

高精度同步飞秒和皮秒脉冲产生技术

钱富琛¹, 郭政儒², 董文乾¹, 胡晓蕾¹, 陈飞¹, 郝强^{1*}, 曾和平^{2,3}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;

³济南量子技术研究院, 山东 济南 250101

摘要 设计了一款重复频率精确锁定的飞秒脉冲和皮秒脉冲双路输出光纤激光器。该激光器采用输出为近傅里叶变换极限的皮秒脉冲作为种子源,其脉冲宽度为 21 ps,重复频率为 40 MHz。该种子脉冲经 1:1 分束后,分别注入飞秒和皮秒脉冲放大链路中。通过有效管理脉冲放大过程中的非线性色散,实现了宽带光谱飞秒脉冲和窄带光谱皮秒脉冲的同步输出。其中,飞秒脉冲放大链路是将皮秒种子脉冲先经过单模光纤功率放大器,然后在 50 m 保偏单模光纤中利用自相位调制效应进行光谱展宽,光谱展宽至 6.12 nm;进一步采用光栅对去啁啾后,得到了脉冲宽度为 483 fs、平均功率为 210 mW 的飞秒脉冲输出。皮秒脉冲放大链路的皮秒种子脉冲经过功率预放大、脉冲选单至 10 MHz 后,由 200/40 光子晶体光纤主放大器进行功率提升,得到了脉冲宽度为 25 ps、单脉冲能量为 1.4 μ J、光谱宽度为 0.86 nm 的皮秒脉冲输出。此外,通过采用压电陶瓷精确控制和步进电机范围控制相结合的方式,实现了对皮秒种子源谐振腔重复频率的长时间精确锁定。激光器开启并达到热平衡后,8 h 测量时间内重复频率峰峰值抖动小于 3 mHz,标准偏差为 0.31 mHz。

关键词 激光器; 光纤激光器; 超短脉冲同步; 锁模激光器; 非线性效应

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1001001

High-Precision Synchronous Femtosecond and Picosecond Pulse Generation

Qian Fuchen¹, Guo Zhengru², Dong Wenqian¹, Hu Xiaolei¹, Chen Fei¹,
Hao Qiang^{1*}, Zeng Heping^{2,3}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai, 200062, China;

³Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan, Shandong 250101, China

Abstract We demonstrate a dual-output ultrashort pulse fiber laser with their repetition rate precisely locked. This laser source employs a mode-locked picosecond laser capable of delivering near transform-limited pulses with 21 ps duration at a repetition rate of 40 MHz. After the seed pulse is split 1:1, it is injected into the femtosecond and picosecond pulse amplification links respectively. By effectively managing the nonlinearity and dispersion in the pulse amplification process, the synchronous output of broadband spectral femtosecond pulse and narrowband spectral picosecond pulse is realized. In the path of femtosecond pulses, a length of 50 m polarization-maintaining single-mode fiber is used to promote the spectral broadening of amplified pulses, and its spectral width is broadened to 6.12 nm owing to the effect of self-phase modulation. Then, a pair of bulk gratings is applied to de-chirp the pulse to 483 fs duration with 210 mW average power. For the other optical path, the seed pulses are firstly pre-amplified and then selected to 10 MHz repetition rate. The 200/40 photonic crystal fiber acts as the gain fiber in main amplifier to further boost the pulses, generating 25 ps pulse duration with 1.4 μ J energy and 0.86 nm spectral width. In addition, the repetition rate long-term stabilization is realized by the combination of piezoelectric translator for precise control and stepping motor for range control. When laser system warms up, the peak-to-peak fluctuation of pulse repetition rate is less than 3 mHz within 8 h, and the corresponding standard deviation is calculated to be

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-04-30; 录用日期: 2020-05-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)

* E-mail: qianghao@usst.edu.cn

0.31 mHz.

