

# 复合调制掺 $\text{Yb}^{3+}$ 兆瓦级光纤激光系统

金 亮<sup>1</sup>, 李四川<sup>2</sup>, 赵 鑫<sup>1</sup>, 李 洋<sup>1</sup>, 张 贺<sup>1</sup>, 徐英添<sup>1</sup>, 徐 莉<sup>1</sup>, 邹永刚<sup>1</sup>,  
徐成阳<sup>1</sup>, 何广龙<sup>1</sup>, 马晓辉<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

**摘要** 提出了一种主振荡光纤放大系统, 围绕提高脉冲信号的峰值功率和拓宽系统重复频率的调制范围两方面进行了实验研究。实验采用电脉冲调制和声光调制的方式对光脉冲序列进行调制, 抑制了半导体种子源在小信号放大时产生的放大自发辐射效应和自激振荡, 解除了种子源对系统重复频率的限制, 使系统的重复频率在 1~200 kHz 范围内连续可调。在声光调制器对光脉冲的调制过程中, 声光 Q 开关有效抑制了放大过程中由自相位调制引起的光谱展宽。实验采用大模场棒状光子晶体光纤作为增益介质, 提高了光脉冲的峰值功率和输出光的光束质量, 抑制了因峰值功率过高引起的非线性效应, 最终实现了脉冲宽度为 1.12 ns、峰值功率为 2.01 MW 的稳定光脉冲输出, 平均功率超过 56 W, 输出光束质量接近衍射极限 ( $M_x^2 = 1.49, M_y^2 = 1.54$ )。

**关键词** 光纤光学; 复合调制; 高峰值功率; 光纤激光; 非线性效应; 棒状光子晶体光纤

**中图分类号** TN248

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0201016

## Multi-Modulation $\text{Yb}^{3+}$ Doped Megawatt Fiber Laser System

Jin Liang<sup>1</sup>, Li Sichuan<sup>2</sup>, Zhao xin<sup>1</sup>, Li Yang<sup>1</sup>, Zhang He<sup>1</sup>, Xu Yingtian<sup>1</sup>, Xu Li<sup>1</sup>,  
Zou Yonggang<sup>1</sup>, Xu Chengyang<sup>1</sup>, He Guanglong<sup>1</sup>, Ma Xiaohui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Key Laboratory on High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of  
Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>South-West Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichun 610041, China

**Abstract** A main oscillation fiber amplification (MOFA) system is proposed, and the increasing of pulse signal peak power and the broadening of repetition frequency modulation range of the proposed system are studied experimentally. The electrical pulse modulation and the acousto-optic modulation are employed to modulate optical pulse sequence. Amplified spontaneous emission effect and self-excited oscillation of semiconductor seed source, which are generated in the process of small signal amplifying, are suppressed. The limitation of seed source to the repetition frequency of the proposed system is eliminated, and the repetition frequency can be tuned continuously in the range of 1~200 kHz. In the process of optical pulse modulation with the acousto-optic modulator, the acousto-optic Q-switch can effectively suppress the spectral broadening caused by self-phase modulation. The rod-like photonic crystal fiber with large mode field is used as the gain medium to increase the peak power of optical pulse and the beam quality of output light, and the nonlinear effect caused by high peak power is suppressed. Ultimately, the stable optical pulse output with the pulse width of 1.12 ns and the peak power of 2.01 MW is achieved, the average power is more than 56 W, and the beam quality of the output light is close to the diffraction limit ( $M_x^2 = 1.49, M_y^2 = 1.54$ ).

**Key words** fiber optics; multi-modulation; high peak power; fiber laser; nonlinear effect; rod-like photonic crystal fiber

**OCIS codes** 190.2640; 190.4370; 060.2320; 060.4370

收稿日期: 2016-09-12; 收到修改稿日期: 2016-12-21

基金项目: 吉林省科技厅重点科技攻关项目(20150204068GX)

作者简介: 金 亮(1987—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: namemichael@163.com

