

高功率、高质量全保偏光纤飞秒激光放大系统

文亮¹, 刘博文¹, 宋寰宇¹, 胡明列¹, 宋有建¹, 柴路¹, 朱哲², 王清月¹

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

²西安中科汇纤光电科技有限公司, 陕西 西安 710119

摘要 利用普通大模场面积掺镱保偏双包层光纤作为增益介质, 采用啁啾脉冲放大技术搭建了全保偏光纤飞秒激光放大系统。由于全保偏光纤结构, 系统具有较高的集成度和长期稳定性。将系统中积累的三阶色散与放大过程中引入的非线性啁啾相互补偿, 通过控制展宽光纤的长度, 优化了压缩后脉冲质量和宽度。同时分析了周期性光谱调制对放大输出的影响, 通过优化保偏 $(2+1)\times 1$ 光纤合束器的制作工艺, 解决了其引起的周期性光谱调制问题, 最终获得重复频率为 111 MHz, 压缩后输出平均功率为 9 W, 对应脉宽为 260 fs, 单脉冲能量为 81 nJ, 保偏比为 13 dB 的高质量飞秒激光脉冲输出。

关键词 激光光学; 保偏光纤合束器; 周期性光谱调制; 啁啾脉冲放大; 光纤飞秒激光放大系统

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201011

All Polarization-Maintaining Fiber Amplification System to Generate High-Power and High-Quality Femtosecond Laser Pulses

Wen Liang¹, Liu Bowen¹, Song Huanyu¹, Hu Minglie¹, Song Youjian¹,
Chai Lu¹, Zhu Zhe², Wang Qingyue¹

¹Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology of Ministry of Education, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Lasfiberio Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract An all polarization-maintaining fiber femtosecond laser amplification system, using Yb-doped large-mode-area double-cladding fiber (LMA-DCF) as gain medium and adopting the chirped pulse amplification technology, was constructed. Benefiting from the all polarization-maintaining fiber construction, the amplification system showed high integration and long-term stability. Furthermore, the quality and duration of the pulses after compression were optimized by controlling the length of the stretcher fiber, which made it possible to compensate the third-order dispersion accumulated in the system by introducing nonlinear chirp in the amplifier. Meanwhile, we analyzed the impact on amplified pulses caused by periodic spectral modulation. Through optimizing artisan craftsmanship of polarization-maintaining fiber $(2+1)\times 1$ combiner, the issue of periodic spectral modulation was solved. Finally, the high-quality ultrashort laser pulses with an average power of 9 W and a pulse duration of 260 fs at the repetition rate of 111 MHz after compression, corresponding to single pulse energy up to 81 nJ and pulse polarization ratio of 13 dB, were generated.

Key words laser optics; polarization-maintaining fiber combiner; periodic spectral modulation; chirped-pulse amplification; femtosecond fiber laser amplification system

OCIS codes 140.3280; 140.3615; 140.7090; 230.2285

收稿日期: 2016-08-15; 收到修改稿日期: 2016-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61322502, 61227010, 61205131, 11274239)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(青年项目)(14JQCQNJC02000, 13JQCQNJC01400)

作者简介: 文亮(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光技术、飞秒激光放大器方面的研究。

E-mail: wenliang@tju.edu.cn

导师简介: 刘博文(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事飞秒激光技术及非线性光纤光学方面的研究。

E-mail: bwliu@tju.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

随着技术的不断进步和成熟,具有较短持续时间、高峰值功率和宽光谱特点的飞秒激光进入了广泛应用阶段,在科学研究和工业生产中起着越来越重要的作用。其中高功率飞秒激光可以大大提高工业生产效率,提高科学研究中的探测灵敏度,甚至产生质的飞跃。目前被寄予厚望的高功率飞秒激光器主要有两种,分别是碟片激光器^[1]和光纤激光器^[2]。由于碟片激光器以空间器件为主,而光纤激光器基本做到了全光纤化,所以光纤激光器的抗干扰能力更强。更重要的是,由于受到激光增益介质的限制,碟片激光器的光谱范围有限,只能支持 400 fs 以上的激光脉冲;而光纤飞秒激光器更灵活,利用一定的非线性光谱展宽效应可以支持短于 300 fs 的激光脉冲,这对于一些透明材料的加工具有更现实的意义^[3]。目前高功率的光纤飞秒激光器基本上以光子晶体光纤为增益介质^[4-5],但是光子晶体光纤特殊的空气孔结构使其与普通光纤器件很难熔接起来,限制了全光纤化的实现。而以普通双包层掺镱增益光纤(YDCF)为增益介质的光纤飞秒激光系统^[6],虽然难以达到百瓦级的高平均功率,但在中等功率的应用中却能显示出全光纤化、结构紧凑、成本低、长期稳定性好的优势。因此开发基于 YDCF 的全光纤飞秒激光系统具有很高的技术价值^[7-11]。