Key words lasers; fiber laser; ultra-short pulse synchronization; mode-locked laser; nonlinear effects

OCIS codes 140.3510; 140.7090; 140.4480; 140.3518

1 引 言

随着超短脉冲激光技术和应用的不断发展,其在精密测量、微纳加工、非线性光谱显微成像、物质成分鉴定等领域已大显身手^[1-4]。相比长脉冲激光,超短脉冲激光同时拥有高时间分辨、高频谱分辨、高峰值功率等特点,已经成为多个科研和工业领域的主要工具^[5-7]。激光诱导击穿光谱(LIBS)是一种通过探测激光诱导等离子体特征光谱,由特征峰的位置和强度信号获取物质成分和含量的快速分析技术。2001年,Angel等^[8]使用中心波长为1064 nm、脉冲宽度为1.3 ps和140 fs的两路超短脉冲,对铜表面进行了垂直相交双脉冲激光的诱导击穿光谱测量,通过预激发方式,LIBS信号相比单脉冲激发增强了40倍。2010年,Balachninaite等^[9]利用紫外257.5 nm和近红外1030 nm双脉冲在不锈钢上进行共线激光诱导击穿光谱测量,当脉冲间延迟小于200 ps时,相比单脉冲激发实现了3~5倍的信号增强。可以看出,通过控制两路脉冲的脉宽和延时可以显著提升LIBS信号的强度。

一般地,LIBS实验通常使用Nd:YAG固体激光器作为光源^[10],但是这种方案空间光路复杂、稳定性有待提升。光纤激光器具有稳定性好、结构紧凑、性价比高等特点,已经成为全固态光源的强力竞争者^[11-12]。对于超短脉冲光纤激光器而言,非线性和色散管理是光谱控制、脉冲信噪比提升的关键难点。1991年,Fermann等^[13]采用掺Nd³⁺单模光纤首次搭建了被动锁模光纤激光器,通过进行腔内色散补偿,得到了中心波长为1064 nm、脉冲宽度为125 fs的脉冲输出。当功率提升后,由于光纤的纤芯面积较小,较高的光能量密度极易产生多种非线性效应,影响脉冲信噪比。近年来,大模场增益光纤制作工艺不断改进,其与啁啾脉冲放大(CPA)和分离脉冲放大(DPA)等技术进一步结合,超短脉冲在光纤放大过程中的非线性效应得到了有效抑制,极大地提高了光纤超短脉冲激光器的输出功率。2010年Eidam等^[14]使用CPA技术,通过光栅对将脉冲宽度为200 fs的脉冲展宽至800 ps,功率放大后进行脉宽压缩,得到了重复频率为78 MHz、输出功率为830 W、脉冲宽度为630 fs的超短脉冲输出。然

而,CPA技术对窄线宽的皮秒种子脉冲并不适用。2016年Lesparre等^[15]对1.1 ps的窄线宽种子脉冲引入负色散,利用DPA技术有效抑制了脉冲放大过程中的非线性效应,通过Yb:YAG单晶光纤放大器进行激光放大,获得了重复频率为12.5 kHz、脉冲宽度为6 ps、单脉冲能量高达2 mJ的超短脉冲输出,相应峰值功率为320 MW。为了获得高质量、高平均功率的超短脉冲,光纤激光器中使用大模场光子晶体光纤放大器已成为趋势。2004年Limpert等^[16]通过使用纤芯直径为40 μm的光子晶体光纤,有效抑制了自相位调制(SPM)引起的光谱展宽,实现了平均功率为48 W、光谱宽度小于1 nm的超短脉冲输出,但是此方案种子光采用空间耦合的方式进入光子晶体光纤,不仅结构复杂,而且易受环境因素影响。2012年Stutzki等^[17]搭建了主振荡功率放大(MOPA)结构的光纤激光器,选用纤芯直径为135 μm的棒状光子晶体光纤作为主放大器增益介质,最终获得了重复频率为5 kHz、平均功率为130 W、单脉冲能量为26 mJ的脉冲输出,然而该方案脉冲宽度为纳秒量级(60 ns)。在国内,2018年北京航天控制仪器研究所搭建了MOPA结构光纤激光器^[18],主功率放大器的增益光纤采用纤芯为30 μm的大模场掺镱光纤,最终实现了重复频率为100 kHz、单脉冲能量为3 mJ、脉冲宽度为203 ns的激光输出。2019年,华中科技大学基于国产100/400双包层掺镱光纤,搭建了MOPA纳秒调Q光纤激光器,实现重复频率为30 kHz、单脉冲能量为17.5 mJ的激光输出^[19],但是此方案容易产生寄生振荡,需要对光纤输出端进行优化处理。为了进一步实现高功率光纤激光器的实际应用,2020年贺明洋等^[20]基于自相似光纤激光放大技术,使用纤芯直径为40 μm的光子晶体光纤作为主放大器,实现了重复频率为40 MHz、脉冲宽度为50 fs、峰值功率为17 MW的超短脉冲输出。该系统通过光纤热管理和数字监控系统的配合,大幅度地提升了稳定性和鲁棒性,推动了高功率飞秒光纤激光器的实际应用。