\* 通信联系人。E-mail: zouyg@cust.edu.cn

# 1 引 言

主振荡光纤放大器(MOFA)具有较高的脉冲峰值功率和脉冲能量、高光束质量、紧凑的结构及较好的稳定性等优点,因此被广泛应用于激光雷达、激光通信、激光加工、成像显示等领域<sup>[1-3]</sup>。与固体激光器不同,MOFA 的高峰值功率与光纤相互作用后产生受激拉曼散射、自相位调制和四波混频等非线性效应,使光脉冲和光谱产生畸变,从而严重影响光脉冲峰值功率和光束质量<sup>[4]</sup>。目前,提高非线性阈值功率最直接的方法是增大增益光纤的纤芯直径<sup>[5]</sup>,较大的光纤纤芯直径可以减小光功率密度,有利于抽运光的吸收,从而减小所需光纤的长度。但是,较大的纤芯直径会使光纤可容纳的光模式增多,并且使光纤容易受到光纤弯曲模场畸变的影响,增大了功率弯曲损耗,严重影响了输出光束质量<sup>[6-7]</sup>。输出光脉冲的脉冲宽度和重复频率由种子源决定,因此系统输出的光脉冲的特性会受到种子源的限制。

近几年,国内外的研究人员相继对高光束质量的兆瓦级峰值功率 Yb<sup>3+</sup> 掺杂 MOFA 系统进行了深入研究<sup>[8-10]</sup>。其中,种子源多数采用被动调 Q 固体激光器<sup>[11]</sup>,这种激光器具有输出功率高(0.1 瓦量级)、脉冲宽度窄(亚纳秒量级)、峰值功率高、光束质量好(近单模)、结构紧凑等优点。但是,实验中的固体激光器会频繁地产生跳频现象,光脉冲的重复频率跳变严重,因此给后续的功率放大和峰值功率的提高带来了很大难度。

基于以上问题,针对 MOFA 系统的光脉冲调制技术和高峰值功率下产生的非线性抑制技术进行了研究。采用电脉冲驱动调制半导体激光器与声光调制(AOM)技术相结合的方式对种子源进行调制,有效增大了系统的调制频率范围,避免了被动调 Q 固体激光器作为种子源产生的跳频现象,使系统的重复频率在 1~200 kHz 范围内连续可调。此外,实验采用光子晶体光纤(PCF)对输出的光信号进行功率放大,PCF 具有超大的模场面积,可有效提高非线性阈值功率,而且 PCF 的纤芯微结构可以提供较小的数值孔径,从而实现大模场单模输出。实验最终得到了脉冲宽度为 1.12 ns、峰值功率为 2.01 MW 的光脉冲输出,光束质量  $M_x^2 = 1.49$ 、 $M_y^2 = 1.54$ 。

# 2 实验及分析

MOFA 光纤激光系统如图 1 所示。种子源为波长为 1064 nm 的窄线宽半导体激光器,通过电脉冲驱动对种子源进行调制。当重复频率为 1 kHz 时,脉冲宽度为 800 ps,输出功率为 280 nW,表 1 为脉冲宽度、平均功率与重复频率之间的关系。重复频率较低时种子源的输出功率较小,在放大过程中很容易产生放大自发辐射(ASE)效应<sup>[12]</sup>,因此只能通过增大种子源输出功率来抑制 ASE 效应。实验结果表明,当种子源输出功率大于 10  $\mu$ W 时,可较好地抑制 ASE 效应(对应重复频率大于 25 kHz)。第一、二级放大系统对种子源输出光信号进行两级级联纤芯预放大,采用单模窄线宽抽运源(波长为 976 nm,线宽为 0.45 nm)对长度分别为 1.6 m 和 2.8 m 的单模掺 Yb<sup>3+</sup> 增益光纤进行正向抽运;第三级放大系统采用长度为 2.5 m、分光比为 10/130