在此类飞秒激光技术的研究中,基于全保偏光纤及器件的全光纤放大系统比使用非保偏光纤具有更好的偏振稳定性和更高的脉冲质量^[12]。但是全光纤化也会由于光纤引入的非线性和高阶色散,以及光纤器件本身引入的脉冲质量劣化,致使全光纤系统输出的脉冲质量不高,脉冲宽度难以达到理论预期。本文分析了影响输出脉冲质量的两种关键因素,并给出了消除影响、提高脉冲质量的方法,获得高功率、高质量飞秒激光脉冲输出。其中一个因素是放大系统中光纤器件引入的子脉冲,产生光谱调制并在随后的放大过程中被放大,劣化了输出脉冲质量。实验中发现相比于其他光纤器件,保偏型抽运光纤合束器容易产生子脉冲,之后通过优化合束器的制作,抑制了子脉冲的产生。另一个影响因素是光纤系统中三阶色散的积累使得压缩后脉冲具有明显的基底。通过优化展宽光纤的长度,优化放大过程中的自相位调制效应和光纤系统中的三阶色散,使二者相互补偿,提高压缩后脉冲质量。这样以保偏光纤和保偏光纤器件构成放大系统,采用光纤啁啾脉冲放大结构(FCPA),并结合非线性啁啾与三阶色散的相互补偿,获得了平均功率 9 W,重复频率 111 MHz,单脉冲能量 81 nJ,脉冲宽度 260 fs 的输出。

2 实验装置

放大系统由振荡级、展宽器、放大级和压缩器组成,如图 1 所示,采用典型的啁啾脉冲放大(CPA)技术,其中展宽器和放大级为全保偏光纤结构。振荡级利用耗散孤子锁模方式实现稳定锁模脉冲序列输出。为了使振荡级输出光谱在两沿更加平滑,利用双折射滤波片对振荡级输出脉冲进行光谱整形。振荡级输出脉冲由保偏单模光纤(PM980-HP)进行时域展宽。由于放大器采用后向抽运方式,展宽器单模光纤需要与放大器增益光纤连接,而展宽光纤的纤芯直径为 6 μm ,与放大器增益光纤的纤芯不匹配,直接熔接将产生较大损耗。为此,使用光纤模场适配器(MFA)连接两者,实现光波模式的绝热匹配,降低了损耗,并确保了全光纤化。

增益光纤为大模场面积掺镱保偏双包层光纤,纤芯直径为 20 μm ,内包层直径为 130 μm ,涂覆层具有低折射率,形成了双包层结构,增益光纤长度为 1.4 m。为了保证增益光纤能够单模运转,光纤沿应力点连线方向盘绕,盘绕直径为 4 cm。放大级抽运源为尾纤输出的半导体激光器,最大输出功率为 25 W,抽运光的中心波长锁定在 976 nm,线宽小于 0.7 nm。抽运光由抽运光纤合束器耦合到增益光纤中。抽运光纤合束器为保偏光纤器件,其信号纤和输出尾纤都是保偏光纤并与增益光纤匹配。由于优化设计,该合束器具有较高的隔离度,避免放大后的信号光耦合到抽运源中。抽运光纤合束器输出的激光通过高功率包层模剥除器将残余抽运光剥离,其差损小于 0.5 dB,可有效地滤除残余抽运光,最后激光脉冲由高功率准直器耦合输出。放大器输出的激光脉冲由一对 1200 line/mm 的熔石英高功率透射光栅对进行压缩,压缩效率为 72%。此外,为了确保放大系统的稳定性,放大级所有器件紧凑地置于 25 cm \times 25 cm 的铝板上,并进行冷却。

