

高 峰 值 功 率 光 纤 脉 冲 激 光 系 统

向祥军^{1,2,3}, 李剑彬¹, 周丹丹¹, 张帆¹, 康民强¹, 邓颖^{1,3*}, 粟敬钦^{1,2}, 郑奎兴¹, 朱启华^{1,2,3}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900;

³IFSA 协同创新中心上海交通大学, 上海 200240

摘要 报道了一种基于大模场光子晶体光纤放大的高功率飞秒脉冲激光系统。该激光器系统采用光纤啁啾脉冲放大结构, 种子源采用重复频率为 40 MHz, 脉冲宽度为 500 fs, 输出功率为 10 mW 的光纤激光器。利用体布拉格光栅(VBG)将脉冲展宽至 500 ps, 经过多级放大并利用声光调制器降频为 500 kHz, 然后采用大模场纤芯直径为 40 μm 和 85 μm 光子晶体光纤作为功率放大器, 最后采用 VBG 压缩脉宽至 767 fs, 得到平均功率为 104 W 的激光输出, 其中心波长为 1030 nm, 实现了峰值功率为 0.271 GW 的近衍射极限激光功率输出。

关键词 激光器; 光纤放大器; 高功率; 啁啾脉冲放大; 超短脉冲

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0601002

High-Peak-Power Fiber Pulse Laser System

Xiang Xiangjun^{1,2,3}, Li Jianbin¹, Zhou Dandan¹, Zhang Fan¹, Kang Minqiang¹,
Deng Ying^{1,3}, Su Jingqin^{1,2}, Zheng Kuixing¹, Zhu Qihua^{1,2,3}

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China;

³Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract An ultrashort pulse laser system based on ultra-large-mode-field fiber amplification is reported. The laser system adopts fiber chirped pulse amplification structure. The pulses with 500 fs are stretched to 500 ps by volume Bragg grating (VBG). The seed laser with average output power of 10 mW and repetition of 40 MHz is amplified by Yb-doped fiber amplifier. The repetition is adjusted to 500 kHz through the acousto-optic modulator. Then we use the large-mode field core diameters of 40 μm and 85 μm photonic crystal fibers as power amplifiers. Finally the laser with center wavelength of 1030 nm is compressed by VBG. The average output power is 104 W, and the near-diffraction-limit 767 fs pulse with maximum peak power of 0.271 GW is achieved.

Key words lasers; fiber amplifier; high-peak-power; chirped pulse amplification; ultrashort pulse

OCIS codes 140.3510; 140.4480; 140.3280; 140.7090

1 引 言

目前高功率的固体激光器已实现拍瓦级的激光功率输出^[1-2]。但这类固体激光装置体积庞大,

而光纤结构激光器具有损耗低、体积小、结构灵活紧凑、易于维护、热效应低、效率高、光束质量好等诸多优点^[3], 在工业领域得到了广泛的关注和应用。相比连续激光, 超短脉冲激光具有更高的峰值功率, 因

收稿日期: 2017-10-18; 收到修改稿日期: 2017-11-22

基金项目: 中国工程物理研究院等离子体物理重点实验室基金(6142A04030403)、中国博士后科学基金(2017M623311XB)

作者简介: 向祥军(1989—), 男, 博士后, 主要从事超短脉冲光纤光学方面的研究。

E-mail: dennis55555@163.com

* 通信联系人。E-mail: tjudengying@sina.com

而可以在相干光谱合成、高能粒子加速器、高能极端物理实验条件和聚变点火等领域具有更重大的研究价值和更广阔的应用前景^[4]。但由于光纤纤芯小,实际应用中系统积累光纤长度较长,在高峰值功率下极易产生非线性效应,这将严重影响光纤激光的输出特性,严重限制输出能力^[5-6]。因此,如何获得高峰值功率、高重复频率、高脉冲能量的超短脉冲激光一直是国内外相关机构的研究热点^[7]。