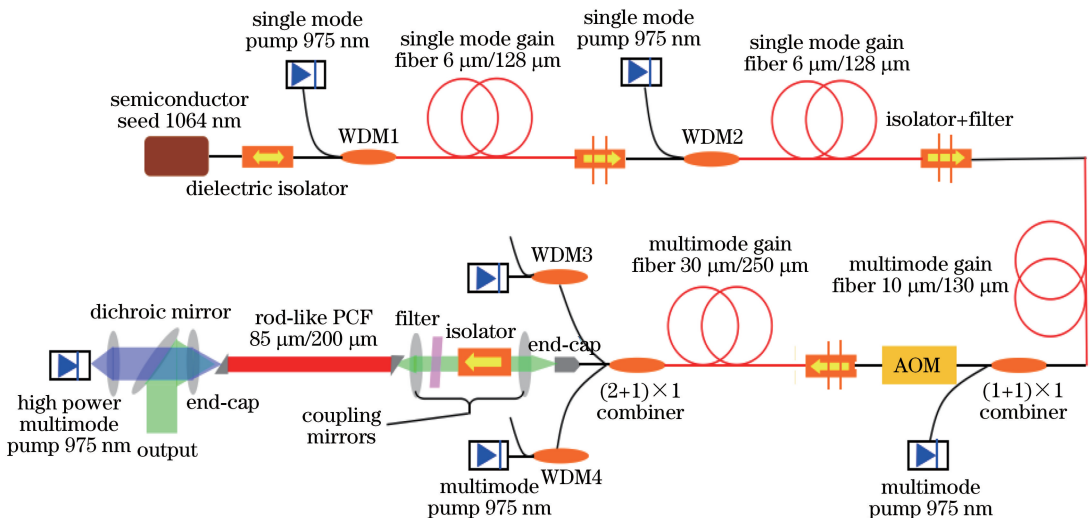


图 1 MOFA 光纤激光系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of MOFA fiber laser system

的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤(nurfern 公司)作为增益介质,将波长为 976 nm 的窄线宽多模半导体激光器作为抽运源,该抽运源的最大输出功率为 9 W。为了使 MOFA 系统能够在重复频率低于 25 kHz 时稳定工作、避免 ASE 效应导致的系统信噪比降低的问题,实验采用声光 Q 开关对输出光脉冲进行周期性的切割调制。因此,在不改变种子源重复频率的条件下,通过改变声光 Q 开关的开关时间,可以降低系统输出光的重复频率,使 Q 开关时间满足相位匹配条件,从而使系统的重复频率在 1~25 kHz 范围内连续可调。

表 1 脉冲宽度、平均功率与重复频率之间的关系

Table 1 Relationship among pulse width, average power and repetition frequency

Repetition frequency /kHz	Pulse width /ns	Average power / $\mu$ W
1	0.8	0.28
20	0.835	9.6
40	1.15	18.5
60	1.31	28.3
100	1.5	39.8
150	1.82	60.2
200	2.2	85.7

图 2 为声光 Q 开关切割光脉冲的示意图,图中  $T_1$  和  $T_2$  为脉冲宽度。图 2(a)为种子源发出的光脉冲,图 2(b)为声光 Q 开关的开关时间,图 2(c)为切割后的光脉冲。当利用声光调制器对光脉冲进行切割时,光脉冲与 Q 开关的开启时间之间的相位差  $\omega$  必须是一个恒定的值,这样才能保证切割后的光脉冲具有稳定的重复频率。在 Q 开关开启后的一段时间内,有一个光脉冲恰好通过声光调制器,Q 开关关闭后,下一个或多个光脉冲将无法通过声光调制器而被反射,通过这种方式可降低种子源的重复频率,既保证了放大后的输出光束不受 ASE 等效应的影响,同时也可以使光纤激光系统在低频范围内正常工作。此外,这种脉冲切割的方式对脉冲宽度和脉冲幅值不会产生影响。

