除外),超出所用光谱仪 600~1700 nm 的观测范围。输出光斑为一带有六角形彩色包络的白色基模光斑。

关键词 激光器;光纤光学;放大器;皮秒脉冲;高功率;超连续谱;光子晶体光纤

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.1943

30 W Picosecond Pulsed Fiber Laser and High Power Supercontinuum Generation

Chen Shengping Chen Hongwei Hou Jing Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A picosecond ytterbium-doped fiber laser with average power of 30 W is constructed with a tri-stage master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. The laser exhibits a pulse width of 20 ps, repetition rate of 59.8 MHz, and a beam quality M^2 of less than 1.5. The diameter of the output fiber core is 30 μm . By using the laser as a pump source, near 3 W supercontinuum is generated from a section of homemade photonic crystal fiber (PCF) with 7 μm core diameter. An extra section of fiber with 15 μm core diameter is arranged between the picosecond laser source and the PCF so as to increase the coupling efficiency and avoid fiber facet damage. The supercontinuum covers the whole spectral range from 600 to 1700 nm of the optical spectrum analyzer. The unflatness of the spectrum is less than 10 dB (except for the residual pump laser peak at 1064 nm). The output beam spot is a white fundamental mode with a chromatic hexagonal surrounding.

Key words lasers; fiber optics; amplifier; picosecond pulse; high power; supercontinuum; photonic crystal fiber

1 引 言

伴随着半导体制造技术和大模面积(LMA)双包层光纤制作技术的成熟,光纤激光器的输出功率已从 20 世纪 90 年代末的数十瓦提升至目前的上万瓦,且保持基横模运转,显示出强大的竞争力^[1]。但受到非线性效应的限制,超短脉冲光纤激光器的输出功率还停留在百瓦级的水平^[2~8]。由于高平均功率、高光束质量的短脉冲光纤激光器在工业加工、基

础科学研究等领域具有重要的应用价值,如何提高短脉冲光纤激光器的平均功率成为目前光纤激光领域的研究热点之一,受到了广泛关注。常用的提高超短脉冲光纤激光器平均输出功率的方法主要有以下几种:1)改变光纤参数以提高非线性效应的阈值,这是最为直接的一种方式,但是,受光纤制作工艺和模式的双重限制,不能无限增大输出功率;2)改变激光脉冲的参数以降低其峰值功率,即提高激光器的

收稿日期: 2009-10-29; 收到修改稿日期: 2009-12-25

基金项目: 中国博士后科学基金(第 43 批面上—等资助,首批特别资助)和国家自然科学基金(10904173)资助课题。

作者简介: 陈胜平(1979—),男,博士后,主要从事光纤激光器、放大器及光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: chensp@nudt.edu.cn

重复频率或利用啁啾放大技术;3)通过光谱、时域合成的方式提高其输出功率^[9]。目前,见于报道的全光纤结构皮秒脉冲激光器依旧停留在比较低的输出功率水平上^[10~12]。

高功率超连续谱光源在通信、光谱分析、检测等许多领域具有重要应用价值。光子晶体光纤(PCF)由于具有良好的光束约束能力和极好的色散控制能力,成为产生超连续谱的理想介质^[13~16]。目前国际上报道的最高功率超连续谱光源即是采用连续光抽运^[17],输出功率达 50 W。不过,连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱较难得到理想的谱宽和平坦度,且所需的光子晶体光纤长度较长。相对而言,超短脉冲激光(飞秒或皮秒)由于具有比较高的峰值功率,用作抽运源时,只需较短的光纤即可得到比较理想的谱宽和平坦度。但由于超短脉冲激光器自身的平均输出功率较难提高,由其抽运得到的超连续谱功率还比较低^[18~23]。