与连续激光和长脉冲激光不同,超短脉冲激光因其脉冲宽度窄、高峰值功率的特点,受色散以及非线性效应影响大,难以直接放大到很高的水平^[8-9]。1985年,Strickland等^[10]首次提出了光纤啁啾脉冲放大(FCPA)技术并建立了第一个啁啾脉冲放大(CPA)系统,较好地解决了脉冲放大过程中的非线性问题。CPA技术使得光纤激光系统输出的峰值功率提高了几个数量级,成为高功率超短脉冲激光发展的一个重要里程碑^[11]。2003年Limpert等^[12]报道了高平均功率的飞秒FCPA系统,产生了平均功率为76 W、脉冲宽度为400 fs、重复频率为75 MHz、单脉冲能量为1 μ J、峰值功率为2.5 MW的飞秒脉冲。随着大模场光子晶体光纤的出现,非线性效应的问题逐渐得到了解决,光纤单脉冲能量激光输出也从微焦量级提高到毫焦量级。2007年

Röser等^[13]使用大模场光子晶体光纤,产生了单脉冲能量为1.45 mJ、脉冲宽度为2 ns、重复频率为100 kHz的激光输出。2016年王子薇等^[14]利用棒状光子晶体光纤放大器,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。由于光子晶体光纤的出现,高峰值功率光纤激光器得到了更好的发展。国内开展了很多光子晶体光纤放大与抽运方式的研究^[15],进一步促进了国内高峰值功率光纤激光器的发展。

为了获得高峰值功率的超短脉冲输出,本文采用光纤放大结构,基于CPA技术获得了结构紧凑稳定性好的超短脉冲激光器。利用声光调制器(AOM)调制重复频率,采用40 μ m和85 μ m大模场光子晶体光纤放大器进行功率放大。在重复频率为500 kHz时,获得了平均功率为104 W,脉冲宽度为767 fs,峰值功率达0.271 GW的脉冲输出,并且光束质量因子 $M^2 < 1.6$ 。

2 实验装置

高峰值功率脉冲激光器实验装置如图1所示。采用基于主振荡-功率放大(MOPA)方式工作的光纤激光放大结构,为抑制非线性效应加入了啁啾脉冲放大(CPA)系统。

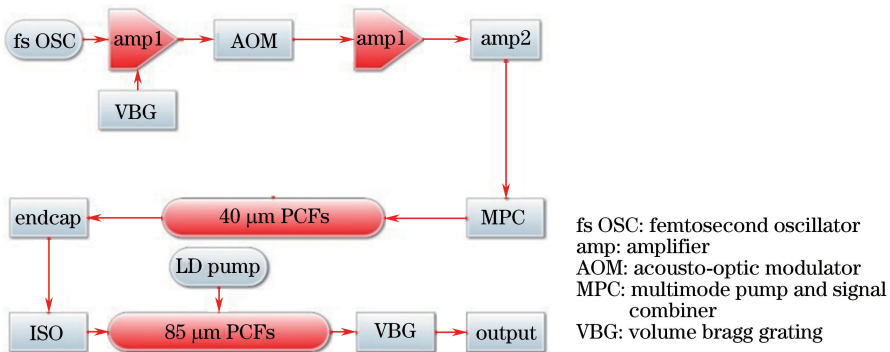


图1 光纤CPA高功率激光系统结构图

Fig. 1 Setup of the fiber amplification high power laser

实验种子源为商用飞秒脉冲激光器,输出功率为10 mW、重复频率为40 MHz、脉宽为500 fs、中心波长为1030 nm、谱宽为8 nm。种子源的单脉冲能量为0.25 nJ、峰值功率为0.5 kW。经AOM降频前,采用两级单模放大系统(图1中采用一个模块表示),同时使用色散量一样的两块相同的体布拉格光栅(VBG)展宽脉冲。为保证VBG对脉冲的压缩,整个系统的光纤传输与放大过程的色散必须补偿,于是利用啁啾光纤光栅对系统进行色散补偿。

一级放大系统用于对种子源信号光的预放,同时利用VBG对脉冲进行展宽,选用的是OptiGrate公司生产的VBG,衍射效率高达95%。鉴于VBG必须经过光纤输出反射后耦合回路光纤,因此选用三口环形器来实现一级放大系统与VBG展宽的结合。放大系统中采用的增益光纤纤芯直径为6 μ m的单包层高掺镱光纤,利用976 nm的LD反向抽运,抽运光吸收系数为250 $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$,实验中增益放大光纤的长度为0.5 m。