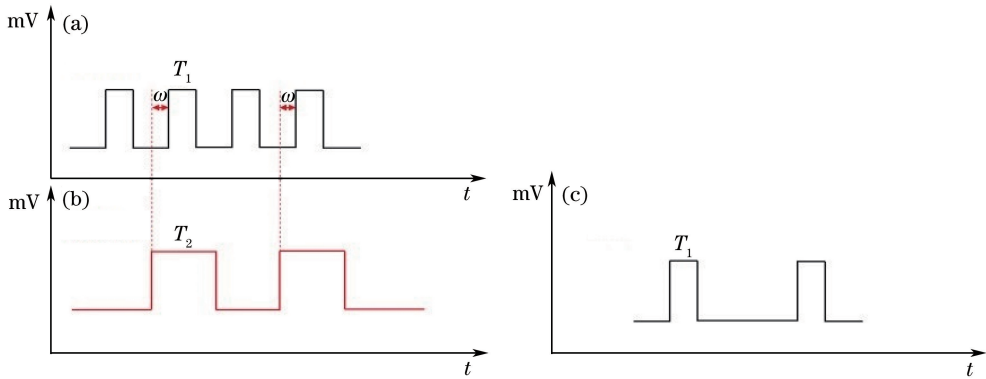


图 2 声光 Q 开关切割光脉冲示意图。(a)种子源发出的光脉冲;(b)声光 Q 开关的开关时间;(c)切割后的光脉冲

Fig. 2 Diagram of cutting optical pulse by acousto-optic Q-switch. (a) Optical pulse of seed source; (b) switch time of acousto-optic Q-switch; (c) optical pulse after cutting

为了分析声光调制器对输出光谱的影响,采用光谱仪(横河 AQ6370C)对经过第三级放大后的光脉冲光谱进行了测量。图 3(a)为未经过声光调制处理的输出光谱,可以看出信号光两侧产生了两个向外扩展的光谱边带,这主要是由自相位调制效应和四波混频效应引起的。图 3(b)为经过声光调制后的输出光谱,与图 3(a)相比,经过声光调制后光谱两侧的边带展宽量明显减小,这是因为光脉冲在光纤中传输时产生的非线性效应是一个累积的过程。当 Q 开关在光路系统中处于关闭状态时,光脉冲不能通过 Q 开关,自相位调制和四波混频等非线性效应得到了较好的抑制;当 Q 开关在光路系统中处于打开状态时,由于光脉冲数量变大,非线性效应累积严重,光谱展宽,此时在系统中增加声光调制器可以对输出光谱进行优化。

第 4 级放大系统将两个输出功率为 10 W 的 976 nm 窄线宽半导体激光器作为抽运源,抽运芯径为长度为 30  $\mu$ m 的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤,在光纤的输出端面熔接一段倾斜角为 8° 的玻璃柱端帽作为输出端面,这样可以避免由输出端面反射引起的自激振荡,而且可以有效降低输出端面的功率密度。在第 5 级放大系统中,准直透

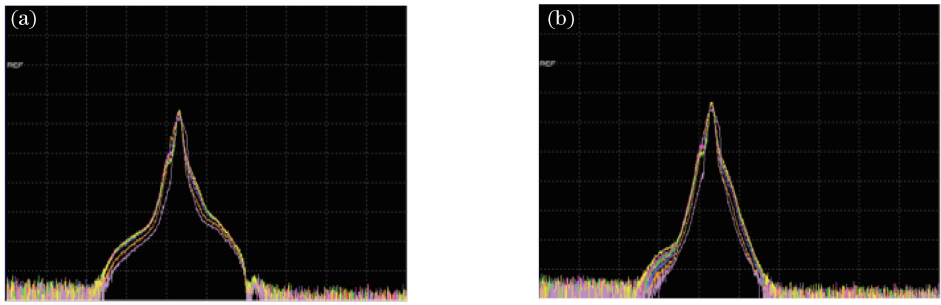


图 3 声光调制前后的输出光谱。(a) 调制前;(b)调制后

Fig. 3 Output spectra before and after AOM. (a) Before AOM; (b) after AOM

镜对光脉冲进行准直后,进入插损约为 1 dB 的体隔离器,并在隔离器的输出端加入一个带宽为 10 nm 的带通滤波片,再经过耦合系统将光脉冲耦合进芯径为 85  $\mu\text{m}$ 、长度为 80 cm 的棒状 PCF 中,棒状 PCF 光纤横截面如图 2 所示。纤芯的数值孔径约为 0.02,模场直径约为 65  $\mu\text{m}$ ,棒状 PCF 的模场面积远大于传统双包层光纤,且棒状 PCF 支持单模光束传输。棒状 PCF 的内包层直径为 200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径约为 0.7,这种内包层设计可以有效提高抽运光的吸收能力,有利于提高信号光的增益系数和系统的斜率效率。为避免高功率密度对光纤端面造成损伤,在 PCF 棒的尾端熔接了一段玻璃端帽,从而对输出光束进行扩束。第 5 级放大系统中所使用的抽运源为光纤耦合输出的窄线宽半导体激光器,该激光器的输出功率为 200 W,输出波长 976 nm,带宽为 3 nm。在抽运光和 PCF 之间放入一个二向色镜,使抽运光高透、输出光高反。实验在第 3~5 级放大系统中均采用反向抽运的方式对信号光进行抽运,这样可以抑制放大过程中的非线性效应,同时可以降低光纤中的功率密度分布<sup>[13]</sup>。

