

百微焦级飞秒光纤激光放大系统

李 峰 杨 直* 赵 卫 李强龙 胡晓鸿 杨小君 王屹山

中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 实验研究了基于掺Yb³⁺光纤的啁啾脉冲放大(CPA)系统。利用半导体可饱和吸收体锁模光纤激光器作为种子源,采用啁啾脉冲放大技术,将波长为1030 nm的脉冲展宽到数百皮秒进行放大。采用多级的掺镱单模光纤和双包层光纤组成预放大器,主放大器采用大模场的掺镱棒状光子晶体光纤作为激光工作物质,实现了重复频率为211 kHz,功率为50 W的单模皮秒脉冲输出。通过合理地控制放大系统中每一级光纤放大器的增益以及非线性积累量,有效抑制了高能脉冲放大过程中非线性效应对脉冲时域特性的影响。采用反射式光栅对,对输出的放大脉冲进行压缩,最终获得了脉宽为887 fs的激光输出,单脉冲能量达到124 μJ,对应峰值功率为139.8 MW,该实验结果为国内首次报道基于光纤结构的百微焦级飞秒激光系统。

关键词 激光器;光子晶体光纤;啁啾脉冲放大;飞秒激光

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1202005

Hundred Micro-Joules Level Femtosecond Fiber Laser Amplification System

Li Feng Yang Zhi Zhao Wei Li Qianglong Hu Xiaohong Yang Xiaojun Wang Yishan

State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract A fiber chirped pulse amplification system based on Yb³⁺ doped fibers is demonstrated. The seeder is a mode-locked fiber laser with semiconductor saturable absorber, the chirped pulse amplification technique is applied to stretch the 1030 nm pulse to several hundred picoseconds to be amplified. The single mode picosecond pulses with average power of 50 W and repetition rates of 211 kHz are achieved by using multistage pre-amplifier consisted with Yb³⁺ doped single mode fiber amplifier and double cladding fiber amplifier and the main amplifier with a large mode area rod-typed photonic crystal fiber as the laser gain material. Properly controlled the gain and the nonlinearity in every step of the amplification system, the influence of nonlinear effects are effectively suppressed on the pulse of time domain in high energy amplification. Laser pulses with pulse duration of 887 fs are generated by a reflective grating-pair compressor, corresponding to single pulse energy of 124 μJ and peak power of 139.8 MW. This experimental result of hundred micro joules level femtosecond laser based on fiber structure is firstly reported in China.

Key words lasers; photonic crystal fiber; chirped pulse amplification; femtosecond laser

OCIS codes 320.2250; 320.7090; 320.7140; 320.7160

1 引 言

飞秒激光具有脉宽窄、峰值功率高、光谱宽度大等特点,在超快非线性光学、太赫兹波产生、飞秒化学等基础研究领域^[1]已经得到了广泛的应用。特别是大能量高功率的飞秒激光,由于其与物质相互作用时,热效应小^[2],加工孔径周围没有熔融区,对加工材料无选择性等特点,在超精细加工、微光子器件制造^[3]、医学精密手术、高密度三维光存储、纳米生物工程、纳米医学和国防激光武器等领域有着广泛的应用。因此,大能量

收稿日期: 2015-06-16; 收到修改稿日期: 2015-07-20

基金项目: 科技部仪器专项(2011YQ007501)

作者简介: 李 峰(1987—),男,硕士,实习研究员,主要从事光纤飞秒技术方面的研究。E-mail: laser_lifeng@opt.cn

*通信联系人。E-mail: yangzhi@opt.ac.cn

高功率飞秒激光引起了国内外科学家的广泛关注,已经成为研究的热点。

光纤结构的飞秒激光器,由于光纤自身的结构特性,当高功率的超短脉冲在光纤中传播时,极高的峰值功率必然会激起诸多的非线性效应,导致脉冲波形畸变^[4]。所以在光纤结构的超短脉冲系统中,要实现高能量大功率的飞秒激光输出,就需要合理的控制系统的非线性,并进行有效的色散管理。为了降低系统的非线性积累,通常采用啾啾脉冲放大(CPA)系统。同时伴随着双包层光纤以及光子晶体光纤(PCF)的出现,光纤模场直径不断增大,目前增益光纤的芯径已经达到百微米量级,极大地降低了光纤飞秒放大系统的非线性积累,有利于在光纤中产生高能飞秒激光。

