

全光子晶体光纤单级直接放大产生 34 W 高功率 飞秒脉冲

石俊凯¹ 柴路^{1,2} 赵晓薇¹ 李江¹ 刘博文^{1,2} 胡明列^{1,2} 栗岩锋¹ 王清月¹

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 超快激光研究室, 天津 300072)
(² 天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 构建了全保偏双包层掺镱大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)的单级飞秒激光直接放大系统。光子晶体光纤(PCF)振荡级采用孤子型锁模运转,放大级采用非线性放大技术。该系统获得的高功率飞秒脉冲输出平均功率为 34 W,脉冲宽度约为 50 fs,重复频率为 42 MHz,对应脉冲能量为 0.8 μ J,峰值功率为 16.2 MW。

关键词 光纤光学;飞秒激光放大;非线性放大;自相位调制;高功率

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0202001

Generation of 34 W High Power Femtosecond Pulses by Single-Stage Direct Amplification in an All-Photonic-Crystal-Fiber Laser System

Shi Junkai¹ Chai Lu^{1,2} Zhao Xiaowei¹ Li Jiang¹ Liu Bowen^{1,2}
Hu Minglie^{1,2} Li Yanfeng¹ Wang Qingyue¹

¹ *Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Optoelectronics Information Technique,
Ministry of Education, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*

² *Key Laboratory of Micro-Opto-Electro-Mechanical System Technology, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*

Abstract A single-stage femtosecond laser direct amplification system with all polarization-maintaining, double-cladding, Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber (LMA-PCF) is constructed. The photonic crystal fiber (PCF) oscillator operates in soliton mode-locking regime, and the PCF amplifier is employed in nonlinear amplification. The all-PCF single-stage amplifier directly generates a high-average power of 34 W and a pulse width of 50 fs at the repetition rate of 42 MHz, corresponding to pulse energy of 0.8 μ J and peak power of 16.2 MW.

Key words fiber optics; femtosecond laser amplification; nonlinear amplification; self-phase modulation; high-power

OCIS codes 140.3280; 140.3510; 140.4050; 140.4480; 140.7090

1 引 言

普通光纤飞秒激光器具有良好的散热特性和稳定性,近二十年来得到了快速发展^[1]。相比于普通

增益光纤,光子晶体光纤(PCF)具有无截止单模和较大模场面积,既可以确保激光器的单模输出又能够降低激光在纤芯中的功率密度,减少非线性效应

收稿日期: 2013-08-19; **收到修改稿日期**: 2013-09-22

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327604,2011CB808101)、国家自然科学基金(61027013,61077083,60978022,60838015,61011120103,61211120193)、高等学校博士学科点专项基金(20090032110050)、“111 计划”(B07014)

作者简介: 石俊凯(1986—),男,博士研究生,主要从事光子晶体光纤激光器方面的研究。

E-mail: shijunkailove@126.com

导师简介: 柴路(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事飞秒激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: lu_chai@tju.edu.cn(通信联系人)

的积累;同时空气包层可以较大地提高了内包层的数值孔径,从而大大提高了激光二极管(LD)抽运的耦合效率,特别适合应用于高功率飞秒激光器。自增益型 PCF 诞生之日起,先后诞生了双包层大模面积(DC-LMA)、棒状(RT)和大空气孔间隔包层(LPF)等新型 PCF,并不断创造光纤飞秒激光系统输出功率和脉冲能量的新纪录^[2]。