3 实验结果

在放大系统中,振荡级工作在全正色散域,输出脉冲的平均功率为 100 mW,重复频率为 111 MHz,单脉

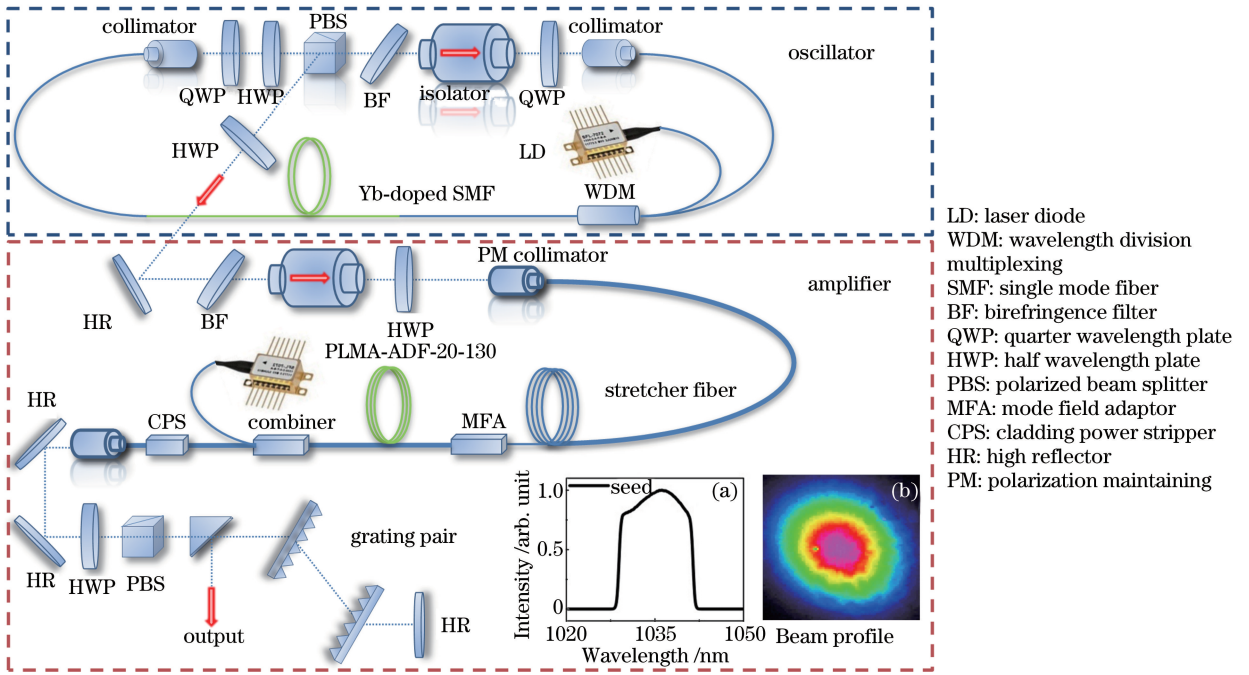


图 1 实验装置图。(a)振荡级输出脉冲经滤波后的光谱,3 dB 谱宽为 12.3 nm;
(b)在压缩后输出功率为 9 W 下测量的光场模式分布

Fig. 1 Experimental setup. (a) Spectrum of pulses from the oscillator after passing through the filter, whose 3 dB bandwidth is 12.3 nm; (b) beam profile when average power of dechirped pulses is 9 W

冲能量为 0.9 nJ,脉冲宽度为 3.7 ps。脉冲的中心波长为 1035 nm,光谱宽度为 12.3 nm,光谱曲线如图 1(a)所示,对应傅里叶变换极限脉冲宽度为 220 fs。输出光谱是典型的全正色散耗散孤子锁模光谱,具有陡峭的两沿,并在两沿积累了一定的非线性啁啾。利用双折射滤波片进行一定的脉冲整形,使光谱变得相对平滑,这样不但滤除了部分非线性啁啾,而且平滑的光谱也有利于后面的啁啾脉冲放大。之后将经过隔离器的信号光耦合进展宽器的保偏单模光纤,耦合效率为 69%,此时进入展宽器的信号光功率为 62 mW。

在光纤啁啾脉冲放大系统中,展宽光纤的长度影响激光脉冲在放大过程中的非线性效应,而非线性效应带来的光谱展宽可以抵消放大过程中的增益窄化现象。这样,在同样的信号光功率和抽运光功率下,光纤越长脉冲时域展宽量越大,放大过程中的非线性效应越弱,光谱展宽量越小,增益窄化效应越加明显。同时,由于展宽光纤提供正的三阶色散,光栅对压缩脉冲时同样引入正三阶色散,这样大量的三阶色散会劣化脉冲质量;但是在放大过程中引入一定的非线性啁啾可以与三阶色散进行相互补偿,提高脉冲质量^[13]。所以对于确定的输出脉冲能量,存在着最优化的展宽光纤长度。