基于光纤结构的飞秒啾啾脉冲放大系统的实验研究中,除了脉冲合成技术之外,目前国际上该领域获得的最高单脉冲能量是Eidam等^[5]报道的脉宽为500 fs,能量为2.2 mJ,平均功率为11 W的实验结果。在此之前,Röser等^[6]通过将脉宽展宽到2 ns进行放大,在光纤CPA系统中获得了单脉冲能量为1.45 mJ,脉宽为800 fs的高能飞秒输出。以上两个毫焦级的光纤CPA实验中均使用了两级大模场光子晶体光纤作为放大器以提升能量,而Wan等^[7]采用单级棒状光子晶体光纤作为主放大器获得了能量为0.85 mJ,800 fs的脉冲输出。国内在该领域的研究中,天津大学刘博文等^[8]报道了微焦耳量级、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器,获得了重复频率为1 MHz,脉宽为124 fs,单脉冲能量为1.56 μ J的输出;方晓惠等^[9]利用掺镱多芯光子晶体光纤实现了重复频率为1 MHz,脉宽为110 fs,功率为17.1 W的输出,对应单脉冲能量为17.1 μ J。石俊凯等^[10]采用全保偏(PM)双包层掺镱大模场面积光子晶体光纤单级放大获得了平均功率为34 W,脉宽为50 fs的超短脉冲输出,但是对应的脉冲能量只有0.8 μ J。中科院西安光机所Ding等^[11]利用5级光纤啾啾脉冲放大系统,获得了脉冲能量为12 μ J,脉宽为525 fs的激光脉冲输出。本文采用基于掺Yb³⁺光纤的啾啾脉冲放大系统,通过合理的控制系统的非线性积累和色散管理,实现了重复频率为211 KHz,功率为50 W的单模皮秒脉冲输出。利用反射式光栅对,对输出的放大脉冲进行压缩,最终获得了脉宽为887 fs的激光输出,单脉冲能量达到124 μ J,对应峰值功率为139.8 MW。本文所述的实验工作的数据结果达到的单脉冲能量和峰值功率水平在国内光纤飞秒激光器研究领域未曾看到相关的报道。

2 实验装置与理论分析

图1为本实验方案的整个光纤结构啾啾脉冲放大光学系统结构图,采用脉宽约5 ps的锁模光纤激光器作为种子源。通过采用环形器和光纤光栅组成脉冲展宽器对种子脉冲展宽,将脉冲展宽到数百皮秒再进行放大。预放大系统包括三级放大,首先是单模光纤放大器和10 μ m芯径的双包层光纤(PM 10/125)放大器,初步放大后的激光通过光纤耦合声光调制器进行降频,将激光的重复频率由52.7 MHz降低到数百千赫兹,以便在后继放大过程中提高单脉冲能量。降频后的激光脉冲再经过一级25 μ m芯径的双包层光纤(PM 25/250)放大器,输出功率达到2.5 W。预放大系统输出的激光通过隔离器输出之后采用透镜空间耦合进入棒状掺

