

高 峰 值 功 率 皮 秒 脉 冲 棒 状 光 子 晶 体 光 纤 放 大 器

王子薇^{1,2} 王兆坤^{1,2} 邹峰^{1,2} 吴闻迪¹ 李秋瑞¹ 白洋^{1,2} 周军¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 高功率的超短脉冲激光器在激光精细微加工等领域具有重要应用价值。以超大模场光纤为增益介质对超短脉冲激光进行功率放大,是实现高光束质量、高功率超短脉冲激光输出的有效技术手段。以脉冲宽度、重复频率可调的 1030 nm 锁模光纤激光器为种子光源,通过多级全光纤功率预放大和以超大模场棒状光子晶体光纤(PCF)为增益介质的功率放大器,搭建了高功率皮秒脉冲光子晶体光纤放大器系统。实验研究了棒状 PCF 放大器的输出特性,在脉冲宽度为 30 ps 时实现了峰值功率为 2.94 MW 的近衍射极限激光放大输出。

关键词 激光光学; 光纤放大器; 超短脉冲激光器; 棒状光子晶体光纤; 高功率

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1001001

High-Peak-Power Rod-Type Photonic Crystal Fiber Amplifier for Picosecond Pulses

Wang Ziwei^{1,2} Wang Zhaokun^{1,2} Zou Feng^{1,2} Wu Wendi¹

Li Qiurui¹ Bai Yang^{1,2} Zhou Jun¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract High-peak-power ultrashort pulse lasers are currently in demand for laser micromachining. It is an effective technique to use ultra-large-mode-field fibers to amplify the power of ultrashort laser pulses, for realizing ultrashort output laser pulses with high beam quality and high peak power. Based on a 1030 nm mode-locked tunable fiber laser, multi-stages of all-fiber preamplifiers and ultra-large-mode-field rod-type photonic crystal fiber (PCF), the output properties of rod-PCF amplifiers are demonstrated. The amplifier delivers near-diffraction-limit 30 ps pulses with maximum peak power of 2.94 MW.

Key words laser optics; fiber amplifier; ultrashort pulse laser; rod-type photonic crystal fiber; high peak power

OCIS codes 140.3538; 140.3615; 140.3280; 140.3510

1 引 言

脉冲宽度为皮秒到飞秒量级的超短脉冲光纤激光器在精密机械加工、医疗美容、超连续谱产生和非线性频率转换等领域具有重要的应用价值^[1-4],可获得高平均功率、高功率和光束质量性能良好的激光输出,已成为光纤激光领域的研究热点之一,受到广泛关注。但受常规双包层光纤有效模场面积的限制,其非线性效应阈值和损伤阈值较低,限制了超短脉冲激光输出功率,特别是峰值功率的提高。获得更高功率的超短脉冲激光输出的主要技术途径有:1) 采用啁啾脉冲放大(CPA)、分离脉冲放大(DPA)等技术,将脉冲展宽或分

收稿日期: 2016-04-08; 收到修改稿日期: 2016-05-09

基金项目: 国家 863 计划(2014AA041901)、国家自然科学基金(U1330134,61308024)

作者简介: 王子薇(1988—),女,博士研究生,主要从事超短脉冲光纤放大等方面的研究。E-mail: wzw@siom.ac.cn

导师简介: 周军(1972—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

束延时,降低激光的峰值功率从而减弱非线性效应,但该方法光路结构复杂,需要严格的色散管理,后续压缩光栅的造价高昂,效率较低,主要应用于飞秒激光放大领域^[5-6];2) 采用光纤-晶体混合放大技术,最后一级利用激光晶体激光损伤阈值较高的特性进行功率放大,但体块状晶体放大也存在光路复杂、热效应严重、光束质量较差等问题^[7];3) 采用新型结构的光子晶体光纤(PCF)作为增益介质进行功率放大,借助于 PCF 独特的微结构设计,可在纤芯直径较大的光纤中获得高光束质量的激光。2005 年,Limpert 等^[8]首次提出了棒状光子晶体光纤结构,这种结构结合了光纤与固体增益介质两者的优点,在保持良好光束质量的同时可以承受很高的功率。相较于结构复杂的 CPA 技术,基于棒状 PCF 和主振荡功率放大(MOPA)方式直接放大皮秒脉冲,结构简单,易于实现。2014 年,Otto 等^[9]利用棒状光纤对展宽为 150 ps 的锁模光纤激光器进行放大,在 20 MHz 的重复频率下,获得了平均功率高达 2 kW 的近衍射极限激光输出,峰值功率超过 800 kW,这是目前报道的皮秒光纤激光器输出平均功率的最高纪录。同年,Zhao 等^[10]对脉冲宽度为 3 ps、重复频率为 50 MHz 的脉冲基于棒状 PCF 进行放大,输出的平均功率为 150 W,对应的峰值功率达到了 1 MW,光束质量因子 $M^2 < 1.3$ 。在上述实验中,为了实现高平均功率超短脉冲的光纤放大激光输出,通常选择种子光源工作在数兆赫兹以上的高重复频率状态,虽然平均功率达到了数百瓦甚至千瓦量级,但峰值功率不是非常高,用于精细激光微加工时,热效应依然比较严重。降低超短脉冲激光的重复频率以提高输出激光的峰值功率,是高功率超短脉冲光纤激光器发展的一个重要方向。