首先利用数值模拟方法模拟了脉冲的展宽、放大和压缩的过程。在数值模拟中,利用分步傅里叶方法求解非线性薛定谔方程,模拟脉冲在展宽器中的演化。将速率方程和非线性薛定谔方程相互耦合,并用龙格库塔迭代方法和分步傅里叶方法求解,获得脉冲放大级中的演化过程^[14-15]。为了接近实际情况,模拟中直接利用振荡级输出的脉冲参数和实际光纤参数,如表 1 所示,最后模拟结果与实验结果吻合。图 2 为输出平均功率同为 9.5 W 时不同展宽光纤长度下输出脉冲能量相同时脉冲的频域和时域特性。为了表征无源被动光器件引入的光谱调制,在模拟放大的输入光谱上叠加了周期为 1 nm 的调制函数。在展宽器光纤长度从 5 m 增加到 65 m 的过程中,输出光谱宽度由宽变窄,光纤长度大于 30 m 后光谱变化较小。而相对应的去啁啾脉冲宽度则是先变窄再变宽,存在最佳值。这是因为展宽光纤较短时,由于光脉冲时域展宽量较小,所以峰值功率比较高,自相位调制效应明显,光谱展宽较大[图 2(a)]。当长度长于 30 m 后,由于非线性光谱展宽减弱,同时增益窄化作用显现,输出脉冲的光谱变化不大。虽然展宽光纤较短时,输出光谱较宽可以支持更窄的傅里叶变换极限脉冲,但是由于非线性效应过于强烈,脉冲两翼将积累过大的非线性啁啾,而且系统提供三阶色散仅能部分补偿,使得压缩后脉冲反而更宽,展宽光纤长度为 10 m 时的压缩后脉冲宽度大于展宽

光纤长度为 30 m 时。当展宽光纤长度继续增加时,压缩器光栅对之间的间距随之增加,三阶色散显著提高,成为了影响脉冲宽度和质量的主要因素。从图 2(b)中可以看出,当展宽光纤长于 50 m 时,脉冲的基底开始明显变大。

表 1 数值模拟中光纤展宽器和掺镱光纤放大器所用参数

Table 1 Fiber stretcher and Yb-doped fiber amplifier parameters used in the simulation

Parameters	Value
Spectrum of signal pulses (measured)	Output spectrum of oscillator
Repetition rate of signal pulses (measured)	111 MHz
Average power of signal pulses (measured)	62 mw
Pump wavelength in amplifier	976 nm
Third order dispersion	$4.1 \times 10^{-5} \text{ ps}^3/\text{m}$
Group velocity dispersion	$0.023 \text{ ps}^2/\text{m}$
nonlinear index coefficient	$2.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$
Core diameter of stretcher fiber	$6 \mu\text{m}$
Cladding diameter of stretcher fiber	$125 \mu\text{m}$
Core diameter of gain fiber	$20 \mu\text{m}$
Cladding diameter of gain fiber	$130 \mu\text{m}$
Doping concentration of gain fiber	$5.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Signal/pump overlap factor	0.85

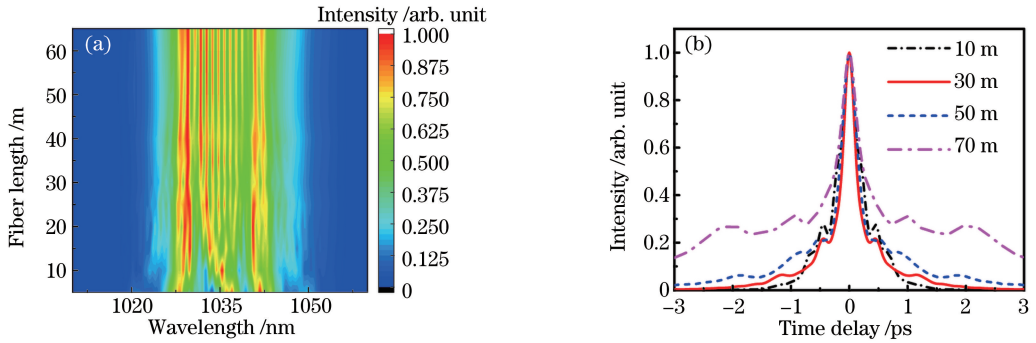


图 2 输出功率为 9.5 W 时,数值模拟不同展宽光纤长度下的(a)放大级输出脉冲光谱图和(b)压缩后脉冲自相关曲线
Fig. 2 (a) Simulation result about pulse spectrum from the amplifier and (b) simulation curves of dechirped pulse autocorrelation traces with different stretcher fiber lengths when average power is 9.5 W