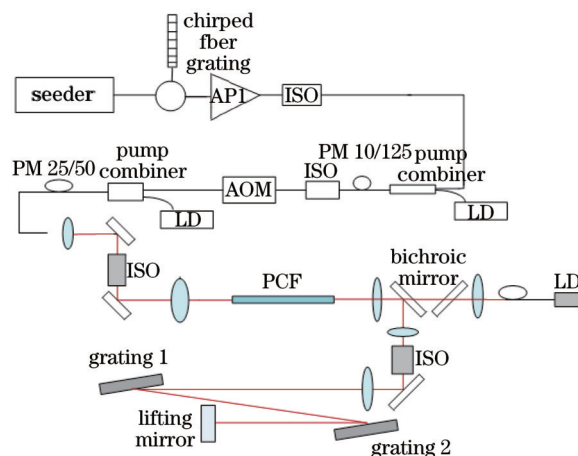


图1 啾啾脉冲放大系统图

Fig.1 Chirped pulse amplification system

镜光子晶体光纤主放大器,主放大器采用NKT公司生产的直径为1 mm,芯径为85 μm,内包层直径为260 μm,长度为0.8 m,包层对976 nm抽运光的吸收系数为15 dB/m的光子晶体光纤作为主放大工作物质,该光子晶体光纤模场面积大,有效降低了系统的非线性积累,同时光子晶体的波导结构确保了良好的单模输出特性。为了获得最大的增益以及良好的光束质量,需要对棒状光子晶体光纤进行最佳的耦合,尽量保证信号光在棒状光纤的纤芯中传输,且抽运光在内包层中被高效吸收。通过棒状光纤的放大后的输出光,经过刻线密度为1800 line/mm的反射式光栅对的色散补偿,获得飞秒激光输出。

为了有效控制系统的非线性,对系统参数进行了优化,在保证增益的情况下尽量采用较短的增益光纤以及传输光纤,来降低系统非线性的积累,确保最终输出的放大脉冲可以被有效的压缩。 B 参数是对系统非线性积累的特征,其表达式为: $B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L n_2 I(z) dz$, 其中 λ 代表波长, n_2 代表非线性折射率, L 是光纤长度, $I(z)$ 代表沿光纤长度分布的峰值强度,对放大系统的积分计算可以求出系统积累的非线性。通过对系统的所有增益光纤以及传输光纤的积分计算,得到如表1所述的整个系统优化后的非线性 B 积分的计算值,整个系统最终的 B 积分值约为10.4。

表1 系统 B 参数计算

Table 1 Calculation of system's B parameter

Amplifier stage	1st stage	2nd stage	3rd stage	Main stage
B integral value of gain fiber	0.0012697	0.04169	1.7581	5.0777
B integral value of transmission fiber	0.012518	0.163446	3.3792	0
B integral value of system	10.4339237			

同时,采用分步傅里叶法对整个放大系统的非线性传输进行了数值模拟计算,最终获得的脉冲输出的模拟结果如图2(a)所示,黑色曲线表示在最大输出能量下压缩后得到的实际脉冲形状,红色曲线表示压缩后得到的脉冲自相关曲线,黄色代表压缩后得到的脉冲相位曲线。可以发现由于系统的高阶色散的影响最终的压缩脉冲底座较大,信噪比较低,脉宽最窄为1.4 ps左右。图2(b)给出了最终模拟输出的光谱,由于 Yb^{3+} 光纤的发射谱线并不是一个平坦的发射谱,导致不同波长其增益不同,所以在宽光谱放大过程中,出现了光谱形状的不对称。图2(c)给出了模拟得到的系统的啁啾曲线,除了小的波动,啁啾几乎是正的线性啁啾,因此在合理控制系统的高阶色散的情况下,是可以将脉冲压缩到飞秒量级。

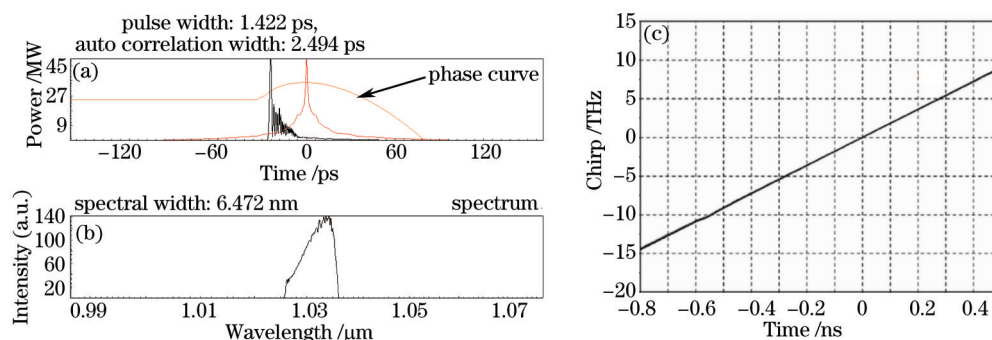


图2 放大系统的非线性传输模拟。(a) 输出脉冲; (b) 输出光谱; (c) 放大脉冲的啁啾曲线

Fig.2 Simulation of nonlinear propagation of amplifier system. (a) Output pulse; (b) output spectrum; (c) chirp curve of amplified pulse