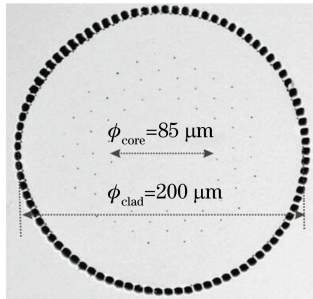


图 4 棒状 PCF 横截面

Fig. 4 Cross section of rod-like PCF

### 3 实验结果

实验中测量了系统的平均输出功率和脉冲能量随抽运功率的变化,测量结果如图 5 所示。单脉冲的最大能量为 2.25 mJ,平均输出功率为 56.28 W,斜率效率为 54.2%。由于在 PCF 输出端面增加了输出端帽,

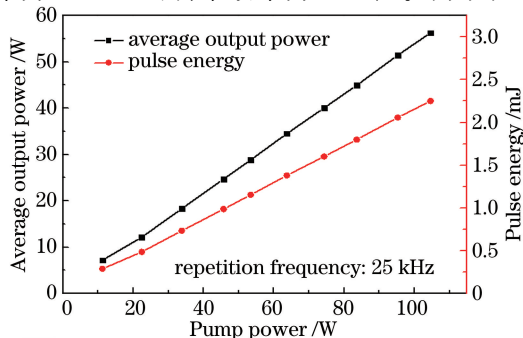


图 5 平均输出功率和脉冲能量随抽运功率的变化

Fig. 5 Variations of average output power and pulse energy with pump power

系统的端面功率密度由  $64.5 \text{ J/cm}^2$  下降到  $1.8 \text{ J/cm}^2$  以下,从而有效提高了 PCF 的端面损伤阈值。图 6 为系统连续工作 30 min 后得到的平均输出功率曲线和脉冲宽度曲线,由图 6 可知,系统具有良好的功率稳定性和脉冲波形稳定性。

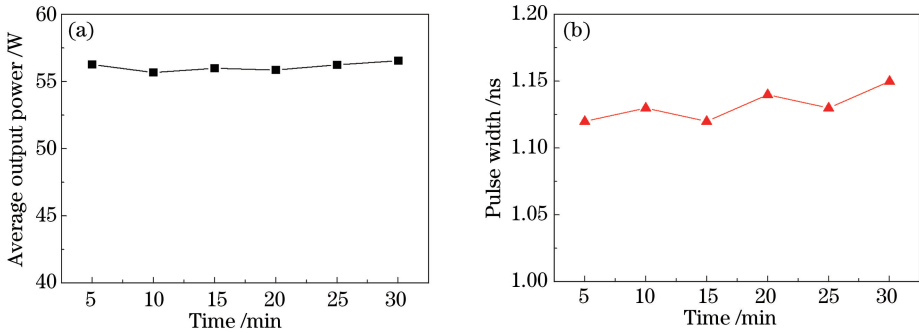


图 6 (a)平均输出功率随时间的变化;(b)脉冲宽度随时间的变化

Fig. 6 (a) Relationship between average output power and time; (b) relationship between pulse width and time

系统的平均输出功率和重复频率随时间的变化如图 6 所示,通过声光调制器对光脉冲进行调制,可以使系统在小于种子源重复频率的条件下稳定工作,且输出功率随重复频率的增大而增大。实验过程中,最大抽运功率的设定标准为:在不同重复频率条件下,当输出信号光的光谱强度比非线性效应产生的光谱强度高 20 dB 时,所对应的抽运功率为最大抽运功率。在最大抽运功率条件下,斜率效率随重复频率的增加而减小,这主要是由于随着抽运光功率的增大,增益光纤的掺杂离子逐渐达到增益饱和。由图 5、7 可知,重复频率为 25 kHz 时的斜率效率达到最大,相应的峰值功率为 2.01 MW。