本文报道了一种自行研制的 30 W 全光纤皮秒脉冲激光器,并对国产光子晶体光纤进行抽运,得到了近 3 W 超连续谱输出,输出光谱的 -10 dB 谱

宽超过 1100 nm(1064 nm 处残留的激光峰除外)。

2 皮秒脉冲光纤激光器

2.1 实验结构

皮秒脉冲光纤激光器的实验结构如图 1 所示,整个激光器的结构是在前期工作^[12]基础上经过改进得到的。为了在得到足够增益的同时尽量缩短种子源腔长,实验中选取只有约 32 cm 长的掺镱光纤(YDF)作为增益介质,并尽量减小非掺杂光纤的长度,以此提高锁模脉冲重复频率,在一定程度上降低激光器的峰值功率,减小非线性效应。采用了较低反射率(约 10%)的光纤光栅(FBG)作为种子源的输出腔镜,以提高其平均输出功率,降低后续放大级的压力。将种子源的光纤固定在实验台上,并相对密封,避免环境因素对光纤扰动引起种子源输出不稳定。在放大级的设计上,采用了芯径较大、掺杂浓度较高的掺镱光纤作为增益介质,以此提高非线性效应的阈值。在激光器的输出端制作带斜角的光纤帽,在避免光纤端面反馈的同时将输出光斑扩展后再输出,避免输出端面因功率密度过高引起的激光损伤。

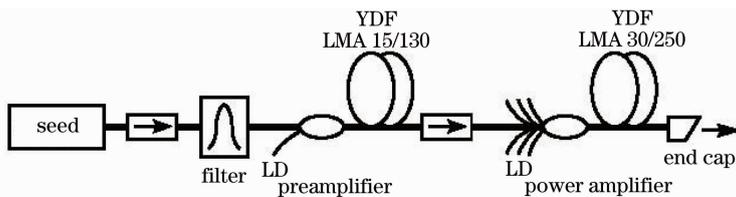


图 1 30 W 皮秒脉冲光纤激光器实验结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 30 W picosecond pulsed fiber laser

种子源是被动锁模的皮秒脉冲光纤激光器,由半导体可饱和吸收镜(SAM)和光纤光栅构成简单的线性谐振腔,其中所有光纤均是单模光纤,抽运源是一单模尾纤耦合输出的半导体激光器(LD)。种子光经隔离器和滤波器后进入一级放大器。一级放大器采用 5 m 长,芯径 15 μm ,内包层 130 μm 的掺镱光纤作为增益介质。放大后的光经由一光纤型高功率隔离器进入最后一级功率放大器中。功率放大级采用 3 m 长,芯径 30 μm ,内包层 250 μm 的掺镱双包层光纤作为增益介质,利用一个 $(6+1)\times 1$ 合束器将抽运光耦合进增益光纤中。

2.2 实验结果及讨论

前期工作中采用高反射率光纤光栅作为种子源输出腔镜时,得到的输出光谱中有一个凹陷^[12]。后续研究中发现,即使采用低反射率光栅作为输出腔镜,其输出光谱中也会有凹陷出现。但凹陷出现与否还与抽运功率的大小有关。在逐步增加抽运功率

达到锁模状态的初始阶段,光谱中没有凹陷产生。之后,随着抽运功率的逐渐增加,光谱逐渐变宽,在抽运功率达到一定值后,凹陷开始出现。随着抽运功率的继续增加,光谱继续变宽且凹陷变大,在一定抽运功率下,光谱又突然变窄,凹陷消失。在这一过程中,光谱变宽伴随着脉冲宽度的窄化,而凹陷消失则伴随着 Q 调制锁模现象的出现和脉冲分裂,在自相关迹上表现为出现两个峰。这是一个比较复杂的物理过程,目前正在进一步更详细的研究。在本文的研究工作中,为了得到稳定的锁模脉冲序列和尽可能高的输出功率,将抽运功率设定在凹陷消失前的最大功率处。这时得到的平均输出功率为 30 mW,输出波形如图 2(a)所示,重复频率为 59.8 MHz。采用商用自相关仪测得其脉冲自相关迹如图 2(b)所示,自相关迹半峰全宽为 19.8 ps,以 sech^2 波形计算可知,其脉冲宽度约为 13 ps。