为了获得高峰值功率的皮秒脉冲输出,本文研究了基于棒状 PCF 的 MOPA 结构高峰值功率放大器。以脉冲宽度、重复频率可调的 1030 nm 锁模光纤激光器为种子源,采用棒状 PCF 作为功率放大增益介质,当脉冲宽度为 30 ps 时实现了峰值功率为 2.94 MW 的近衍射极限激光脉冲输出。研究分析了不同脉冲宽度、不同重复频率下放大激光的输出特性。

2 实验装置

基于棒状 PCF 的皮秒脉冲棒状光纤放大器实验装置如图 1 所示。采用的种子光源为半导体可饱和吸收镜锁模激光器,输出中心波长为 1030 nm,重复频率为 29.87 MHz,脉冲宽度为 30 ps。信号光输出后通过光开关分成两路,一路展宽为约 200 ps 的脉冲,另一路直接以 30 ps 脉冲宽度输出。展宽的脉冲需要经过三级双包层光纤预放大,在声光调制器(AOM)降频后,实现了重复频率为 0.1~29.87 MHz、脉冲宽度为 180 ps、最大输出功率为 2 W 的可调谐激光输出。而 30 ps 的脉冲直接经过第三级放大和降频装置,获得重复频率可调、最大输出功率为 1.5 W 的激光输出。预放后的激光经过准直器成为准直光,先后通过平面镜 M1 和 M2(910~980 nm 高透 & 1030~1080 nm 高反)进入棒状 PCF 所在光路。为了保护种子光,防止反射的信号光和受激自发辐射(ASE)效应,在光路中加入空间偏振相关隔离器(ISO)。因为前级预放光纤不是保偏光纤,输出信号光偏振态随机,在 ISO 前加入一片中心波长为 1030 nm 的半波片(HWP),使得通过 ISO 的功率最大,此时信号光的偏振度大于 13 dB。随后在 M2 与聚焦透镜 L1 之间加入一片中心波长同样为 1030 nm 的半波片,使信号光偏振方向与光纤的慢轴对准,从而获得高偏振度的放大激光输出。实验采