啁啾脉冲放大(CPA)是光纤飞秒激光放大器采用的主要技术之一。2003年,Limpert等^[3]首次实现了一种全光纤的 CPA 飞秒激光放大器,获得了平均功率为 6 W,重复频率为 73 MHz,脉冲宽度为 100 fs,相应的峰值功率为 0.82 MW 的激光脉冲。随后放大级数的不断增加,2005年,Röser等^[4]使用两级 Yb-DC-LMA-PCF 放大的 CPA 系统,实现了平均功率为 131 W,重复频率为 73 MHz,脉冲宽度为 220 fs,对应的单脉冲能量为 1.8 μJ ,峰值功率为 8.2 MW 的输出。2009年,Eidam等^[5]采用 CPA 与非线性放大相结合的系统,获得平均功率高达 325 W,脉冲宽度为 375 fs,相应的峰值功率达到 22 MW,单脉冲能量为 8.2 μJ 的激光脉冲。2010年,Eidan等^[6]在前面两级放大系统的基础上,加入第三级放大,在水冷条件下,使具有微纳集束芯结构的 DC-LMA 光纤进行功率放大,最终获得平均功率为 830 W,脉宽为 640 fs,脉冲能量为 10.6 μJ 的输出,这是目前固体飞秒激光放大系统输出的最高平均功率记录。

上述 CPA 系统的振荡级多采用固体飞秒激光器,光纤或光栅对为展宽器,多级光纤放大需要多个抽运源,并随着放大级数的增加,需要相应的声光调制器(AOM)降低重复频率以提高脉冲能量^[7]和采用不能弯曲的棒状 PCF/LPF 做功率放大^[8];此外,工作在低非线性区域的掺 Yb 光纤 CPA 系统,输出脉冲宽度主要受限于放大器的增益带宽,一般掺 Yb 光纤放大器在 1030 nm 附近具有最大约为 20 nm 的增益带宽,所以通常输出脉冲宽度较宽(达百飞秒量级)。尽管可以采用“非线性压缩技术”先展宽脉冲的光谱,再进行啁啾补偿,可获得更窄光脉冲^[9],然而上述技术增加了激光系统的复杂性,提高了成本,引入了额外的损耗,使得其实用性和性价比比较低。

相比于光纤 CPA 技术,采用没有脉冲展宽器的“直接放大技术”具有更简单的结构,也是目前光纤飞秒激光放大的研究热点。其中“非线性放大”和“自相似放大”都属于“直接放大技术”,主要区别在于“非线性放大”过程中需要伴随自相位调制(SPM)效应对光谱的展宽效应;“自相似放大”过程

中时域脉冲需要经过足够长的增益光纤,在非线性、增益和正色散的作用下最终形成线性啁啾为主的抛物线型脉冲。这两种光纤放大技术在提高平均功率的同时展宽脉冲光谱,因此经过啁啾补偿技术可以获得比种子脉冲更窄的飞秒激光输出。

2002年,Limpert等^[10]采用固体飞秒激光器作为种子源,在 9 m 长的 Yb-DC-LMA 光纤中实现了自相似脉冲放大,获得平均功率为 10 W,脉冲宽度为 80 fs,重复频率为 79 MHz,对应脉冲能量为 136 nJ 和峰值功率为 1.7 MW 的输出。2006年,Schreiber等^[11]将自相似锁模光纤激光器输出的抛物线脉冲在两级掺 Yb 光纤中放大,输出平均功率为 21 W,脉冲宽度为 240 fs,重复频率为 17 MHz,对应脉冲能量为 1.25 μJ ,峰值功率为 5 MW。2007年,Papadopoulos等^[12]采用固体飞秒激光器作为种子源,在 6.5 m 长的 Yb-DC-LMA 光纤中实现了自相似脉冲放大,输出平均功率为 11.5 W,脉冲宽度为 63 fs,重复频率为 27 MHz,对应脉冲能量为 290 nJ,峰值功率为 4.1 MW。2008年,同组的 Zaouter等^[13]采用 10 MHz 的固体振荡器,采用棒状 PCF 进行功率放大,在不同压缩光栅参数的条件下,分别获得最窄脉冲宽度为 49 fs,平均功率为 8.7 W,对应峰值功率为 12.1 MW,以及最高输出功率为 12.5 W,脉冲宽度为 70 fs,对应脉冲能量为 1.25 μJ 和峰值功率为 16 MW 的激光脉冲。2009年,Deng等^[14]采用固体飞秒激光器作为种子源,在 6 m 长的 Yb-DC-LMA 光纤中实现了自相似脉冲放大,输出平均功率为 18 W,脉冲宽度为 48 fs,对应脉冲能量为 226 nJ 和峰值功率为 4.3 MW。2011年,Saraceno等^[15]采用重复频率 10.6 MHz 的固体飞秒激光器作为种子源,在一级 0.36 m 长、芯径/内包层直径为 100 μm /285 μm 的保偏掺 Yb 棒状 PCF 中进行非线性放大,获得了平均功率为 34 W,脉冲宽度为 65 fs,对应脉冲能量为 3.2 μJ 和峰值功率为 32 MW 的输出。