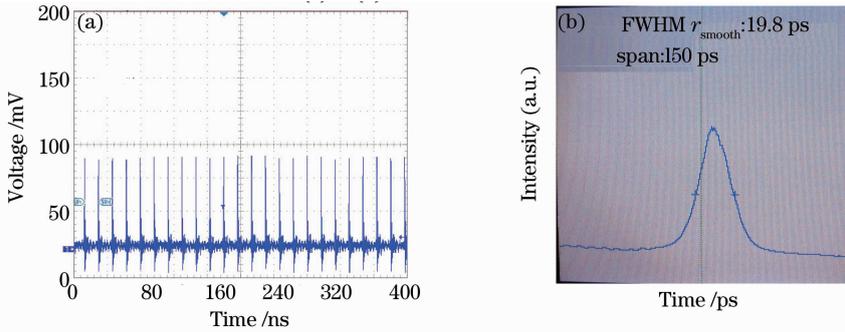


图 2 种子源输出特性。(a)时域特性;(b)自相关迹

Fig. 2 Output properties of the seed laser. (a) time domain response; (b) autocorrelation trace

30 mW 种子源经一级放大器后,输出功率特性如图 3(a)所示。输出功率随抽运功率的增加单调上升,没有明显的饱和效应,说明通过增加抽运功率可进一步提高其输出功率。但是,从图 3(b)的光谱图可以看出,抽运功率为 9.9 W 时即出现了明显的拉曼效应,在 1120 nm 附近产生一个拉曼峰;在抽

运功率增加到 13.6 W 时,1120 nm 附近的拉曼峰很快增长,在 1170 nm 附近还可观察到二级拉曼峰。为了给后级功率放大器提供较高质量的信号光,实验中将一级放大器的抽运功率设置在 6.7 W,此时其输出功率约为 2 W,脉冲宽度比种子源略有增加,增加的幅度小于 1 ps。

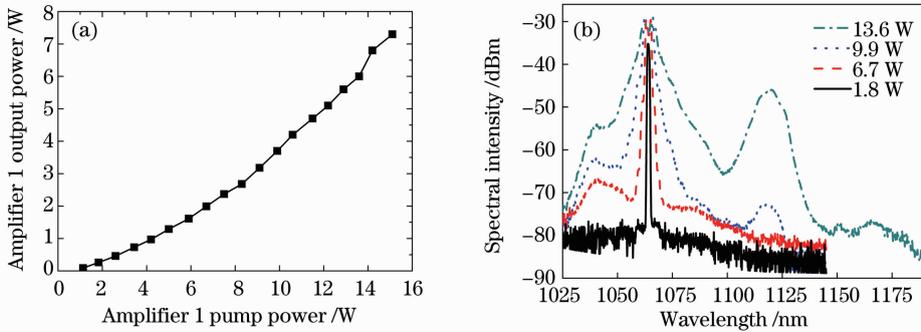


图 3 一级放大器输出特性。(a)输出功率随抽运功率的变化;(b)输出光谱随抽运功率的变化

Fig. 3 Output property of the preamplifier. (a) output power versus pumping power; (b) spectrum variation with pumping power

二级放大器输出特性见图 4。如图 4(a)所示,其输出功率随抽运功率的增加单调上升,没有出现明显的饱和或下降趋势,在 55 W 抽运功率下,得到 30 W 输出功率。考虑到种子源和一级放大器的抽运功率,可算出整个激光器的光光转换效率约为 48%。二级放大器输出光谱中有很明显的非线性效应,将光谱带宽扩展到比较大的范围,如图 4(b)所示。这说明,如果要继续提高输出功率,应该采取进一步抑制非线性效应的措施。如图 4(c)所示,二级放大器输出时域特性与种子源和一级放大器相比没有明显区别。不过,其脉冲宽度有显著增加,且自相关迹上出现微细结构,如图 4(d)所示。二级放大器输出脉冲的自相关迹半峰全宽为 30.3 ps,对应于脉冲宽度约为 20 ps。采用自制的散焦光栅 M^2 因子测量仪^[24]对输出激光光束质量进行测量,得到其光束质量因子 M^2 小于 1.5,输出光斑为一分布匀称的圆形光斑,可以判断该