本文采用同一个皮秒光纤种子源,通过有效管理脉冲在光纤放大链路上的非线性和色散效应,最终得到了宽带光谱飞秒脉冲和高功率窄带光谱皮秒脉冲同步输出,为后续飞秒-皮秒高能量固体放大以

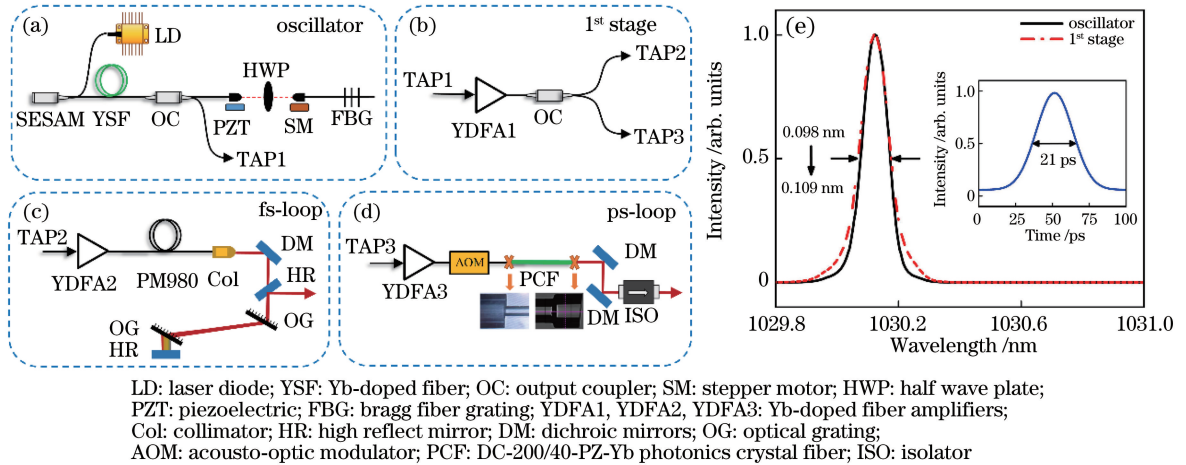
及光学倍频^[21-22]提供了优质的同步种子脉冲。实验上,通过进一步锁定光纤振荡器的重复频率,有效降低了输出脉冲的时间抖动。

2 实验材料及装置

皮秒种子源采用驻波腔结构,以可饱和吸收镜和光纤光栅(FBG)分别作为谐振腔两端的反射镜。其中,FBG的工作波长为 1030 nm,反射带宽和反射率分别为 0.2 nm 和 99%。使用 980/1064 nm 的波分复用器(WDM)将中心波长为 976 nm 的抽运光耦合入单模掺镱增益光纤。该增益光纤的纤芯直径为 6 μm 、数值孔径为 0.11,在波长 975 nm 处的吸收率为 250 dB/m。种子源输出的皮秒脉冲经过第一级单模光纤放大器(YDFA1)进行初步能量提升,随后由 1:1 分光比的分束器将其分成两束(TAP2 和 TAP3),分别注入飞秒放大链路和皮秒放大链路。