本实验室于 2007 年首次用国产 Yb-DC-LMA-PCF 实现了对固体飞秒振荡器输出的种子脉冲的直接放大实验^[16]。2008年,构建了全 PCF 的单级非线性放大系统,获得了平均功率为 16 W,重复频率为 50 MHz,单脉冲能量为 320 nJ,压缩后脉冲宽度为 85 fs 的输出^[17];随后通过系统优化将脉冲宽度缩短至 39 fs^[18]。2010年,通过声光调制器(AOM)降低重复频率到 1 MHz,又获得了脉冲宽度为 124 fs,脉冲能量为 1.56 μJ ,峰值功率为

12.6 MW 的输出^[19]。2011 年,通过光栅对和 Gires-Tournois(G-T)镜结合的“矢量色散补偿”对 50 MHz 高重复频率的全 PCF 的单级非线性放大系统中的高阶啁啾进行补偿,获得了平均功率为 26.6 W,脉冲宽度为 44 fs,对应脉冲能量为 531 nJ 和峰值功率为 10.8 MW 的飞秒脉冲^[20]。

本文旨在采用最简单的全 PCF 单级非线性放大结构,没有采用 AOM 降低重复频率和非线性色散补偿装置,在 42 MHz 重复频率下实现了平均功率为 34 W,脉冲宽度约为 50 fs,对应脉冲能量为 0.8 μ J 和峰值功率为 16.2 MW 的输出。

2 实验装置

实验上搭建的全 PCF 单级飞秒激光放大系统如图 1 所示,上部为振荡级,下部为放大级。其中,振荡级和放大级采用的光纤同为 Crystal Fiber 公司生产的保偏 Yb-DC-LMA-PCF,模场直径为 29 μ m,对应 660 μ m² 的模场面积,数值孔径为 0.03。通过在光纤内包层中引入应力双折射材料构成保偏结构。为防止在实验过程中形成自激,影响激光系统运转,将光纤两个端面塌陷后研磨成 8°斜角。

振荡级中,抽运源为 n-light 公司生产的 LD,中心波长为 976 nm,最大输出功率为 20 W,耦合输出光纤纤芯直径为 200 μ m,数值孔径为 0.22。抽运光经过两个焦距为 11 mm 的非球面镜(AL)组成的透镜系统进行准直和聚焦,耦合进长度为 1.8 m 的增益光纤中。经增益光纤输出的激光再由焦距为 18 mm 的 AL 准直,分别经过两个双色镜(DM)反射把残余抽运光滤掉。为了提高种子光的偏振性,使用半波片(HWP)和偏振分束镜(PBS)检偏,并由第二个 HWP 和 PBS 调节输出比率,一般选择输出比率在 90%左右。未输出的 10%的激光经过一个 AL 聚焦到半导体可饱和吸收镜(SESAM)上,经其调制实现锁模运转。这样既能最大限度地导出腔内功率,又能把 SESAM 上的平均功率控制在比较低的水平,有效避免对 SESAM 的热损伤。实验中采用 SESAM 的吸收率为 66%,调制深度为 36%,弛豫时间为 500 fs。在增益光纤的抽运端,激光经过 DM 反射和一个 HWP 调整偏振方向后,进入由两个 600 line/mm 光栅(GR)组成的光栅对,并通过双通结构来调整振荡级腔内的色散。振荡级的腔长约为 3.6 m,获得的锁模脉冲序列重复频率为 42 MHz。