二级放大系统的主要目的:1)经放大系统提高单脉冲能量和平均功率;2)对整个光纤系统色散补偿;3)为 AOM 降频提供同步信号。第二级放大依然采用的是 0.5 m 单模掺镱增益光纤,976 nm LD 抽运功率为 700 mW,最终放大后输出为 150 mW。利用定值的啁啾光纤光栅(FBG)实现了整个系统的色散补偿,实验中使用的 FBG 补偿量为 $0.52 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}$,反射率为 40%。单模光纤的色散值约为 $-20 \text{ ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$,整个光纤系统的长度约为 25 m(实验中通过控制光纤器件间的光纤长度以保证整个系统长度),整体的色散值为 $-0.5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}$ 。于是选择最接近的 $0.52 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}$ 的啁啾光纤光栅补偿整个系统的色散对脉冲的非线性影响,最终通过控制光纤长度使色散补偿达到最优值。由同步机(HTB-VIII,绵阳海天新测控技术有限公司,绵阳)从分束器中采取的光信号转化为电信号,并将降频信号发于 AOM,调节时间延时,使降频输出平均功率最大化。

利用模场适配器将光纤芯直径增大至 $20 \mu\text{m}$ 。利用藤仓公司的 LZM-100 二氧化碳熔接机直接将 $20 \mu\text{m}$ 光纤与 $40 \mu\text{m}$ 光子晶体光纤熔接(纤芯、内包层、外包层直径分别为 40、200、450 μm ,对 976 nm 抽运光的吸收系数为 $10 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$),第五级 $40 \mu\text{m}$ 光子晶体光纤(DC-200-40-PZ-Yb,NKT,丹麦)信号光输入功率为 400 mW,利用 $(2+1)\times 1$ 合束器加入 976 nm 抽运光,正向抽运功率为 35 W,最大输出功率为 17 W。经过准直器空间光准直输出,先后通过两个 45° 双色镜耦合进 $85 \mu\text{m}$ 光子晶体光纤。为了避免反射的信号光、受激自发辐射(ASE)效应

和光子晶体耦合输入偏振要求,在输出端加入半波片与空间偏振相关隔离器(ISO),半波片中心波长为 1030 nm,通过旋转波片使通过 ISO 的功率最大,此时信号光的偏振度大于 10 dB。主放大器采用一根长度为 0.804 m 的掺镱光子晶体光纤棒(aeroGAIN-ROD-PM85G,NKT,丹麦),其纤芯和抽运包层直径分别为 $85 \mu\text{m}$ 和 $260 \mu\text{m}$,对 976 nm 抽运光吸收系数约为 $15 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。光纤两端均有石英端帽,目的是为了降低输出平面峰值功率密度和防止菲涅耳反射。采用功率为 200 W 的 976 nm 空间光进行反向抽运,通过透镜耦合输入。最终利用 VBG(D05-19-11,OptiGrate,美国,中心波长为 1030 nm,光谱半峰全宽为 8 nm,衍射效率为 95%,展宽因子为 $61 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}$)压缩至 fs 输出,由于 VBG 的衍射效率约为 95%,激光损耗超过 5 W,因此采用水冷方式为 VBG 散热。

实验中利用光功率计(AQ2211,YOKOWAVA,日本)和 Ophir 测量光纤激光器的平均功率,用光谱分析仪(AQ6373B YOKOGAWA,日本)和示波器(wavesurfer 10,Teledyne Lecroy 公司,美国)来检测输出激光的光谱特性与重复频率。利用 APE 自相关仪检测飞秒脉冲波形和 M^2 因子测试仪(squarelux ML 4515, Metrolux,德国)检测输出光斑质量。

3 实验结果与分析

如图 2 所示为种子源振荡器的输出和经过两级单模放大后的输出,即声光调制器的输入脉冲。

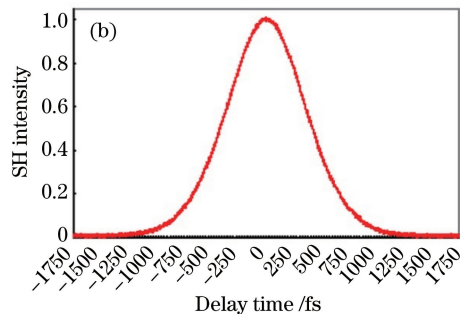
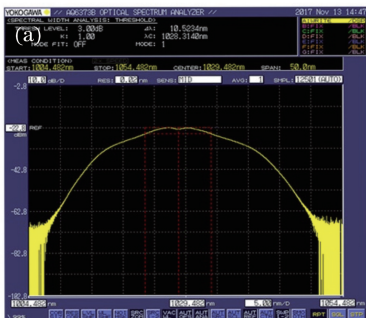