从数值模拟结果可以看出,当展宽光纤为 30 m 时,脉冲在放大过程中获得的非线性相移为最佳值。在非线性过程中获得了足够的光谱展宽支持窄脉冲宽度,而且脉冲两沿积累的非线性相移与系统中的三阶色散最大限度地相互补偿。这样,压缩后的脉冲宽度最窄,脉冲基底也相对较低。

在全光纤放大系统中,由于脉冲在光纤传输过程中偏振态的变化会产生周期性光谱调制^[16],同时在时域中引入了子脉冲,主脉冲两侧出现旁瓣,破坏了脉冲质量^[17-18]。在全保偏光纤系统中,保偏结构的存在避免了这种周期性光谱调制的出现,但是在一些保偏光纤器件的制作过程中,由于保偏结构的破坏,周期性光谱调制仍会出现。保偏光纤合束器是最容易产生该种光谱调制的器件。因为在保偏光纤合束器的拉制过程中,保偏应力单元容易发生畸变从而产生结构缺陷,从而引起保偏比降低。为此,在实验中专门优化了保偏光纤合束器的制作过程,基本消除了周期性光谱调制,抑制了主脉冲两侧旁瓣的产生,如图 3 所示。

图 3 中对比了保偏光纤合束器优化前后输出脉冲频域和时域质量的不同。图 3(a)中可以看出优化前 Combiner 1 输出光谱具有明显的周期性光谱调制,调制周期为 2.5 nm。测量低功率下 Combiner 1 输出脉冲压缩后自相关曲线,如图 3(b)所示,在主脉冲两侧具有明显的子脉冲,与脉冲间隔为 1.58 ps,对应的光谱调制周期为 2.3 nm,与实验中所获得的光谱调制周期 2.5 nm 基本吻合。在放大系统中,当输出脉冲功率达到 9 W 时,光谱调制和时域子脉冲更加明显,如图 3(c)所示。为了解决由合束器引起的光谱调制问题,实验中专门优化了合束器结构,使其对称性更好,避免保偏度的降低。图 3 中 Combiner 2 优化之后引入的周期性

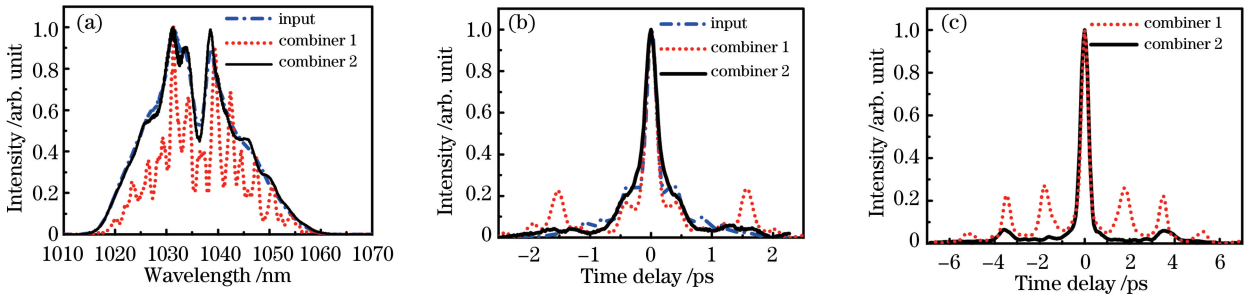


图 3 (a)优化前后的合束器直接输出光谱对比;(b)优化前后的合束器直接输出脉冲去啾啾后自相关曲线对比;
(c)在输出功率为 9 W, 展宽光纤长度为 30 m 时, 利用优化前后的合束器放大输出的脉冲去啾啾后自相关曲线
(combiner 1 未经优化,combiner 2 为已经优化)