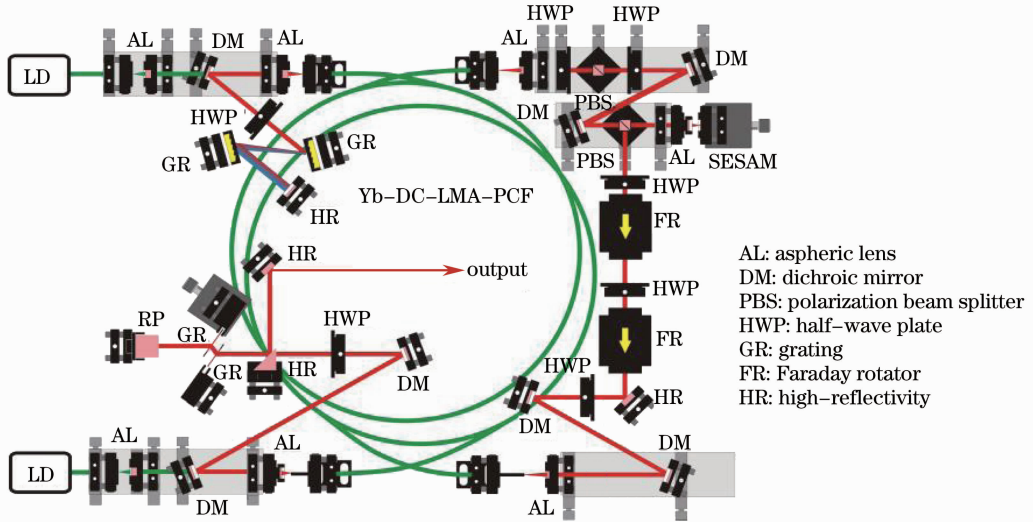


图 1 紧凑型全 PCF 飞秒激光放大器

Fig. 1 Compact all PCF femtosecond laser amplifier

为了防止放大级的反馈光回到振荡级破坏锁模,在振荡级和放大级之间插入两个隔离器(FR),其总透射率为 80%,隔离度大于 60 dB。经过 FR 的种子光再经过两个 DM 去掉残余的抽运光,最后由焦距为 18 mm 的 AL 聚焦到放大级增益光纤的非抽运端,其前面的 HWP 是为了匹配种子光与放大级增益光纤的偏振态。放大级中,抽运源为 Dilas

公司生产的高功率 LD,中心波长为 976 nm,最大输出功率为 100 W,耦合输出光纤纤芯直径为 200 μ m,数值孔径为 0.22。抽运光经过两个焦距分别为 11 mm 和 8 mm 的 AL 组成的透镜系统进行准直和聚焦,耦合进长度为 3.2 m 的增益光纤中,这种背向抽运方式可以得到较高的信噪比(SNR)。经放大后输出的激光脉冲,再由一对平行放置的

1200 line/mm的透射光栅构成的双通方式压缩机, 补偿激光脉冲在增益光纤中积累的啁啾, 以得到最窄的输出脉冲。同样, 压缩机前的 HWP 也是为了使入射脉冲偏振与光栅刻线同向, 以达到最佳耦合状态。

实验中的参数测量采用功率计 (Coherent, Field Mate) 测量激光功率, 光谱仪 (ANDO, AQ6315A) 记录光谱; 脉冲宽度由 APE 公司的自相关仪 (PulseCheck) 测得; 锁模脉冲序列和稳定性采用快响应光电二极管与 Iwatsu 公司的模拟示波器 (SS-7840A) 和频谱分析仪 (Agilent 8560EC) 结合进行监测。