图 2 (a)振荡器输出光谱;(b)振荡器输出脉冲

Fig. 2 (a) Output spectra; (b) output pulse of Oscillator

经过 AOM 调制,脉冲重复频率 40 MHz 由调制为 500 kHz,平均功率大幅降低。图 3 所示为通过 1 GHz 带宽(示波器)测得的 AOM 两端的激光脉冲串。

经过两级放大达到 $40 \mu\text{m}$ 光子晶体光纤放大信号光要求,在主放前平均功率达到 17 W;经 $85 \mu\text{m}$ 光子晶体光纤棒放大后平均功率达到 110 W;最终利用体光栅压缩空间光输出,平均功率为

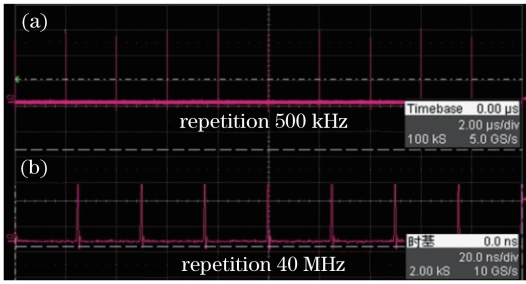


图 3 (a) AOM 的输出信号光 500 kHz;
(b) AOM 的输入信号光 40 MHz

Fig. 3 (a) AOM output signal of 500 kHz;
(b) AOM input signal of 40 MHz

104 W, 峰值功率达到 0.271 GW。图 4(a)~(c) 分别为 FCPA 系统各个节点的平均功率、单脉冲能量和峰值功率的数据图。

为获得高功率的脉冲, 在最后一级放大采用 85 μm 光子晶体光纤棒, 信号光输入功率为

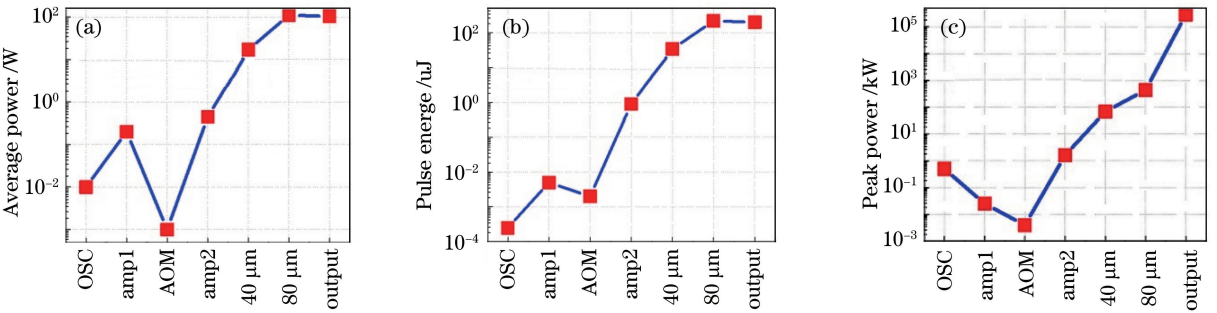


图 4 激光系统各级放大器的(a)平均功率, (b)单脉冲能量和(c)峰值功率

Fig. 4 (a) Average power, (b) pulse energy and (c) peak power of output signal at different stage amplifiers of laser system

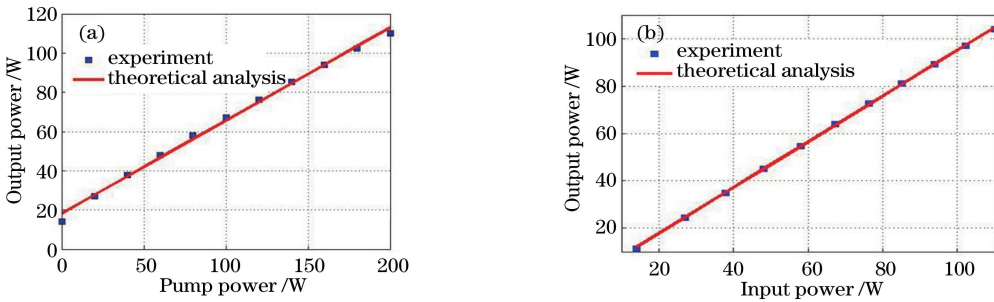


图 5 (a) 85 μm 光子晶体光纤放大器输出功率随抽运的变化; (b) 经 VBG 压缩后的输出功率随输入的变化

Fig. 5 (a) Output power versus pump power of 85 μm PCFs amplifier; (b) output power versus input power via VBG