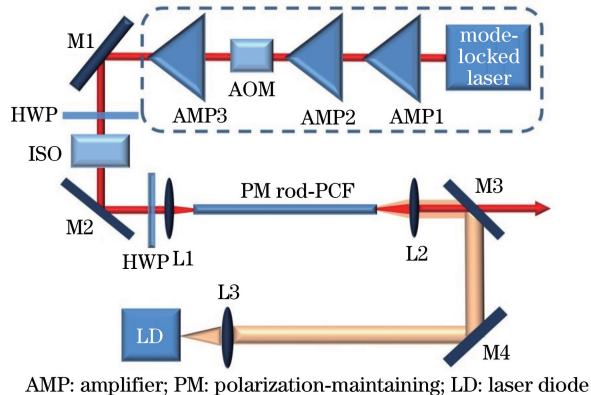


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

用一根长度为 0.8 m 的熊猫型保偏掺镱棒状 PCF 作为功率放大级的增益光纤, 光纤端面如图 2 所示, 其纤芯/内包层直径为 $100\ \mu\text{m}/285\ \mu\text{m}$, 纤芯在 1030 nm 附近的数值孔径(NA)为 0.02, 包层抽运在 950 nm 附近的 NA 约为 0.60, 对 976 nm 抽运光的吸收系数约为 $30\ \text{dB}/\text{m}^{[11]}$ 。光纤两端均与尺寸为 $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ 的表面镀增透膜的石英端帽熔接, 在降低输出平面峰值功率密度的同时可防止菲涅耳反射, 抑制放大过程中的 ASE 效应。为了提高抽运效率, 降低非线性效应, 采用中心波长为 976 nm 的带尾纤输出的半导体激光器反向抽运增益光纤, 最大输出功率为 120 W, 输出尾纤尺寸为 $200\ \mu\text{m}/220\ \mu\text{m}$, $NA=0.22^{[12-13]}$ 。通过 1:1 透镜组 L3、L2 将抽运光高效耦合进入光纤中, 使用平面镜 M3 和 M4 (910~980 nm 高反 & 1030~1080 nm 高透) 将抽运光折返到棒状 PCF 光路上, 并保护抽运源, 防止信号光损伤抽运源。放大后的信号光经过透镜 L2 准直后, 通过平面镜 M3 输出。

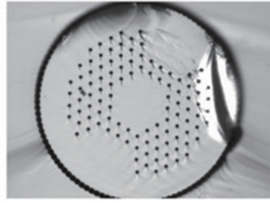


图 2 棒状 PCF 端面结构
Fig. 2 End scheme of rod-PCF

3 实验结果与分析

3.1 30 ps 脉冲激光的功率放大实验

当脉冲宽度为 30 ps 时, 测试了重复频率为 0.574, 1, 10, 30 MHz 时的放大激光输出功率、光谱特性、脉冲特性和光束质量, 如图 3 所示。在以上重复频率下, 通过隔离器后产生的线偏振光功率分别为 0.2, 0.38, 1, 1.1 W, 均高于棒状 PCF 放大所需要的信号功率, 可有效抑制 ASE 效应。当注入抽运光功率为 112 W 时, 重复频率为 1~30 MHz, 皮秒脉冲激光输出的信号光功率约为 60 W。低抽运功率下斜率效率较低的主要原因是低功率下抽运源的温度较低, 抽运光中心波长偏离镱离子吸收峰较远, 随着抽运光功率的提升, 抽运光中心波长逐渐漂移到 976 nm 附近, 增益光纤的吸收效率大大提高。当抽运光功率达到 70 W 以上时, 输出信号光功率呈线性增长, 斜率效率约为 80%。当抽运光功率为 121 W 时, 在 1 MHz 下最大输出功率为 67.3 W, 此时对应的峰值功率约为 2.33 MW。考虑到棒状 PCF 端面的损伤阈值, 在 574 kHz 时注入较低的抽运光功率^[14]。当抽运光功率为 103 W 时, 输出的信号光功率为 48.7 W, 对应的峰值功率达到 2.94 MW, 此时脉冲的半峰全宽(FWHM)为 28.9 ps。从图 3 可以看出, 棒状 PCF 放大器尚未达到饱和状态, 系统输出功率的进一步提升主要受限于抽运源功率。由于担心光纤端面可能出现激光损伤, 没有进一步提升抽运功率。在保证光纤端面安全的前提下, 继续增大抽运功率, 还可以进一步提高该棒状 PCF 的输出功率。

重复频率为 574 kHz 时, 使用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(AQ6370C, Yokogawa, 日本)测得的信

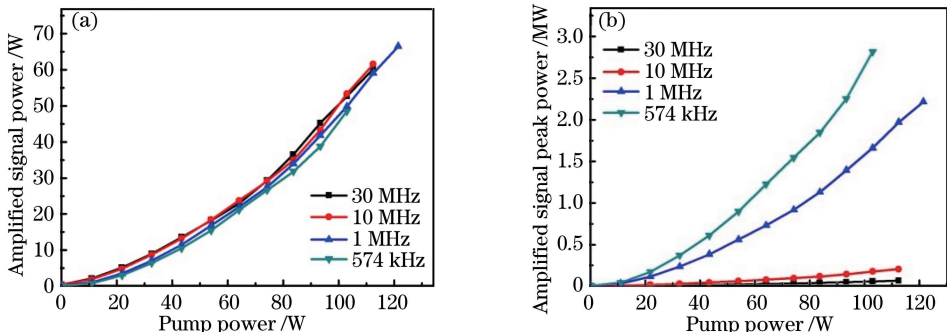


图 3 不同重复频率下输出信号光(a)平均功率和(b)峰值功率随抽运光功率的变化曲线

Fig. 3 (a) Average power and (b) peak power of output signal versus pump power at different repetition rates