3 实验结果

振荡级中所用增益 PCF 的材料色散为 $0.019 \text{ ps}^2/\text{m}$, 产生的总正材料色散量为 $0.0342 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。腔内采用镀金的衍射光栅对构成腔内色散图, 可以实现在正色散、负色散和近零色散域的锁模运转。由于在负色散域的孤子锁模, 其输出具有较宽的光谱和较窄的脉冲, 非线性啁啾积累少, 而且运转最稳定, 因此最适合作为放大系统的种子源。所以通过调节振荡级腔内光栅对的距离, 使得振荡级工作在负色散锁模区域。振荡级内光栅对的人射角为 20° , 每毫米产生的负色散为 -0.00164 ps^2 , 则设定光栅对距离为 103 mm , 能够产生的色散为 -0.1689 ps^2 , 使之维持在负色散域。振荡级的运转状态如图 2 所示, 图 2 点其中方点、圆点、三角点分别表示调 Q、单脉冲锁模和双脉冲锁模三种运行状态。抽运激光阈值为 3.41 W , 初始为调 Q 状态; 抽运锁模阈值为 3.83 W 。随着抽运功率增加, 输出脉宽和谱宽随之增加, 当抽运功率为 5.31 W 时进入双脉冲状态。实验中选择振荡级工作参数: 抽运功率为 4.53 W , 输出飞秒脉冲重复频率为 42 MHz , 平均输出功率 125 mW , 脉冲宽度为

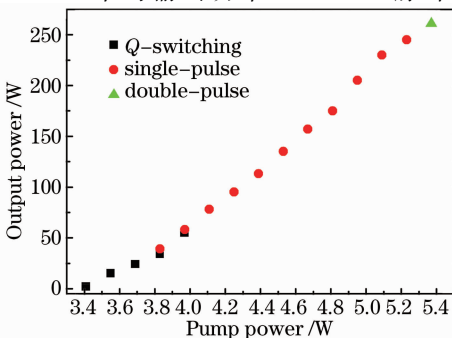


图 2 振荡级的运转动力学

Fig. 2 Operation dynamics of oscillating stage

704 fs , 中心波长为 1044 nm , 光谱宽度约为 3 nm 。

振荡级输出的种子脉冲经过两个 FR 后平均功率降为 90 mW 。在放大过程中, 种子脉冲在 PCF 中获得增益, 同时还由 SPM 效应展宽光谱, 最后经过光栅对进行啁啾补偿后可以获得比种子脉冲更窄的脉冲。PCF 单级放大级的输入-输出关系如图 3 所示, 图中曲线反映了放大过程中脉冲宽度和输出功率随抽运功率增加的动力学过程。从输入-输出关系曲线看, 随着抽运功率增加, 激光输出功率单调线性上升, 在 70 W 抽运功率下输出功率达到 34 W , 斜效率为 48% ; 为保护光纤, 没有再继续增加抽运功率。从脉冲宽度的演变规律看, 经过放大后再压缩的脉冲宽度明显比种子脉冲窄, 当放大级抽运功率为 10 W 时, 输出的脉冲宽度仅为 134 fs ; 在抽运功率为 $10 \sim 40 \text{ W}$ 的变化范围内, 脉冲宽度急剧变窄, 从 134 fs 降到 54 fs ; 当抽运功率增加超过 40 W 后, 脉冲宽度变化趋于平稳, 在 60 W 抽运功率下获得最窄 46 fs 的脉冲 (输出平均功率 28 W), 在 70 W 抽运功率下, 输出功率脉冲宽度稍微加宽到 50 fs (输出平均功率 34 W)。