Fig. 3 (a) Spectrum comparison between pulses directly output from different combiners; (b) autocorrelation trace comparison between dechirped pulses directly output from different combiners; (c) autocorrelation trace comparison between dechirped pulses from amplifiers with different combiners, when output power is 9 W and stretcher fiber is 30 m long (combiner 1 is not optimized, and combiner 2 is optimized)

光谱调制基本消除,即使在输出高功率脉冲时子脉冲也被明显抑制。

根据以上分析,实验中以优化的保偏光纤合束器将抽运光耦合到增益光纤内包层中。最大输出功率下脉冲的光束质量仍为近高斯型,如图 1(b)所示,略有椭圆是由于保偏光纤应力元的影响。光谱调制的平均周期并不随着抽运功率的升高而变化,只是随着抽运功率的升高调制深度增加。这是因为随着抽运功率的升高,光纤中的非线性效应不断增强,累积的非线性相移增加,从而使得主脉冲的能量向子脉冲发生转移,导致脉冲之间的对比度下降^[18]。

根据数值模拟中对展宽光纤的分析,在实验中分别利用 10,30,50 m 的保偏光纤作为展宽器进行对比。当抽运功率为 21 W 时,放大系统直接输出平均功率为 12.8 W,斜率效率为 61%,压缩后输出脉冲的平均功率为 9 W,输出脉冲的保偏比为 13 dB。三种长度光纤展宽器对应的放大级输出光谱如图 4(a)所示,同时根据数值模拟结果估算放大级直接输出脉冲宽度分别为 17,34,35 ps。实验中当展宽光纤长度为 50 m 时,由于增益窄化的限制和非线性光谱展宽较弱,输出光谱比其他两种长度的光纤窄,脉冲宽度为 277 fs。而用 10 m 光纤作为展宽器时,由于脉冲时域展宽量少,放大过程中非线性强,光谱展宽明显,在同样的输出功率下脉冲宽度为 220 fs。但是由于非线性啾啾积累过多,从而导致最终输出脉冲质量恶化,具有较大的基底。当用 30 m 光纤作为展宽器时,适量的非线性有效地克服了放大过程中的增益窄化效应,使得光谱可以维持较宽的水平,压缩后脉冲宽度为 260 fs,并且具有较小的基底。因此,利用 30 m 光纤作为展宽器,将优化后的保偏光纤合束器用于抽运光合束,可以获得高功率、高质量飞秒激光脉冲输出,输出平均功率为 9 W,单脉冲能量为 81 nJ,脉冲宽度为 260 fs。

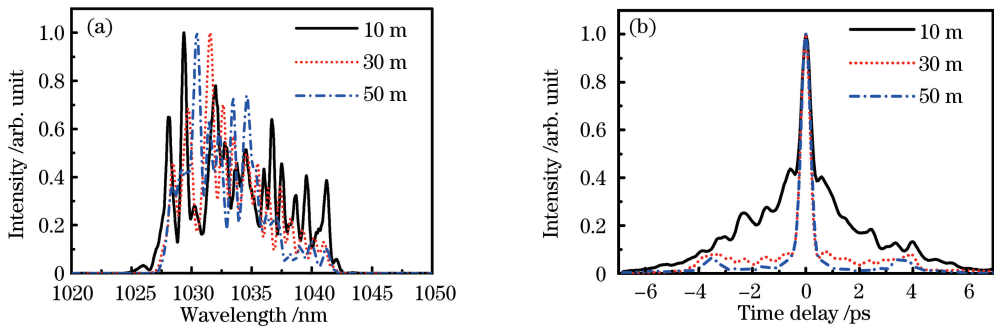


图 4 在输出功率为 9 W 时,实验测得不同展宽光纤长度下的(a)放大级输出脉冲光谱图和(b)压缩后脉冲自相关曲线
Fig. 4 (a) Experimental curves of pulse spectra from the amplifier and (b) experimental curves of the dechirped pulse autocorrelation traces under different stretcher lengths and signal power of 9 W