激光器为基横模运转。

为了避免激光器中产生非线性效应,对于各级放大器,在设计时都尽量选取掺杂浓度高、吸收系数大的掺镱光纤,在保证足够增益的前提下尽量选取较短的光纤长度。不过,即使如此,由于皮秒脉冲高峰值功率特性,激光器输出功率仍然受限于各种非线性效应。从图 3(b)和图 4(b)中可以看出,一级放大器主要受限于受激拉曼散射效应,二级放大器主要受限于四波混频等其他非线性效应。产生这一差别的主要原因是一级放大器中光纤长度较长,二级放大器光纤较短但激光峰值功率较高。一级放大器中较长的光纤(包括增益光纤和无源器件尾纤)使得受激拉曼散射阈值较低,在比较低的输出功率下就出现了明显的受激拉曼散射。二级放大器光纤较短,且芯径较大,因而受激拉曼散射阈值较高,在比较高的输出功率下也没有出现受激拉曼散射,而是

出现了四波混频等其他非线性效应将光谱拓展到比较大的范围。光谱的拓宽导致脉冲宽度增加且自相关迹上出现微细结构,限制了输出功率的进一步提升。在最大 30 W 输出功率下,激光器中没有观察到热效应引起的性能下降,可以长时间运转。不过,在高功率下运转时,需要对激光器中的元器件进行冷却处理,特别是二级放大器中的合束器、双包层增益光纤以及双包层光纤之间的熔接点。实验过程中,为了保证各级放大器的安全,将每一级的放大倍

率都设定在比较小的数值上。为了避免种子功率不足引起各级放大器中产生自激振荡导致器件损坏,实验过程中没有详细研究种子光功率大小对最终输出激光的影响。不过,从各级放大器的功率特性曲线中可以看出,在抽运功率增加时,输出功率没有出现明显的饱和现象,说明 30 mW 种子功率足以驱动 2 W 的一级放大器,2 W 的种子功率足以驱动 30 W 的二级放大器。

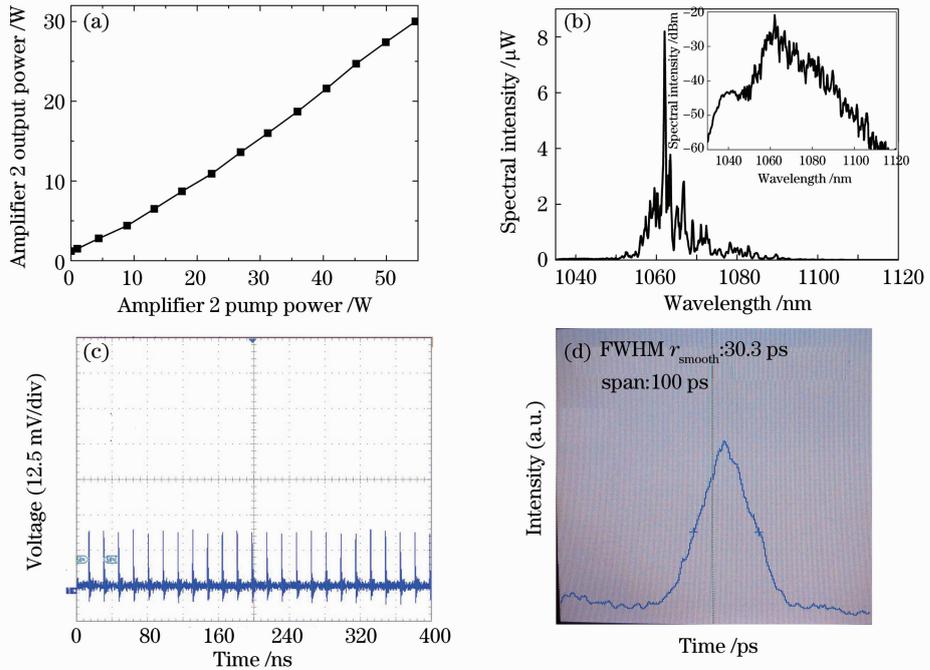


图 4 二级放大器输出特性。(a)输出功率特性;(b)最大抽运功率下的输出光谱,插图为对数坐标下的光谱图;(c)时域特性;(d)自相关迹

Fig. 4 Output properties of the power amplifier. (a) output power versus pumping power; (b) spectrum at the maximum pumping power. Inset is the logarithmically scaled spectrum; (c) time domain response; (d) autocorrelation trace