由于利用 85 μm 光子晶体光纤棒进行放大, 输出的光束质量主要与耦合以及 VBG 的衍射有关。利用 M^2 因子测试设备对输出光进行测试, 三条曲线分别对应 X、Y 方向测量结果和平均值, 输出激光光束质量 $M_x^2 = 1.55$ 和 $M_y^2 = 1.58$, 平均值 $M^2 = 1.56$ 。如图 7 所示, 通过对光路的精确调控取得了较好的光束质量控制效果。

图 8 所示为 85 μm 光子晶体光纤放大器输出

17 W, 高于棒状光子晶体光纤放大所需的信号光功率, 可有效抑制 ASE 效应。由于重复频率较低为 500 kHz, 占空比较小, 抽运效率并不高。图 5(a) 所示为 85 μm 光子晶体光纤棒输出随抽运功率的变化。随着抽运功率的增加变化很小, 输出功率随着抽运功率线性增长, 经过线性拟合得到斜率高于 47%。最终输出端利用高衍射效率的体光栅压缩脉冲, 衍射效率为 95%。实验测量的结果如图 5(b) 所示, 可以看出, 压缩效率由低先升后降, 斜率大约为 45%。压缩效率随抽运功率的变化如图 6 所示, 在抽运功率低于 80 W, 即输出功率低于 50 W 时, 衍射效率低于 94%, 且随输入功率增大而快速增大; 抽运功率为 80~180 W 时, 衍射效率维持在 95% 左右。由以上分析可知, 在输入功率超过 40 W 时, VBG 表现出较佳的衍射效率。

的信号光谱和经过放大后最终压缩输出 100 W 的光谱。蓝色虚线是在抽运功率为 0 W 时信号光通过 85 μm 光子晶体光纤后的光谱, 红色实线是在输出功率为 100 W 时的输出光谱。激光的中心波长为 1030 nm, 谱宽为 8 nm。信号光经过 85 μm 光子晶体光纤棒放大器, 在输出功率为 100 W 时激光光谱发生展宽, 这是由自相位调制引起的。但基座很弱, 与输出激光强度之差超大于 20 dB。利用 APE

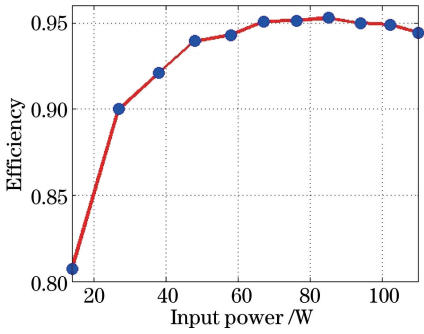


图 6 VBG 衍射效率随输入功率增加的变化曲线

Fig. 6 Compression efficiency of VBG with different input power

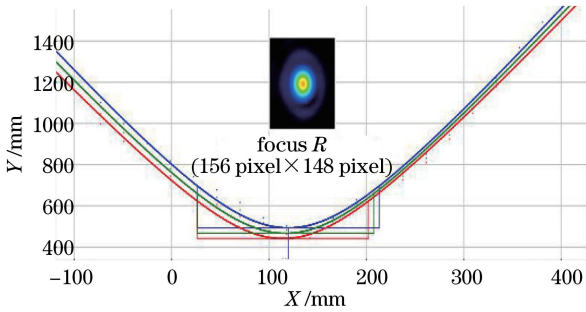


图 7 最终输出激光的光束质量

Fig. 7 Final output beam profiles

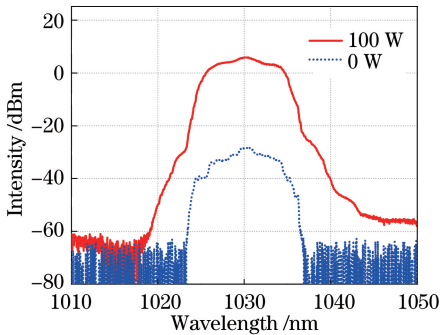


图 8 输出光谱

Fig. 8 Output spectra

自相关仪测量得到的最终输出脉冲的时间波形如图 9 所示,经过高斯拟合得到脉冲宽度为 767 fs。相对于种子光 500 fs,由于系统自相位调制导致脉冲展宽,且无法通过 VBG 压缩。