号光输出光谱如图 4 所示。第三级预放输出信号光的中心波长为 1030.4 nm,FWHM 约为 0.27 nm,经过主放级后,由于自相位调制(SPM)效应,光谱发生展宽,并伴随着振荡结构,如图 4 插图所示。当输出信号光功率为 50 W 时,中心波长为 1030.7 nm,输出光谱 FWHM 约为 1.7 nm,20 dB 带宽约为 3 nm。此时放大光谱中出现了 1020~1040 nm 范围内的 ASE 效应,但低于信号光强度 30 dB 以上,同时在 1080 nm 附近出现了受激拉曼散射(SRS)峰,强度低于信号光强度 40 dB 以上。因为棒状 PCF 的有效模场面积远大于普通双包层光纤,其非线性阈值也远高于普通光纤,所以在兆瓦量级的峰值功率下,仍有效抑制了 ASE 和 SRS。由于重复频率为 574 kHz 时,棒状 PCF 功率主放级的输入信号光功率仅有 0.2 W,经过放大器后的增益达到了 23.8 dB,可以通过适当增加预放级功率来提高注入的信号光功率,从而在一定程度上抑制放大过程中的 ASE。在其他重复频率下,输出光谱与 574 kHz 时类似,均存在因一定程度 SPM 造成的展宽,由于较高重复频率下的峰值功率相对较低,所以 FWHM 可保持在 0.7 nm 以下,ASE 较弱,没有出现 SRS。

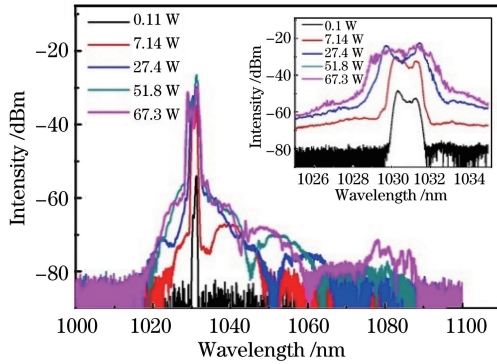


图 4 重复频率为 574 kHz 时不同功率下输出信号光的光谱(插图为 1025~1035 nm 波段的放大)

Fig. 4 Output spectra versus output signal power at repetition rate of 574 kHz (the inset shows the enlarged profiles in the wavelength band from 1025 nm to 1035 nm)

由带宽为 6 GHz, 采样率为 25 GS/s 的示波器(DPO70604C, Tektronix, 美国)测得的 574 kHz 时的脉冲序列如图 5(a)所示,测得的重复频率为 574.4 kHz,脉冲序列非常稳定。由于受示波器带宽的限制,无法测得准确的脉冲宽度,采用自相关仪(Pulsecheck, APE, 德国)测得的放大信号光的脉冲 FWHM 为 28.9 ps,相比种子光脉冲宽度略有压缩,如图 5(b)所示。