3 国产光子晶体光纤产生高功率平坦超连续谱

3.1 实验装置

产生超连续谱的实验装置如图 5 所示。抽运源是第 2 节所述 30 W 皮秒光纤激光器。所用光子晶体光纤长约 20 m,其参数与文献[23]中的光纤一样,空气孔呈六角形排布,芯径约 $7 \mu\text{m}$,零色散点在 1150 nm 附近。所用的抽运激光波长位于该光纤的正常色散区。需要注意的是,实验所用皮秒脉冲光纤激光器输出光纤芯径为 $30 \mu\text{m}$,而所用的光子晶体光纤芯径只有 $7 \mu\text{m}$,二者面积相差 18 倍,将激光器输出光直接耦合进光子晶体光纤不仅难度较大,还可能产生严重的光纤端面损坏。为此,在光子晶

体光纤与皮秒激光源之间加上一段芯径 $15 \mu\text{m}$ 的非掺杂过渡光纤。首先,将皮秒脉冲激光通过一组透镜耦合进芯径 $15 \mu\text{m}$ 的非掺杂光纤中,再通过熔接的方式将光耦合进光子晶体光纤中。由于过渡光纤芯径与光子晶体光纤芯径仍不匹配,熔接时需仔细寻找最佳放电强度、放电时间等参数,使得熔接后

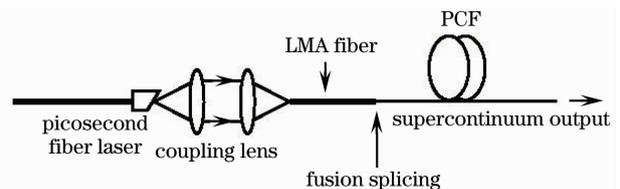


图 5 超连续谱产生实验装置示意图

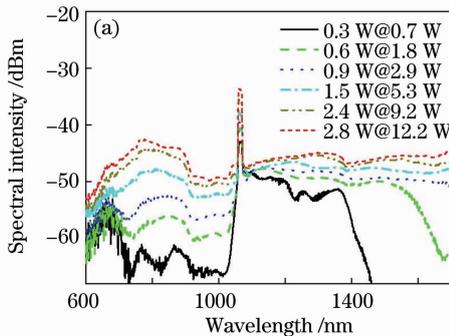
Fig. 5 Experimental setup for supercontinuum generation

在光子晶体光纤中产生轻微塌缩的空气孔, 形成平滑过渡区域, 才能尽量减小熔接损耗。

3.2 实验结果及讨论

通过对耦合系统的仔细调节, 能够将皮秒脉冲激光有效地耦合进光子晶体光纤中, 产生高功率超连续谱输出。不过, 由于该实验进行时受到实验条件的限制, 所选的耦合透镜组参数并未经过仔细优化, 因而得到的耦合效率并不高, 只有 40% 左右, 即只有约 12 W 激光耦合进过渡光纤中。考虑到过渡光纤与光子晶体光纤间的熔接损耗, 真正有效的抽运功率要低于 12 W。

图 6(a) 为不同功率下的超连续谱光谱图。从图中可以看出, 在低抽运功率下, 即超连续谱产生的初始阶段, 光谱展宽主要形成在激光波长的长波端。说明初始阶段展宽的机制以拉曼效应为主, 是由于抽运波长位于光纤的正常色散区且远离色散零点引起的, 与文献[23]的结果一致。在光谱拓展到反常色散区后, 在自相位调制、交叉相位调制、四波混频、



孤子分解等效应的共同作用下, 光谱同时向长波和短波两个方向拓展, 且越来越平坦。从图中最上面的光谱曲线可以看出, 在最高输出功率下, 光谱的 -10 dB 带宽 (1064 nm 处残留的激光峰除外) 覆盖了光谱仪 600 ~ 1700 nm 全部观测范围, 超过 1100 nm。输出光斑为一带有六角形彩色包络的白色基模光斑。

图 6(b) 为超连续谱输出功率随抽运功率的变化情况。图中横坐标为进入过渡光纤中的皮秒激光功率 (下文所述抽运功率均是指此功率值), 纵坐标为光子晶体光纤输出端产生的超连续谱功率。在抽运功率小于 10 W 时, 超连续谱功率随抽运功率单调上升。上升趋势接近线性但不是严格意义上的线性, 随抽运功率的增加其切线斜率略有下降。在 9 W 抽运功率下, 得到 2.4 W 输出功率。在抽运功率高于 10 W 时, 输出功率随抽运功率的增加呈明显非线性上升趋势, 而且功率稳定性变差。在 12 W 抽运功率下, 得到 2.8 W 输出功率。