在飞秒放大链路中,皮秒种子脉冲依次经过第

二个单模光纤放大器(YDFA2)和 50 m 的单模保偏光纤,分别进行功率提升和光谱展宽。最后,经过准直输出后的皮秒脉冲由光栅对进行去啁啾。在皮秒放大链路中,为了抑制单脉冲能量提升过程中引入过多的光谱畸变,皮秒脉冲经 YDFA3 进行光放大后,再利用光纤耦合声光调制器(AOM)进行脉冲选单,实现皮秒脉冲重复频率可调。主放大器选用纤芯直径为 40 μm 、长度为 1.2 m 的双包层掺镱保偏光子晶体光纤(DC-200/40-PZ-Yb, NKT, Pump absorption @ 976 nm; 10 dB/m)作为增益介质^[16],可以有效地抑制皮秒脉冲放大过程中的光谱展宽和畸变,获得窄线宽、高峰值功率的线偏振激光输出。光子晶体光纤与合束器尾纤(纤芯直径为 10 μm)的熔接损耗为 0.7 dB。通过对光子晶体光纤输出端进行了塌缩和切斜角处理,有效提升了光纤端面的抗光致损伤能力,并抑制了端面回返光造成的自激振荡。最后,由二向色镜滤除残余泵浦光,由隔离器进行逆向光隔离。



LD: laser diode; YSF: Yb-doped fiber; OC: output coupler; SM: stepper motor; HWP: half wave plate; PZT: piezoelectric; FBG: bragg fiber grating; YDFA1, YDFA2, YDFA3: Yb-doped fiber amplifiers; Col: collimator; HR: high reflect mirror; DM: dichroic mirrors; OG: optical grating; AOM: acousto-optic modulator; PCF: DC-200/40-PZ-Yb photonics crystal fiber; ISO: isolator

图 1 实验装置图。(a)谐振腔;(b)第一级掺镱光纤放大器 YDFA1;(c)飞秒放大链路;(d)皮秒放大链路;(e)谐振腔和 YDFA1 的输出光谱

Fig. 1 Experimental setup. (a) Laser oscillator; (b) first stage of Yb-doped fiber amplifier; (c) femtosecond laser amplification loop; (d) picosecond laser amplification loop; (e) spectrum for the oscillator and the YDFA1

实验中通过压电陶瓷精密调节结合一维步进电机大范围补偿的方式,对种子源的光学腔长进行控制。其中,压电陶瓷的最大伸缩量为 110 μm 、步进精度为 2.5 nm,步进电机的量程为 12.7 mm、步进精度小于 30 nm。

3 实验结果及分析

如图 1(b)所示,皮秒种子源的重复频率为 40.37 MHz,光谱宽度为 0.098 nm(实线),谐振腔脉冲宽度为 21 ps(插图),对应的时间带宽积为

0.582。YDFA1 将脉冲平均功率提升至 65.2 mW,如图 1(b)中的虚线所示,光谱宽度为 0.109 nm,该放大器引入的光谱展宽并不明显。光纤分束器将皮秒脉冲分成 27.8 mW(TAP2)和 30.1 mW(TAP3)两束,分别注入飞秒放大链路和皮秒放大链路。

图 2(a)显示了皮秒种子脉冲经过 YDFA2 和长度为 50 m 的 PM980 光纤后,光谱展宽与 YDFA2 中半导体激光器抽运功率的关系。当抽运功率分别为 141.1、307.5、432.8 mW 时,相应的光谱宽度依次为 2.23、4.46、6.12 nm。当抽运功率为 432.8 mW 时,