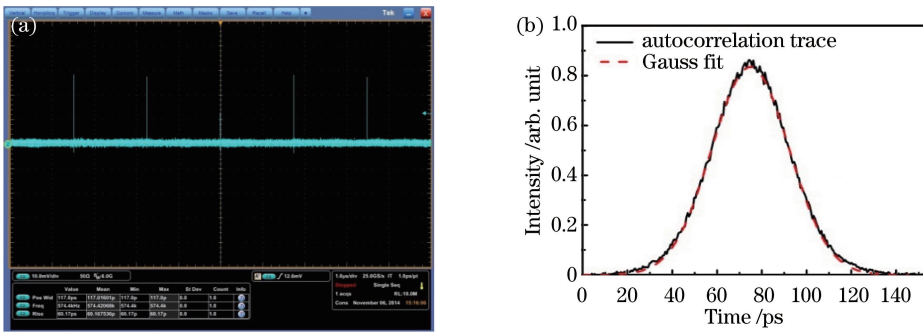


图 5 (a) 输出信号光的脉冲序列; (b) 单脉冲自相关曲线

Fig. 5 (a) Sequence of output pulses; (b) autocorrelation trace of output pulses

当重复频率为 574 kHz 时,采用光束质量分析仪(PRIMES, 德国)基于广义截断二阶矩法测得第三级预放输出的信号光光束质量 $M^2 = 1.09$ ($M_x^2 = 1.094, M_y^2 = 1.038$)。棒状 PCF 的纤芯直径为 100 μm ,模场直径约为 76 μm ,NA 为 0.02,此时光纤中可以支持包括基模在内的 4 个模式的传播($LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$)。信号光需要正入射耦合进入棒状 PCF,角度或者横向的偏移都会导致耦合进入光纤的基模分量的减少,从而使输出激光光束质量恶化。光纤对入射角度的变化特别敏感,经过计算^[15],当入射光为正入射时,耦合进入纤芯的基模功率占纤芯总功率的 92.10%;当入射角度为 0.1°时,基模功率占比下降到 86.3%;入射角度为 0.2°时,基模功率仅占总功率的 70.94%。经过优化后的放大信号光在不同功率下的输出光斑如图 6 所示。

信号光耦合进入棒状 PCF 后,由于棒状 PCF 纤芯对 1030 nm 激光的吸收较强,在低功率下纤芯/包层功率比(CCR)较低(-1 dB),采用光束质量分析仪对未放大信号光的光束质量进行测量,光束质量因子 $M^2=2.15$ ($M_x^2=2.047, M_y^2=2.160$)。当注入抽运光后,由于棒状 PCF 的无截止单模特性,纤芯中单模信号光功率不断增大,CCR 也随之增大,光束质量得到了明显改善。在最大输出平均功率为 48.7 W 时(峰值功率为 2.94 MW),测得的光束质量因子 $M^2=1.30$ ($M_x^2=1.258, M_y^2=1.222$),此时 CCR 大于 15 dB,实现了近衍射极限的激光输出。

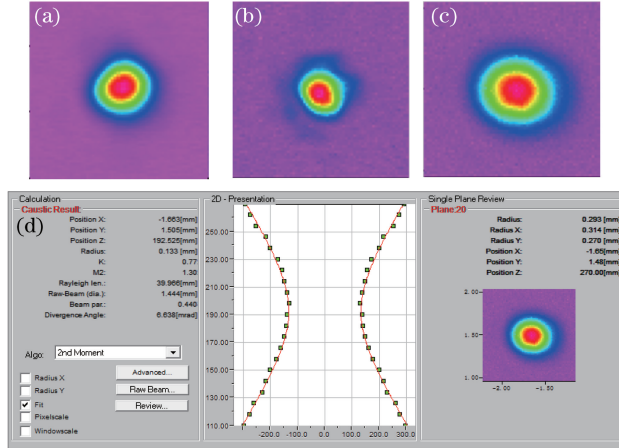


图 6 重复频率为 574 kHz 时不同功率下的二维输出光斑形态。(a) 种子光;(b) 耦合后;(c) 输出功率为 48 W;(d) 分析仪结果
Fig. 6 Output beam profiles versus output signal power at repetition rate of 574 kHz. (a) Seed; (b) after coupling; (c) output power of 48 W; (d) result of laser beam diagnostic device

3.2 180 ps 脉冲激光的功率放大实验

当脉冲宽度为 180 ps 时,测试了重复频率为 0.574, 1, 10, 30 MHz 时的放大光输出功率、光谱特性和脉冲特性。当重复频率为 0.574~30 MHz 时,注入信号光功率为 0.4~1.9 W,略高于 30 ps 时的注入功率。180 ps 脉冲与 30 ps 脉冲放大略有不同,在相同的抽运光功率下,输出平均功率随重复频率的增大而略有增大。在抽运光功率大于 70 W 时,放大信号光的斜率效率与 30 ps 时基本相同。当抽运光功率为 121 W 时,30 MHz 重复频率下输出平均功率为 70.5 W,而在 574 kHz 重复频率下输出的平均功率为 61.5 W,对应的峰值功率达到了 595 kW,如图 7 所示。因为在 180 ps 脉冲下,重复频率为 100 kHz 时的注入信号光功率为 200 mW,远大于 30 ps 时的功率(20 mW),所以在 100 kHz 下也进行了放大。结果表明,在注入抽运光功率为 112 W,输出信号光功率为 35 W 时,光纤输出端光纤与端帽熔点处出现火光,该点出现裂痕,光纤无法正常传光,激光大量泄漏。此时对应的激光峰值功率约为 1.94 MW,功率密度约为 24.7 GW/cm²,接近于长脉冲光对石英材料的损伤阈值^[16],达到了 200 ps 激光的输出功率极限。