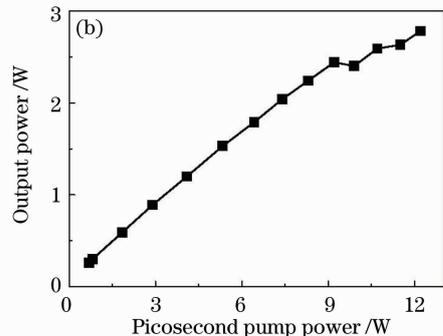


图 6 超连续谱输出特性。(a) 输出光谱随抽运功率的变化; (b) 输出功率随抽运功率的变化

Fig. 6 Output properties of the generated supercontinuum. (a) spectrum variation with pumping power; (b) output power versus pumping power

从光谱图 6(a) 中可以看出, 随着抽运功率的增加, 输出光谱同时向短波和长波两个方向拓展, 而且向长波方向拓展的速度更快, 说明拉曼效应在这一过程中占据主导地位。拉曼效应的产生由于具有量子亏损, 会附带较大的能量损失, 特别是高阶拉曼效应。这可以解释为什么随着抽运功率的增加输出功率特性曲线斜率略有下降。从功率特性曲线图 6(b) 中可以看出, 10 W 以上抽运功率下输出功率波动上升。而且, 实验中发现这时输出超连续谱功率稳定性变差, 即使抽运功率继续增加, 超连续谱输出功率也很难再有大幅度的上升。这一现象一方面是由于所用透镜耦合系统不太稳定引起, 另一方面也是更重要的一个因素, 是因为在实验过程中,

过渡光纤输入端面产生的反射光和光子晶体光纤中产生的后向传输光会有一部分进入皮秒激光器中。由于皮秒激光器最后一级输出没有采取隔离措施, 这一部分反馈光会进入掺杂光纤中被逐渐放大并消耗大量上能级粒子, 引起激光器不稳定, 最终导致输出超连续谱功率下降。这一现象在高功率下表现得尤为明显, 于是出现了图 6(b) 所示的情况。这说明如果要得到更高功率的超连续谱输出, 必须在激光输出端采取一定的隔离措施, 避免反馈光对激光器的影响, 或者采用全光纤的方案进行实验。

4 结 论

报道了一个三级 MOPA 结构的皮秒脉冲掺镱

光纤激光器,输出平均功率达 30 W,脉宽约 20 ps,重复频率为 59.8 MHz,光束质量因子 M^2 小于 1.5,光-光转换效率 48%。种子源输出脉冲经一级放大后略有展宽,经二级放大后有较大程度的展宽。高功率下输出光谱中有明显的非线性效应,说明要进一步提高输出功率需要采取相应的措施抑制非线性效应。这可以通过增大光纤芯径和减小光纤长度来实现,也可以通过进一步增加种子源的重复频率实现。

利用该激光器抽运一段国产光子晶体光纤,得到近 3 W 超连续谱输出,输出光谱覆盖了光谱仪 600~1700 nm 全部观测范围,不平坦度优于 10 dB (1064 nm 处残留的激光峰除外)。不过,抽运功率大于 10 W 时,超连续谱输出功率随抽运功率只有小幅上升,且不稳定。这一现象由空间耦合系统不稳定和反馈光导致抽运激光不稳定引起,限制了超连续谱的最终输出功率。