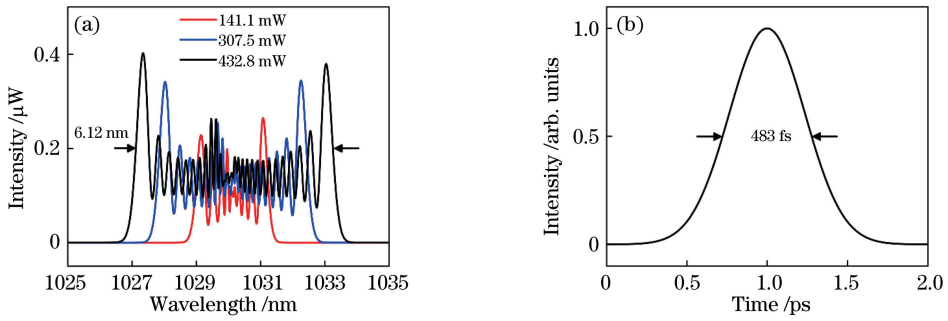


图 2 飞秒放大链路输出参数。(a)在不同抽运功率下的光谱宽度;(b)去啁啾后的脉冲自相关曲线
Fig. 2 Output characters of femtosecond laser amplifier. (a) Spectral width at different pump powers;
(b) autocorrelation trace of dechirped pulse

对皮秒脉冲去啁啾,如图 2(b)所示,得到了高斯拟合后的脉冲宽度为 483 fs、平均功率为 210 mW 的飞秒脉冲输出。

在皮秒放大链路中,皮秒脉冲经 YDFA3 进行功率放大后由 AOM 选频至 10 MHz,选频后脉冲的平均功率为 50.9 mW。其中,皮秒脉冲的光谱宽度展宽较为明显。通过进一步优化有源光纤和无源光纤长度,选频后脉冲的光谱宽度为 0.41 nm,如图

3(a)虚线所示。采用双包层光子晶体光纤放大器对该皮秒脉冲进行功率的进一步放大。当抽运光功率为 38.5 W 时,放大器的输出功率为 13.6 W、斜率效率为 35.3%,相应的光谱宽度为 0.86 nm。由于脉冲光谱在频域上的变化,引起其时域上的展宽,如图 3(a)插图所示,脉冲宽度为 25 ps。图 3(b)显示了光谱宽度与输出功率的关系,随着抽运功率的增加,光谱宽度与输出功率均呈线性增加。

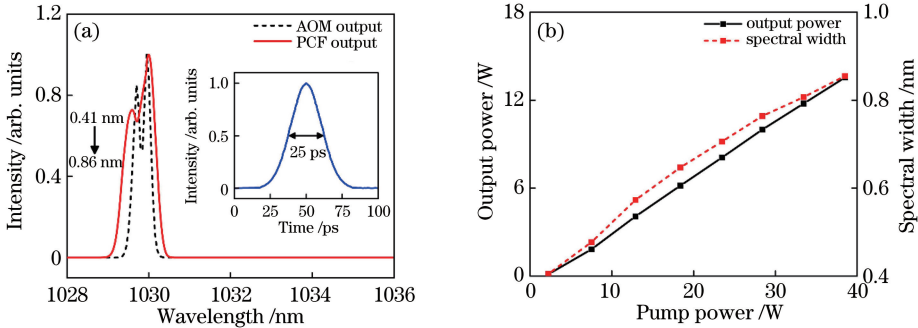


图 3 皮秒放大链路输出参数。(a)输出功率 13.6 W 时,脉宽与光谱以及声光调制器选频后的光谱;
(b)输出功率、光谱宽度与抽运功率的关系

Fig. 3 Output characters of picosecond laser amplifier. (a) Pulse duration and spectrum at 13.6 W output power and the spectrum after AOM; (b) relationship between output power, spectral width and pump power