3 实验结果与分析

种子源的输出中心波长为1032 nm,谱宽为18 nm,脉宽为5 ps,重复频率为52.7 MHz,功率为13.7 mW。将种子源输出的脉冲经过啁啾光纤光栅展宽,由于啁啾光纤光栅带宽只有10 nm,中心波长为1030 nm,所以展宽后的数百皮秒的脉冲光谱宽度就只有9~10 nm,中心波长已经变为1030 nm左右。展宽后的数百皮秒脉冲光进入多级光纤预放大器,经过一级保偏单模光纤放大器和一级保偏的10 μm芯径(PM10/125)双包层光纤放大器的放大,功率达到2 W左右,通过声光调制器降频到211 kHz,再通过一级保偏25 μm芯径(PM25/250)双包层光纤放大器,达到输出功率为2.5 W的数百皮秒的激光。由于 Yb^{3+} 光纤的发射谱线并不是一个

平坦的发射谱,不同波长其增益不同,所以在宽光谱放大过程中,导致了光谱宽度的窄化。预放大过程中可以看到,随着激光功率以及脉冲能量的不断提升,预放大输出的光谱由于增益窄化效应,最终进入主放大的光谱宽度就只有 6 nm 左右。

全光纤结构的预放大器输出的功率为 2.5 W,重复频率为 211 kHz 的激光通过透镜的准直聚焦之后进入作为主放大器的棒状 PCF,经过聚焦镜耦合调节,将信号光能量尽量集中到棒状光纤的纤芯中。通过 CCD 可以观察到信号经过耦合调节好之后,信号光大部分的能量都集中在纤芯中,这样可以实现最大的放大效率以及最佳的光束质量输出。图 3 给出了 CCD 上采集到的光斑图样,可以看到 CCD 上呈现出光子晶体光纤的端面像,且大部分信号光能约束于纤芯中传输。

主放大器采用后向抽运,使用 200 W 带尾纤输出的 LD 作为抽运源,抽运光中心波长为 976 nm。由于在高功率下工作,需要对主放大器的增益介质进行水冷,将棒状光纤放置于水冷板的 V 型槽中进行冷却。图 4 给出了棒状光子晶体光纤随抽运驱动电流的增加的功率输出曲线。由图 4 可以看出,在最大抽运电流为 35 A 时,主放大器输出激光功率达到 50 W,对应单脉冲能量达到 237 μJ 。

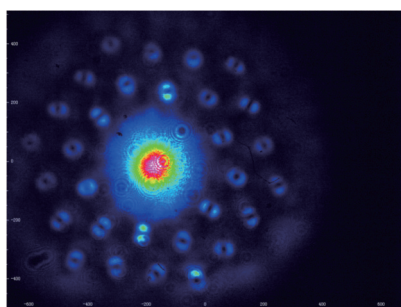


图 3 棒状光子晶体光纤信号光耦合调节好之后 CCD 上的成像图

Fig.3 Image on CCD after coupling signal laser into rod-type photonic crystal fiber

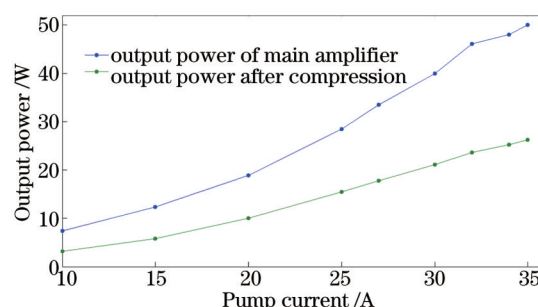


图 4 主放大器及压缩器输出功率随抽运电流的变化

Fig.4 Output power of main amplifier and compressor as a function of pumping current