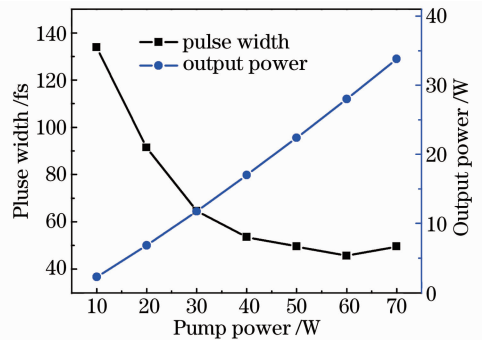


图 3 放大的脉冲宽度与输出功率随抽运功率的关系曲线

Fig. 3 Amplified pulse width and output power as functions of the pump power

放大脉冲的动力学过程可以解释如下: 在非线性放大过程中, 随着抽运功率的增加, 增益 PCF 中 SPM 效应逐渐增强, 使得放大脉冲的光谱被不断展宽, 并在相对较长光纤中正色散的作用下使脉冲中部的啁啾逐渐线性化, 经光栅对压缩后可以得到更大的压缩比。实验中测量的光谱演变过程如图 4 所示。当抽运功率从 10 W 增大到 50 W 时, 放大脉冲的光谱宽度主要是在 SPM 效应作用下逐渐加宽; 但是当抽运功率增加超过 50 W 以后, 由于增益光谱的限制, 激光光谱不再继续展宽, 经光栅对压缩后的脉冲宽度变化也趋于平缓, 抽运功率大约在 60 W 处脉冲宽度达到

最小值。图 5 为测量放大脉冲在抽运功率分别为 50、60、70 W 时的脉冲宽度相关曲线，其中插图为其相关曲线半峰全宽局部放大图。可以看到，在抽运功率为 60 W 的情况下，脉冲宽度最窄，基底最小。但继续增加抽运功率到 70 W 时，脉冲的基底明显抬高，这是由于来自非线性效应 (SPM 和拉曼效应) 中的高阶啁啾积累的结果，可以采用“矢量啁啾补偿法”^[20] 进一步改善。图 6 为在最高抽运功率 70 W 下测得的激光系统输出的脉冲序列 (见插图) 和一次谐波的功率谱图。高功率输出脉冲的重复频率为 42 MHz，噪声抑制比为 65 dB。

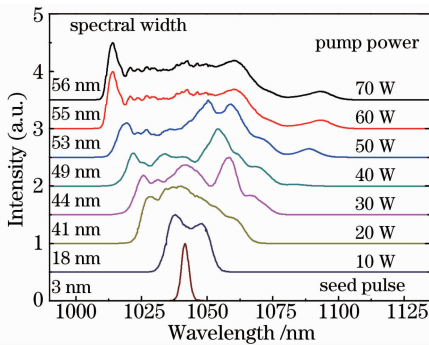


图 4 放大级中脉冲光谱演变动力学
Fig. 4 Evolutional dynamics of pulse spectra in amplifier stage

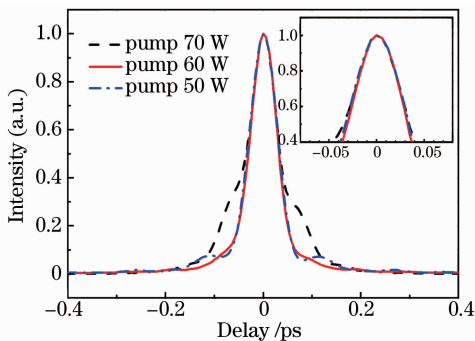


图 5 测量的放大脉冲宽度自相关曲线
Fig. 5 Measured autocorrelations of the amplified pulse width

4 结 论

构建了全 Yb-DC-LMA-PCF 的单级飞秒激光放大系统。该系统结构简单、紧凑，可在室温运转。振荡级采用孤子型锁模运转，放大级采用非线性放大技术。放大级在 60 W 抽运功率时，获得最窄脉宽约为 46 fs，输出平均功率为 28 W，相应的脉冲能量为 0.67 μJ ，峰值功率为 14.6 MW 的脉冲；增加抽运功率到 70 W，获得输出平均功率为 34 W，脉宽