4 结 论

研究了高功率、高质量全保偏光纤飞秒激光放大系统。以耗散孤子锁模的光纤飞秒激光器作为种子源,利用啁啾脉冲放大技术,展宽器与放大器采用保偏光纤结构,使系统结构简单、稳定性好、紧凑性高。在研究中分析了展宽光纤长度和光谱调制对输出脉冲的影响,并在实验中发现了保偏合束器引入的光谱调制问题,定性地解释了光谱调制和时域脉冲旁瓣的成因,优化了制作工艺,解决了该问题。在前面分析和优化的基础上,利用 30 m 长的展宽光纤和优化之后的保偏合束器,在抽运光功率为 21 W 时,放大系统输出压缩后平均功率为 9 W 的高质量脉冲,脉冲宽度为 260 fs,单脉冲能量为 81 nJ,保偏比为 13 dB,光束质量为近高斯型。由于该放大系统具有高功率、高质量、全保偏光纤结构、结构紧凑和成本较低等特点,将在飞秒激光微纳加工、超快太赫兹产生等诸多领域占有一席之地。

参 考 文 献

- [1] Giesen A, Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 598-609.
- [2] Limpert J, Roser F, Schreiber T, *et al.* High-power ultrafast fiber laser systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(2): 233-244.
- [3] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 219-225.
- [4] Limpert J, Schreiber T, Clausnitzer T, *et al.* High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Express, 2002, 10(14): 628-638.
- [5] 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直接放大产生 34 W 高功率飞秒脉冲[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202001.
- [6] Deng Y, Chien C Y, Fidric B G, *et al.* Generation of sub-50 fs pulses from a high-power Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3469-3471.
- [7] Wang Lixin, Cai Jun, Jiang Peipei, *et al.* All fiberized high power linear polarized pulsed ytterbium-doped laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 350-354.
王立新, 蔡军, 姜培培, 等. 全光纤化高功率线偏振掺镱脉冲光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 350-354.
- [8] Yang Tieshan, Wang Xiuhong, Sun Ruoyu, *et al.* Ytterbium-doped nanosecond-pulsed all-fiber laser based on dissipative soliton resonance and its frequency-doubling[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0302006.
杨铁山, 王秀红, 孙若愚, 等. 基于耗散孤子共振的纳秒脉冲掺镱全光纤激光器及其倍频[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302006.
- [9] Ding Yaqian, Qi Yunfeng, Liu Yuan, *et al.* Study on polarization maintaining fiber power amplification characteristics of dual-wavelength fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302002.
丁亚茜, 漆云凤, 刘源, 等. 双波长光纤激光器的保偏光纤功率放大特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302002.
- [10] Feng Dejun, Liu Guanxiu, Zhang Maosen, *et al.* Linear polarized Yb³⁺ doped double-clad fiber laser with an intracavity cubic polarization beam splitter as polarization selection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0714002.
冯德军, 刘冠秀, 张茂森, 等. 基于腔内偏振分束器偏振控制的线偏振掺镱双包层光纤激光器[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0714002.
- [11] Sun Hong, Wei Kaihua, Qian Kai, *et al.* Gain switched all-fiberized pulse Yb fiber laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 43-47.
孙宏, 魏凯华, 钱凯, 等. 一种基于增益调制技术的全光纤化脉冲 Yb 光纤激光器[J]. 光子学报, 2013, 42(1): 43-47.
- [12] Schreiber T, Nielsen C K, Ortac B, *et al.* Microjoule-level all-polarization-maintaining femtosecond fiber source[J]. Optics Letters, 2006, 31(5): 574-576.
- [13] Zhou S, Kuznetsova L, Chong A, *et al.* Compensation of nonlinear phase shifts with third-order dispersion in short-pulse fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2005, 13(13): 4869-4877.

-
- [14] He F, Price J H V, Vu K T, *et al.* Optimisation of cascaded Yb fiber amplifier chains using numerical-modelling[J]. *Optics Express*, 2006, 14(26): 12846-12858.
- [15] Chen H W, Lim J, Huang S W, *et al.* Optimization of femtosecond Yb-doped fiber amplifiers for high-quality pulse compression[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28672-28682.
- [16] Sasaki Y, Hosaka T, Horiguchi M, *et al.* Design and fabrication of low-loss and low-crosstalk polarization-maintaining optical fibers[J]. *Lightwave Technology Journal*, 1986, 4(8): 1097-1102.
- [17] Schimpf D, Seise E, Limpert J, *et al.* Decrease of pulse-contrast in nonlinear chirped-pulse amplification systems due to high-frequency spectral phase ripples[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8876-8886.
- [18] Didenko N V, Konyashchenko A V, Lutsenko A P, *et al.* Contrast degradation in a chirped-pulse amplifier due to generation of prepulses by postpulses[J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3178-3190.