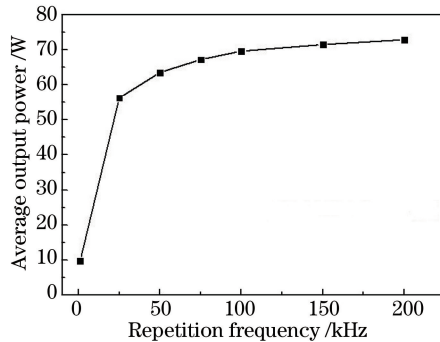


图 7 平均输出功率随重复频率的变化

Fig. 7 Relationship between average output power and repetition frequency

采用带宽为 1 GHz 的示波器对系统输出光脉冲进行了测量,光电探头的带宽为 20 GHz。当重复频率为 25 kHz 时,光脉冲宽度为 1.12 ns,放大后的光脉冲时域波形如图 8 所示。与种子源输出光脉冲宽度相比,系统光脉冲的脉冲宽度产生了一定的展宽,这是由于光脉冲在放大过程中受到非线性效应的影响,信号光在频域上展宽,展宽的光谱在光纤内传播时会产生啁啾,使得光脉冲在时域上展宽。

经过棒状 PCF 放大后,脉冲能量最大时的归一化输出光谱如图 9 所示,信号光的两侧出现了其他波长的激光光,这是由于在对光信号进行放大时,  $\text{Yb}^{3+}$  离子的发射截面在 1030 nm 处最大,在 1030 nm 处得到的光增益大于在 1064 nm 处得到的光增益;随着抽运功率的增加,1064 nm 处的光增益系数逐渐变大,抑制了 ASE 效应;继续增大抽运光功率,受激拉曼散射效应(SRS)逐渐增强,在 1125 nm 处产生了激光光,激光光随着抽运功率的增大逐渐增强(抽运功率为 75~150 W),激光光增益也随之变大,并且在 1125~1300 nm 范围内产生了高阶 SRS 激光光谱。当抽运功率达到 150 W 时,信号光强度比 SRS 激光光的强度高 20 dB,输出光束具有较高的信噪比。值得注意的是,由于光脉冲宽度为亚纳米量级,因此在放大过程中并没有产生受激布里渊散射效应<sup>[14]</sup>。

当峰值功率为 2.01 MW 时,对光脉冲进行聚焦整形,在光束的束腰位置处测量光斑,测量结果如图 10 所示。测得在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的光束质量因子( $M^2$ )分别为: $M_x^2 = 1.49, M_y^2 = 1.54$ 。可见,大模场棒状 PCF 的特殊设计可支持少模光输出,从而有效提高系统输出的光束质量。