为了降低种子脉冲的时间抖动,实验通过压电陶瓷的伸缩变化精密调节谐振腔几何腔长,锁定了锁模激光器的重复频率。其中,压电陶瓷在 50 V 工作电压变化下可以实现约为 342 Hz 的重复频率调节。当重复频率漂移大于 342 Hz 时,步进电机对重复频率提供 171 Hz 的粗补偿,以减少压电陶瓷的伸缩量。其中,步进电机的量程可以实现最大为 135 kHz 的重复频率调节范围,有利于实现谐振腔重复频率的长期锁定。图 4 显示了激光器从开机后,10 h 范围内重复频率的锁定情况。在前 2 h 内,由于激光器内部未达到热平衡,且与周围环境的温度存在对流,重复频率在 ± 30 mHz 范围内抖动,相

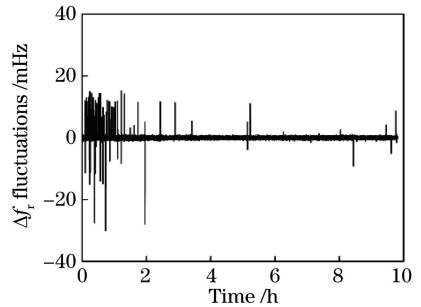


图 4 谐振腔重复频率锁定抖动曲线
Fig. 4 Resonant cavity repetition frequency locked jitter curve

应的标准偏差为 1.60 mHz;激光器预热 2 h 后,其

重复频率峰峰值抖动基本小于 3 mHz, 仅偶尔出现 10 mHz 的抖动。第 2~10 h 内重复频率抖动的标准偏差为 0.31 mHz。

4 结 论

本文设计了一种重复频率锁定、飞秒-皮秒双脉冲同步输出的光纤激光器。其中, 飞秒脉冲重复频率为 40 MHz、单脉冲能量为 5.2 nJ、脉冲宽度为 483 fs; 皮秒脉冲重复频率在 1 kHz~40 MHz 连续可调, 当重复频率为 10 MHz 时, 平均功率可达 13.6 W, 光谱宽度为 0.86 nm。系统的光纤链路均采用保偏光纤, 有效提高了激光器的抗环境干扰能力。通过采用压电陶瓷精确控制和步进电机范围控制相结合的方式, 实现了对皮秒种子源谐振腔重复频率的长时间精确锁定。当激光器自身达到热平衡后, 重复频率抖动峰峰值小于 3 mHz, 标准偏差为 0.31 mHz。该飞秒-皮秒双路同步输出脉冲后续可分别进行 CPA 与 DPA 结合的大模场光子晶体光纤放大^[23]以及 2~3 级的高能量固体放大^[24], 将脉冲能量提升至 mJ 量级, 实现高精度同步脉冲 LIBS 检测。

参 考 文 献

- [1] Rohwetter P, Yu J, Méjean G, et al. Remote LIBS with ultrashort pulses: characteristics in picosecond and femtosecond regimes [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2004, 19(4): 437-444.
- [2] Wang Y L, Yang L H, Lin J R, et al. Absolute distance measurement based on coherent detection by femtosecond optical frequency comb [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0112003.
王一霖, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 基于飞秒光学频率梳相关探测的绝对测距 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0112003.
- [3] Hu X B, Hao Q, Guo Z R, et al. Dicing of sapphire wafer with all-fiber picosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102016.
胡小豹, 郝强, 郭政儒, 等. 全光纤皮秒激光切割蓝宝石晶圆的实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102016.
- [4] Zheng S K, Yang K W, Ao J P, et al. Advances in fiber laser sources for coherent Raman scattering microscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508008.
郑世凯, 杨康文, 敖建鹏, 等. 光纤式相干拉曼散射成像光源研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508008.