在 1 MHz 重复频率下,使用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪测得的信号光输出光谱如图 8 所示。输出信号光功率为 55 W 时,中心波长为 1030.8 nm,FWHM 为 0.3 nm。因为 180 ps 脉冲宽度下激光峰值功率

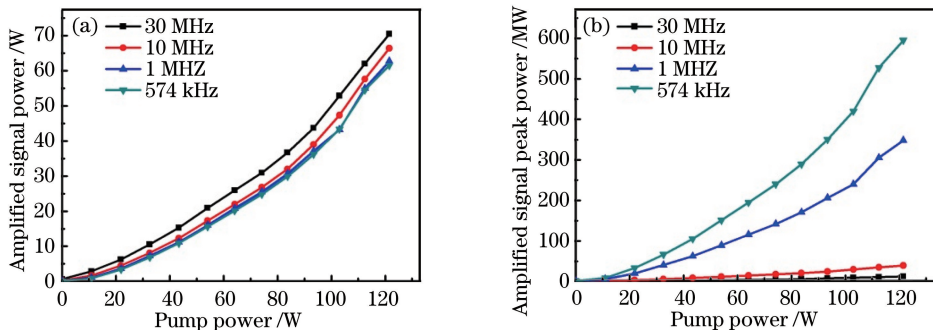


图 7 不同重复频率下输出信号光(a)平均功率和(b)峰值功率随抽运光功率的变化曲线

Fig. 7 (a) Average power and (b) peak power of output signal versus pump power at different repetition rates

远小于 30 ps 时的峰值功率,均小于 400 kW,而棒状 PCF 的非线性效应阈值远大于普通双包层光纤,所以在整个放大过程中基本没有出现光谱展宽的现象,1000 nm 附近的 ASE 也低于信号光 40 dB 以上。结合 30 ps 脉冲的光谱波形可以看出,峰值功率低于 1 MW 时,棒状 PCF 可以较好地抑制光纤中的非线性效应和 ASE。为了进行倍频等对激光线宽要求较高的后续实验,需要结合光谱合理规划棒状 PCF 输出的峰值功率。

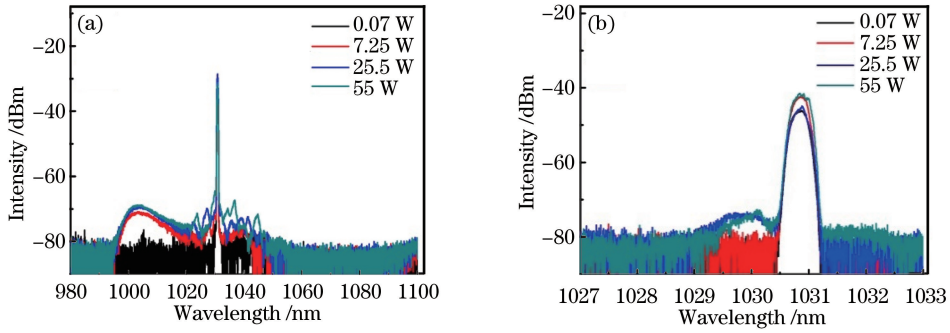


图 8 重复频率为 1 MHz 时不同输出功率下输出信号光的光谱

Fig. 8 Output spectra versus output signal power at 1 MHz repetition rate

由带宽为 6 GHz,采样率为 25 GS/s 的示波器测得重复频率 1 MHz 时放大前与放大后的脉冲波形,如图 9 所示。从图中可以看出,输出脉冲波形与输入光保持一致的高斯波形,没有产生畸变,测得的输出脉冲宽度为 182 ps,与输入激光脉冲宽度 180 ps 相比基本没有变化。