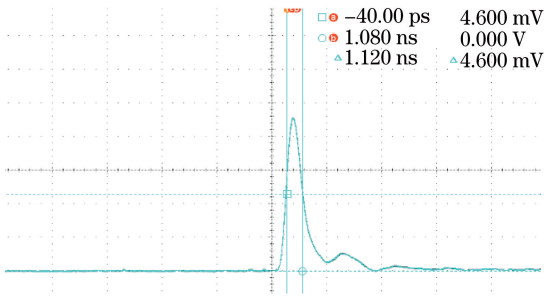


图 8 放大后的光脉冲时域波形

Fig. 8 Amplified optical pulse time domain waveform

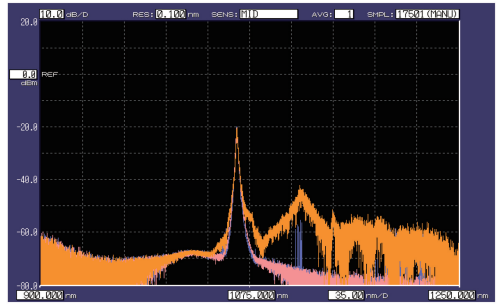


图 9 脉冲能量最大时的归一化光谱

Fig. 9 Normalized optical spectrum corresponding to the highest pulse energy

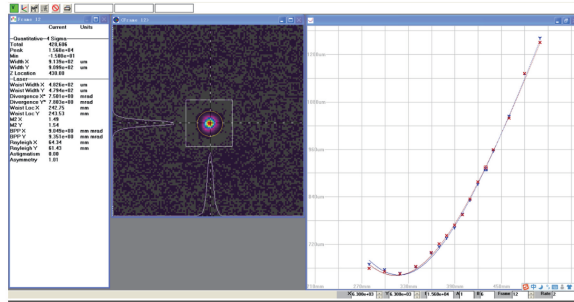


图 10 水平和垂直方向(红色: $x$ 方向;蓝色: $y$ 方向)的光束半径随 $z$ 向距离的变化

Fig. 10 Variations in beam radius measured along horizontal and vertical directions (red:  $x$  direction; blue:  $y$  direction) with distance of  $z$  direction

## 4 结 论

围绕增大 MOFA 光纤激光系统的重复频率调制范围和提高脉冲峰值功率进行了实验研究。采用对直流电驱动种子源叠加声光调制的技术对信号光进行调制,通过控制声光 Q 开关的开关时间对光脉冲进行切割调制,克服了种子源对系统重复频率的制约,使系统在低于种子源重复频率范围内稳定工作。声光调制器也可以抑制光脉冲放大过程中产生的自相位调制和四波混频等非线性效应。为了提高光脉冲的峰值功率,采用 PCF 棒对光脉冲进行放大,其超大模场有效抑制了非线性效应的产生。实验得到了脉冲宽度为 1.12 ns、峰值功率为 2.01 MW、重复频率在 1~200 kHz 范围内连续可调的脉冲,输出光束的信噪比大于 20 dB,系统实现了兆瓦级峰值功率的稳定输出。

## 参 考 文 献

- [1] Teodoro F D, Brooks C D. Multi-MW peak power, single transverse mode operation of a 100 micron core diameter, Yb-doped photonic crystal rod amplifier[J]. SPIE, 2007, 6453: 645318.
- [2] Schorstein K, Walther T. A high spectral brightness Fourier transform limited nanosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. Applied Physics B, 2009, 97(3): 591-597.
- [3] Desmoulins S, Teodoro F D. High-gain Er-doped fiber amplifier generating eye-safe MW peak-power, mJ-energy pulses [J]. Optics Express, 2008, 16(4): 2431-2437.
- [4] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. 3<sup>rd</sup> ed. San Diego: Academic Press, 2001.
- [5] Röser F, Eidam T, Rothhardt J, et al. Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. Optics Letters, 2007, 32(24): 3495-3497.
- [6] Jin Liang, Xu Li, Zhang He, et al. Optimization of large-mode-area active fiber[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 3051-3056.
- [7] Smith R C G, Sarangan A M, Jiang Z, et al. Direct measurement of bend-induced mode deformation in large-mode-area

金 亮, 徐 莉, 张 贺, 等. 大模面积双包层增益光纤优化设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3051-3056.

- fibers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4436-4443.
- [8] Teodoro D F, Brooks C D. 1.1 MW peak-power, 7 W average-power, high-spectral-brightness, diffraction-limited pulses from a photonic crystal fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(20): 2694-2696.
- [9] Rosenstein B, Shirakov A, Belker D, *et al.* 0.7 MW output power from a two-arm coherently combined Q-switched photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6416-6421.
- [10] Brooks C D, Teodoro F D. Multimegawatt peak-power, single-transverse-mode operation of a 100  $\mu\text{m}$  core diameter, Yb-doped rodlike photonic crystal fiber amplifier[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(11): 111119.
- [11] Yu Z, Malmström M, Tarasenko O, *et al.* Actively Q-switched all-fiber laser with an electrically controlled microstructured fiber[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11052-11057.
- [12] Wei T, Li J, Zhu J. Theoretical and experimental study of transient response of the Yb-doped fiber amplifier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(4): 040605.
- [13] Jin L, Zou Y, Ma X, *et al.* Simulation and optimization of pump technology on high-power fiber laser[C]. *IEEE International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM)*, 2012: 77-80.
- [14] Teodoro F D, Morais J, McComb T S, *et al.* SBS-managed high-peak-power nanosecond-pulse fiber-based master oscillator power amplifier[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2162-2164.