参 考 文 献

- 1 IPG Photonics. IPG Photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser [R]. <http://www.ipgphotonics.com/newsproduct.htm> (June 15, 2009)
- 2 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618
周寿桓,赵 鸿,唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618
- 3 Xue Yuhao, Zhou Jun, Lei Siyuan *et al.*. The research development of fiber-based high average power ultrashort pulse amplification [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(11): 28~34
薛宇豪,周 军,雷思远等. 高平均功率超短脉冲激光光纤放大研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(11): 28~34
- 4 Hu Shuling, Lü Fuyun, Dong Fajie *et al.*. The progress of ultrashort fiber laser[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(15): 571~576
胡姝玲,吕福云,董法杰等. 超短脉冲光纤激光器的研究进展[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(15): 571~576
- 5 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all photonic crystal fiber laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 811~814
刘博文,胡明列,宋有建等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 811~814
- 6 Li Yao, Zhu Chen, Wang Xiongfei *et al.*. Experimental study on hundred-watt output power high repetition rate narrow pulse duration fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 281~284
李 尧,朱 辰,王雄飞等. 百瓦级高重复频率窄脉宽光纤激光器实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 281~284
- 7 P. Dupriez, A. Piper, A. Malinowski *et al.*. High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9): 1013~1015
- 8 K. Chen, S. Alam, D. Lin *et al.*. 100 W, fiberised, linearly-polarized, picosecond ytterbium doped fiber MOPA [C]. *CLEO* 2009: cwk2
- 9 O. Schmidt, C. Wirth, I. Tsybin *et al.*. Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber-amplified, nanosecond-pulsed sources [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1567~1569
- 10 H. Liu, C. Gao, J. Tao *et al.*. Compact tunable high power picosecond source based on Yb-doped fiber amplification of gain switch laser diode [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7888~7893
- 11 Liu Yange, Zhang Chunshu, Sun Tingting *et al.*. Clad-pumped $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped short pulse fiber laser with high average power output exceeding 2 W [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9): 4679~4685
刘艳格,张春书,孙婷婷等. 输出平均功率大于 2 W 的高功率、包层抽运、超短脉冲钕镱共掺光纤激光器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4679~4685
- 12 Chen Shengping, Lin Dongfeng, Hou Jing *et al.*. Passively mode locked Yb-doped fiber laser with nearly 2 W average output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2817~2821
陈胜平,林东风,侯 静等. 平均功率近 2 W 的被动锁模皮秒掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2817~2821
- 13 P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 14 J. M. Dudley, Goery Genty, Stephane Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1135~1184
- 15 Li Rui, Hou Lantian, Liang Danhua *et al.*. Generation of supercontinuum and influence factors in photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(11): 42~47
李 蕊,侯蓝田,梁丹华等. 光子晶体光纤中超连续谱的形成及其影响因素[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(11): 42~47
- 16 S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt *et al.*. Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in a photonic crystal fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 753~764
- 17 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): 14436~14447
- 18 Jian Yaqing, Yan Peiguang, Lü Kecheng *et al.*. Experimental study and numerical analysis of femtosecond pulse propagation and supercontinuum generation in highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(4): 1809~1814
贾亚青,闫培光,吕可诚等. 高非线性光子晶体光纤中飞秒脉冲的传输特性和超连续谱产生机制的实验研究及模拟分析[J]. *物理学报*, 2006, **55**(4): 1809~1814
- 19 Wang Qiuguo, Zhang Hu, Zhang Xia *et al.*. Supercontinuum generation using 120 fs femtosecond pulse laser in a dispersion flattened photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 353~355
王秋国,张 虎,张 霞等. 飞秒脉冲在光子晶体光纤中的超连续谱产生[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 353~355
- 20 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*, 2009, **36**(1): 154~159
- 21 Zhang Hui, Guo Peng, Chang Shengjiang *et al.*. Supercontinuum spectra generation in the highly nonlinear liquid-core photonic-crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 134~138
张 会,郭 澎,常胜江等. 高非线性液芯光子晶体光纤中超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 134~138
- 22 Zhang Shiqiang, Li Xiao, Xu Xiaojun *et al.*. Experimental study of supercontinuum generation by hundred nanosecond pulse in highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 75~78
张世强,李 霄,许晓军等. 百纳秒激光脉冲在高非线性光子晶

- 体光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(s1): 75~78
- 23 Wang Yanbin, Hou Jing, Liang Dongming *et al.*. Study of supercontinuum generation in the normal-dispersion regime of photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1073~1077
王彦斌, 侯静, 梁冬明等. 光子晶体光纤正常色散区超连续谱产生的研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 1073~1077
- 24 Xi Fengjie. Design and Application Studies on the Curvature Sensor with a Grating[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008
习锋杰. 光栅型曲率传感器的设计与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008