- [5] Wei Z Y. The 2005 Nobel prize in physics and optical frequency comb techniques [J]. *Physics*, 2006, 35(3): 213-217.
魏志义. 2005 年诺贝尔物理学奖与光学频率梳 [J]. *物理*, 2006, 35(3): 213-217.
- [6] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, 288(5466): 635-640.
- [7] Jia Y, Zhao N J, Liu W Q, et al. Continuous online detection method of heavy metals in water based on LIBS technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0611001.
- [8] Angel S M, Stratis D N, Eland K L, et al. LIBS using dual- and ultra-short laser pulses [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 369(3/4): 320-327.
- [9] Balachnaitė O, Baskevicius A, Stankeviciūtė K, et al. Double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy with 1030 and 257.5 nm wavelength femtosecond laser pulses [J]. *Lithuanian Journal of Physics*, 2010, 50(1): 105-110.
- [10] Elsayed K, Imam H, Harfoosh A, et al. Design and construction of Q-switched Nd:YAG laser system for LIBS measurements [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 130-135.
- [11] Yu X, Luo J Q, Xiao X S, et al. Research progress of high-power ultrafast fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508007.
余霞, 罗佳琪, 肖晓晟, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508007.
- [12] Lu Y F, Wang Y, Liu B, et al. 1.5 MW peak power, fiber-solid hybrid amplification MOPA lasers [J]. *Chinese Journal of 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.
- [13] Fermann M E, Hofer M, Haberl F, et al. Additive-pulse-compression mode locking of a neodymium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(4): 244-246.
- [14] Eidam T, Hanf S, Seise E, et al. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(2): 94-96.
- [15] Lesparre F, Gomes J T, Délen X, et al. Yb:YAG single-crystal fiber amplifiers for picosecond lasers using the divided pulse amplification technique [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1628-1631.
- [16] Limpert J, Liem A, Reich M, et al. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier [J]. *Optics Express*,

- 2004, 12(7): 1313-1319.
- [17] Stutzki F, Jansen F, Liem A, et al. 26 mJ, 130 W Q-switched fiber-laser system with near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Letters, 2012, 37(6): 1073-1075.
- [18] Li P, Shi H X, Fu C, et al. High power nanosecond pulsed ytterbium-doped fiber laser for laser cleaning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 121406.
李磐, 师红星, 符聪, 等. 激光清洗用高功率纳秒脉冲掺镱光纤激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121406.
- [19] Wang S J, Zhang Z L, Cao C, et al. Nanosecond pulse laser output with average power of 761 W and pulse energy of 17.5 mJ based on domestic fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1215001.
王世杰, 张志伦, 曹驰, 等. 利用国产光纤实现平均功率 761 W、脉冲能量 17.5 mJ 纳秒脉冲激光输出[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1215001.
- [20] He M Y, Li M, Yuan S, et al. High-power femtosecond self-similar fiber amplification system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0308001.
贺明洋, 李敏, 袁帅, 等. 高功率飞秒自相似光纤激光放大系统[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0308001.
- [21] Huang P, Gan Z B, Li W Q, et al. Four-outputs Nd: glass pump source for large aperture Ti:sapphire amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0801001.
黄培, 甘泽彪, 李文启, 等. 用于大口径钛宝石放大器的四路钕玻璃抽运源[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0801001.
- [22] Lin H Y, Wu M Y, Sun D, et al. Research progress of green lasers based on quasi-phase-matched intracavity frequency doubling in PPMgLN[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 190001.
林洪沂, 吴铭钰, 孙栋, 等. 准相位匹配 PPMgLN 腔内倍频绿激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 190001.
- [23] Guichard F, Zaouter Y, Hanna M, et al. High-energy chirped- and divided-pulse Sagnac femtosecond fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 89-92.
- [24] Zhao M, Hao Q, Guo Z R, et al. Compact fiber-solid picosecond laser source with kilohertz repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401010.
赵明, 郝强, 郭政儒, 等. 结构紧凑的 kHz 重复频率光纤-固体皮秒激光光源[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401010.