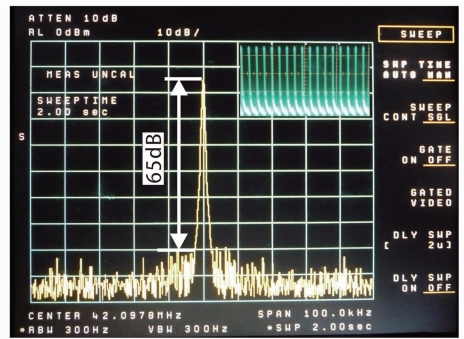


图 6 在抽运功率 70 W 下的脉冲序列 (插图) 和一次谐波功率谱

Fig. 6 Measured pulse train (inset) and first harmonic frequency spectrum under pump power of 70 W
约为 50 fs，对应脉冲能量为 0.8 μJ 和峰值功率为 16.2 MW 的脉冲。

参 考 文 献

- Wang Junli, Lü Zhiguo, Bu Xiangbao. Recent progress on rare earth doped femtosecond fiber lasers [J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100006.
王军利, 吕志国, 卜祥宝. 稀土离子掺杂飞秒光纤激光器最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100006.
- Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0101001.
柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0101001.
- J Limpert, T Schreiber, S Nolte, *et al.*. All fiber chirped-pulse amplification system based on compression in air-guiding photonic bandgap fiber[J]. Opt Express, 2003, 11(24): 3332–3337.
- F Röser, J Rothhardt, B Ortac, *et al.*. 131 W 220 fs fiber laser system[J]. Opt Lett, 2005, 30(20): 2754–2756.
- T Eidam, S Hädrich, F Röser, *et al.*. A 325-W-average-power fiber CPA system delivering sub-400 fs pulses[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(1): 187–190.
- T Eidam, S Hanf, E Seise, *et al.*. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power[J]. Opt Lett, 2010, 35(2): 94–96.
- F Röser, D Schimpf, O Schmidt, *et al.*. 90 W average power 100 μJ energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. Opt Lett, 2007, 32(15): 2230–2232.
- T Eidam, J Rothhardt, F Stutzki, *et al.*. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power[J]. Opt Express, 2011, 19(1): 255–260.
- C Xie, M L Hu, D P Zhang, *et al.*. Generation of 25-fs high energy pulses by SPM-induced spectral broadening in a photonic crystal fiber laser system[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(7): 551–553.
- J Limpert, T Schreiber, T Clausnitzer, *et al.*. High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. Opt Express, 2002, 10(14): 628–638.
- T Schreiber, C K Nielsen, B Ortac, *et al.*. Microjoule-level all-polarization-maintaining femtosecond fiber source[J]. Opt Lett, 2006, 31(5): 574–576.
- D N Papadopoulos, Y Zaouter, M Hanna, *et al.*. Generation of 63 fs 4.1 MW peak power pulses from a parabolic fiber amplifier operated beyond the gain bandwidth limit[J]. Opt Lett, 2007, 32(17): 2520–2512.

- 13 Y Zaouter, D N Papadopoulos, M Hanna, *et al.*. Stretcher-free high energy nonlinear amplification of femtosecond pulses in rod-type fibers[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(2): 107–109.
- 14 Y J Deng, C Y Chen, B G Fidric, *et al.*. Generation of sub-50 fs pulses from a high-power Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(22): 3469–3471.
- 15 C J Saraceno, O H Heckl, C R E Baer, *et al.*. Pulse compression of a high-power thin disk laser using rod-type fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(2): 1395–1407.
- 16 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(12): 1603–1607.
王清月, 胡明列, 宋有建, 等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, 34(12): 1603–1607.
- 17 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Sub-100 fs high power Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(11): 6921–6925.
刘博文, 胡明列, 宋有建, 等. 亚百飞秒高功率掺镱大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(11): 6921–6925.
- 18 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.
- 19 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2415–2418.
刘博文, 胡明列, 宋有建, 等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2415–2418.
- 20 C Xie, B W Liu, H L Niu, *et al.*. Vector-dispersion compensation and pulse pedestal cancellation in a femtosecond nonlinear amplification fiber laser system[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(21): 4149–4151.

栏目编辑:王晓琰