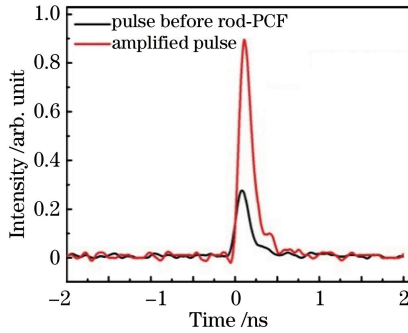


图 9 1 MHz 重复频率下输入与输出信号光的脉冲波形

Fig. 9 Pulse profiles of input and output pulses at 1 MHz repetition rate

4 结 论

研究了基于棒状 PCF 的高峰值功率皮秒脉冲放大器。以 1030 nm 锁模光纤激光器为种子源,棒状 PCF 为主放级增益光纤,获得了峰值功率高达 2.94 MW 的近衍射极限的激光输出。对比不同脉冲宽度和重复频率下的放大结果发现,在满足光纤入射激光功率条件的情况下,重复频率对激光输出功率影响较小;棒状 PCF 在激光峰值功率 1 MW 以下,能够较好地抑制光纤中的非线性效应。分析了信号光入射角度与位移对棒状 PCF 输出光束质量的影响以及脉冲宽度小于 200 ps 时棒状 PCF 的损伤条件。探索了棒状 PCF 的诸多特性,为后续相关研究提供参考。

参 考 文 献

- 1 Mazur E. Femtosecond laser processing of materials[C]. CLEO: Science and Innovations, San Jose, 2014: STu1E.
 - 2 Brauer J A, Reddy K K, Anolik R, *et al.* Successful and rapid treatment of blue and green tattoo pigment with a novel picosecond laser[J]. Archives of Dermatology, 2012, 148(7): 820-823.
 - 3 Li Pan, Shi Lei, Wang Xuefeng, *et al.* Experimental investigation of the supercontinuum generated by amplified high repetition mode-locked pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s214006.
- 李 磐, 时 雷, 王学锋, 等. 基于高重复频率锁模脉冲放大产生超连续谱的实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2):

s214006.

- 4 Zhao Z, Dunham B M, Bazarov I, *et al.* Generation of 110 W infrared and 65 W green power from a 1.3 GHz sub-picosecond fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 4850-4855.
- 5 Kim K, Peng X, Lee W, *et al.* Monolithic polarization maintaining fiber chirped pulse amplification (CPA) system for high energy femtosecond pulse generation at 1.03 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4766-4770.
- 6 Zaouter Y, Guichard F, Daniault L, *et al.* Femtosecond fiber chirped- and divided-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 106-108.
- 7 Lu Yunfeng, Wang Yi, Liu Bin, *et al.* 1.5 MW peak power, fiber-solid hybrid amplification MOPA lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0202009.
陆云峰, 王毅, 刘斌, 等. 1.5 MW 峰值功率光纤-固体混合放大 MOPA 激光系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0202009.
- 8 Limpert J, Deguil-Robin N, Manek-Hönniger I, *et al.* High-power rod-type photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1055-1058.
- 9 Otto H J, Stutzki F, Modsching N, *et al.* 2 kW average power from a pulsed Yb-doped rod-type fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6446-6449.
- 10 Zhao Z, Dunham B M, Wise F W. Generation of 150 W average and 1 MW peak power picosecond pulses from a rod-type fiber master oscillator power amplifier[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(1): 33-37.
- 11 Hansen K P, Olausson C B, Broeng J, *et al.* Airclad fiber laser technology[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 111609.
- 12 Du Songtao, Wang Ziwei, He Jing, *et al.* Study on characteristics of picosecond pulsed fiber amplifier with high peak power[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602014.
杜松涛, 王子薇, 何晶, 等. 高功率亚纳秒脉冲光纤放大器特性研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602014.
- 13 Zhao Xiaowei, Chai Lu, Shi Junkai, *et al.* Investigation of the pump schemes in photonics crystal fiber femtosecond laser amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0505005.
赵晓薇, 柴路, 石俊凯, 等. 光子晶体光纤飞秒激光放大器抽运方式的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0505005.
- 14 Smith A V, Do B T, Hadley G R, *et al.* Optical damage limits to pulse energy from fibers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 153-158.
- 15 Chen Xuekun, Zhang Lu, Wu Zhiyong. Coupling efficiency of free-space laser coupling into single mode fiber and photonic crystal fiber[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 208-215.
陈雪坤, 张璐, 吴志勇. 空间激光与单模光纤和光子晶体光纤的耦合效率[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 208-215.
- 16 Smith A V, Do B T. Bulk and surface laser damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(26): 4812-4832.