主放大器输出的数百皮秒激光通过隔离器之后进入光栅对压缩器。但是由于棒状光子晶体光纤的退偏以及隔离器的损耗,在 35A 的抽运驱动源电流条件下,主放大器进入压缩器的激光功率降低为 37.18 W。压缩器采用反射式光栅对进行色散补偿,光栅刻线密度为 1800 line/mm,压缩后输出光功率为 26.23 W,对应的单脉冲能量为 124 μJ 。光束四次通过光栅的衍射效率达到 70.5%。同时对棒状光子晶体光纤放大输出的光斑以及压缩后的光斑模场分布进行了测量,如图 5 所示,从 CCD 采集图样可以看到输出光斑均具有单模输出特性。由于主放大输出的光斑经过两个透镜的准直,准直光学系统存在的象差以及光栅对的非严格平行导致光斑的椭圆度有一定增加[如图 5(b)所示]。

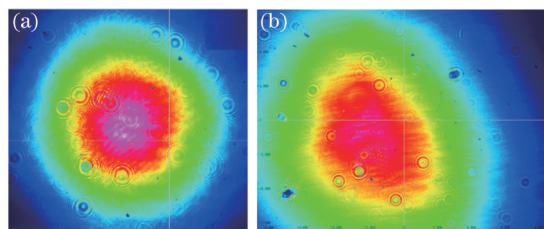


图 5 输出光斑测量。(a) 主放大输出光斑测试; (b) 压缩器输出的光斑测试

Fig.5 Output beam profile. (a) Beam profile of main amplifier; (b) beam profile after compression

图 6(a)给出了压缩输出的脉冲自相关曲线,通过 Lorentz 拟合自相关曲线得到压缩脉宽为 1.334 ps。图 6(b)为测量得到的压缩后的光谱,谱宽约 6 nm,对于洛伦兹线型脉冲,根据变换极限公式 $\Delta\nu \times \Delta t = 0.221$,其极限脉冲宽度为 130 fs,可见压缩脉冲宽度还没有达到变换极限。其主要原因是采用的光栅刻线密度大,致使压缩器引入的高阶色散大,导致最终压缩的脉冲因无法补偿高阶色散而带有较大的拖尾底座。另外,光纤 CPA 系统的非线性积累也比较大,在主放大阶段,随着放大功率的不断增强,脉冲中积累的非线性相移也在提高,导致光谱出现了比较明显的调制,频域的变化最终导致时域的脉冲宽度难以得到精确的色散补偿。

因此该系统还需要进一步优化,以期得到更窄的脉冲输出。

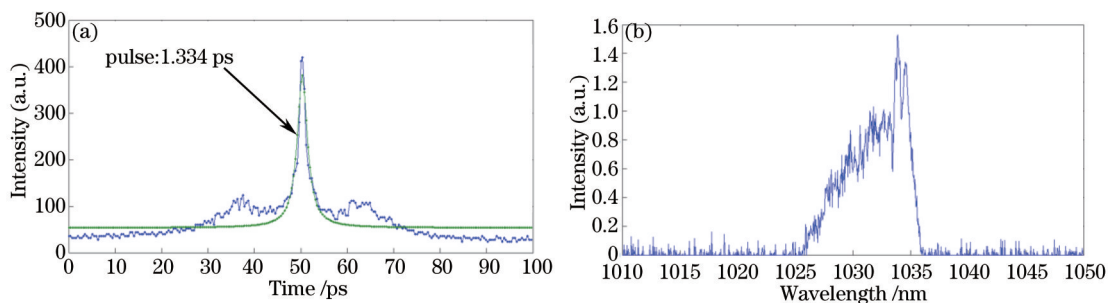


图6 压缩后的脉冲自相关曲线以及光谱。(a) 脉冲自相关曲线;(b) 压缩后的输出光谱

Fig.6 Auto correlation curves of pulses and spectrum after compression. (a) Auto correlation curves of pulses;
(b) spectrum of compressed pulses

为了进一步压缩脉冲,改用折射率非均匀变化的啁啾光纤光栅作为展宽器,该光栅的主要参数为:中心波长为 1030 ± 1 nm,反射带宽为 10 nm,反射率大于 70%,色散为 -100 ps/nm,以此补偿由于压缩光栅对引入的正的三阶色散,通过这样的三阶色散补偿,压缩后输出的脉宽如图 7 所示,达到 887 fs,对应的脉冲峰值功率达到 139.8 MW。通过进一步的系统色散管理以及非线性管理,该 CPA 系统可以得到更窄的脉冲输出。