4 结 论

报道了高脉冲能量、高峰值功率的飞秒脉冲光纤掺镱光纤激光器。利用中心波长为 1030 nm、谱宽为 8 nm、重复频率为 40 MHz、脉宽为 500 fs 光纤激光器作为激光种子源。经过体布拉格光栅展宽至 500 ps,利用声光调制器降频至 500 kHz,经过 40 μm 光子晶体光纤与 85 μm 光子晶体光纤棒放

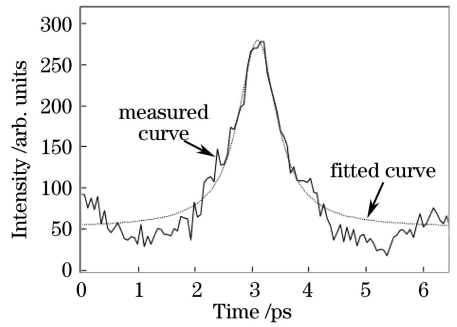


图 9 输出脉冲的时间波形

Fig. 9 Temporal profile of output pulse

大,压缩输出 100 W 的平均功率,其脉冲宽度为 767 fs,峰值功率达到 0.271 GW。整个系统采用光纤放大结构,放大级数少,输出峰值功率高。下一步的工作重点是针对多 AOM 降频,在保证激光器光束质量的前提下,提高单脉冲能量,从而进一步提高峰值功率输出。

参 考 文 献

- [1] Fan D Y, Zhang X M. Laser fusion and high power laser: history and progress [J]. Physics, 2010, 39 (9): 589-596.
范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展 [J]. 物理, 2010, 39(9): 589-596.
- [2] Gebhardt M, Gaida C, Stutzki F, et al. High average power nonlinear compression to 4 GW, sub-50 fs pulses at 2 μm wavelength [J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 747-750.
- [3] Tünnermann A, Schreiber T, Limpert J. Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution [J]. Applied Optics, 2010, 49(25): F71-F78.
- [4] Zheng W G, Deng Y, Zhou W, et al. Development of laser technology in Research Center of Laser Fusion [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3082-3090.
郑万国, 邓颖, 周伟, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3082-3090.
- [5] Hornung M, Liebetau H, Keppler S, et al. 54 J pulses with 18 nm bandwidth from a diode-pumped chirped-pulse amplification laser system [J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5413-5416.
- [6] Park G B, Field R W. Perspective: The first ten years of broadband chirped pulse Fourier transform microwave spectroscopy [J]. The Journal of Chemical Physics, 2016, 144(20): 200901.
- [7] Martin E F, Ingmar H. Ultrafast fibre lasers [J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 868-874.

- [8] Xue Y H, Zhou J, Lei S Y, *et al.* The research development of fiber-based high average power ultrashort pulse amplification [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(11): 28-34.
薛宇豪, 周军, 雷思远, 等. 高平均功率超短脉冲激光光纤放大研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(11): 28-34.
- [9] Galvanauskas A, Sartania Z, Bischoff M. Millijoule femtosecond fiber CPA system [C]. *Advanced Solid-State Lasers Conference*, 2001: PD3.
- [10] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [11] Sun R, Jin D, Tan F, *et al.* High-power all-fiber femtosecond chirped pulse amplification based on dispersive wave and chirped-volume Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22806-22812.
- [12] Limpert J, Clausnitzer T, Liem A, *et al.* High-average-power femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1984-1986.
- [13] 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.
- [14] Wang Z W, Wang Z K, Zou F, *et al.* High-peak-power rod-type photonic crystal fiber amplifier for picosecond pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1001001.
王子薇, 王兆坤, 邹峰, 等. 高峰值功率皮秒脉冲棒状光子晶体光纤放大器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001001.
- [15] Zhao X W, Chai L, Shi J K, *et al.* Investigation of the pump schemes in photonics crystal fiber femtosecond laser amplifier [J]. *Chinese Journal of 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.