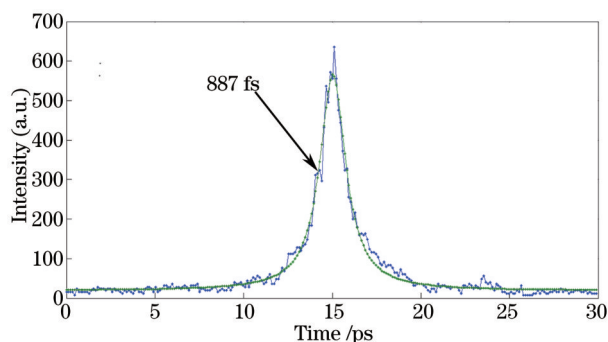


图7 三阶色散补偿后得到的脉冲输出自相关曲线

Fig.7 Auto correlation curves of pulses after compensating third order dispersion

4 结 论

实验研究了光纤结构的大能量飞秒激光系统。采用啁啾脉冲放大技术,部分地控制了系统的非线性积累;利用声光调制器降低脉冲重复频率,提高了单脉冲能量;采用棒状光子晶体光纤,在减小非线性积累的同时实现了高能超短脉冲输出;通过光栅对压缩器结合非线性啁啾光纤光栅,最终该光纤 CPA 系统实现了 $124 \mu\text{J}$, 887 fs 的高能超短脉冲输出。据本文所知,该实验结果为国内首次在光纤结构的 CPA 系统中获得百微焦级飞秒超短脉冲,是目前国内单脉冲能量和峰值功率最高的光纤飞秒激光器。同时,该系统可以再进一步优化,通过合理的控制系统的非线性的积累以及主动的色散管理,可实现更窄的接近转换极限的飞秒激光脉冲输出。

参 考 文 献

- 1 M E Fermann, A Galvanauskas, G Sucha. Ultrafast Laser: Technology and Application[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2002, 323-765.
- 2 Rudolf Weber, Thomas Graf, Peter Berger, *et al.*. Heat accumulation during pulsed laser materials processing[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11312-11324.
- 3 Ik-Bu Sohn, Man-Seop Lee. Nano-structuring of transparent materials by femtosecond laser pulses[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2005, 9(1): 1-5.
- 4 D N Schimpf, D Müller, S Hädrich, *et al.*. Control of nonlinearity in fiber CPA system by pulse-shaping[C]. OSA/ASSP, 2007: TuC2.
- 5 Tino Eidam, Jan Rothhardt, Fabian Stutzki, *et al.*. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power[J]. Opt Express,

- 2011, 19(1): 255–260.
- 6 F Röser, T Eidam, J Rothhardt, *et al.*. Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. *Opt Express*, 2007, 32(24): 3495–3497.
- 7 Peng Wan, Lih-Mei Yang, Jian Liu. All fiber-based Yb-doped high energy, high power femtosecond fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2013, 21(24): 29854–29859.
- 8 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with microjoules 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.
- 9 Fang Xiaohui, Hu Minglie, Liu Bowen, *et al.*. Hundreds of megawatts peak power multi-core photonic crystal fiber laser amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2366–2370.
方晓惠, 胡明列, 刘博文, 等. 百兆瓦峰值功率的多芯光子晶体光纤飞秒激光放大系统[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2366–2370.
- 10 Shi Junkai, Chai Lu, Zhao Xiaowei, *et al.*. Generation of 34 W high power femtosecond pulses by single-stage direct amplification in an all-photonic-crystal-fiber laser system[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0202001.
石俊凯, 柴路, 赵晓薇, 等. 全光子晶体光纤单级放大产生 34 W 高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0202001.
- 11 Guanglei Ding, Xin Zhao, Yishan Wang, *et al.*. Ultra-short pulsed ytterbium doped fiber laser and amplifier[J]. *Chin Opt Lett*, 2006, 4(4): 222–224.

栏目编辑：宋梅梅