

光学学报

55 fs, 510 mW 掺铒光纤飞秒激光器

俞冰昊¹, 郝强^{1*}, 曾和平²

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

摘要 实验搭建了基于分离脉冲放大及光纤非线性压缩的掺铒光纤激光系统。通过三块长度倍增的 YVO₄ 晶体进行偏振复用, 实现了八脉冲的分离与合成。探究了不同脉冲宽度的注入条件下分离脉冲主放大器的合成效率。将放大后的脉冲耦合入一段单模保偏光纤中进行非线性压缩, 通过控制主放大器的抽运光功率和压缩器的光纤长度, 对非线性压缩过程进行优化, 获得了重复频率为 80.4 MHz、平均功率为 510 mW、脉冲宽度为 55 fs 的超短脉冲。最后, 采用 MgO:PPLN 晶体进行光学倍频处理, 在中心波长 783.4 nm 处获得了平均功率为 146 mW、脉冲宽度为 75 fs 的倍频光, 相应的倍频效率为 31%。

关键词 激光器; 掺铒激光器; 分离脉冲放大; 非线性光纤压缩; 自相位调制

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1936001

55 fs, 510 mW Erbium-Doped Fiber Femtosecond Laser

Yu Binghao¹, Hao Qiang^{1*}, Zeng Heping²

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

Abstract An erbium-doped fiber laser system based on divided-pulse amplification and fiber nonlinear compression is demonstrated in this paper. The separation and combining of eight replicas are realized by polarization multiplexing with three length-multiplied YVO₄ crystals. The combining efficiency of the main-amplifier with different pulse widths is first investigated. Then, the amplified pulses are coupled into a single-mode polarization-maintaining fiber to be further compressed. The nonlinear compression process is optimized by controlling the pump power of the main-amplifier and the fiber length in the compressor, and the pulses with 55 fs temporal duration, 510 mW output power and 80.4 MHz repetition rate are generated. Furthermore, the frequency-doubled laser at 783.4 nm with 146 mW average power and 75 fs temporal duration is achieved using a 0.3-mm-length MgO:PPLN crystal, and the corresponding conversion efficiency is 31%.

Key words lasers; erbium-doped laser; divided-pulse amplification; nonlinear fiber compression; self-phase modulation

OCIS codes 140.3500; 140.3298; 320.5520; 190.2640

飞秒激光器具有高峰值功率、短持续时间的特点, 特别是 1.55 μm 波段的光纤飞秒激光器具有光束质量好、结构紧凑和免维护等优点, 在多光子显微成像^[1]、光学泵浦探测^[2]、激光微纳制

造^[3-4]等领域具有广泛的应用, 越来越受到研究人员的关注。在实际应用中, 出于显微成像信号强度^[5]、泵浦探测时间分辨率^[2]等需求, 脉冲宽度需要压缩至几十飞秒。

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-05-24; 录用日期: 2021-06-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)

通信作者: *qianghao@usst.edu.cn

锁模脉冲光纤振荡器的输出功率一般是有限的,需要采用光纤放大器进行功率提升。啁啾脉冲放大(Chirped-pulse Amplification, CPA)技术作为超短脉冲放大的常用手段,通常使用衍射光学元件(棱镜对、光栅对等)作为压缩器,但在衍射效率、线性高阶色散匹配、光路复杂程度等方面还有待进一步改善^[6-7]。2017年,Elahi等^[8]在正色散光纤中将重复频率为40 MHz的种子脉冲从740 fs展宽至18 ps后,利用双包层光纤进行放大处理,通过光栅对去啁啾后,脉冲宽度为175 fs,脉冲能量为45.6 nJ,这是目前使用光栅压缩器产生的最短脉冲,光栅的衍射效率为56%。Luo等^[9]则报道了一种基于单模光纤的非线性放大压缩系统,该方案通过管理传输光纤中的色散及放大过程中的非线性相移累积量,在单模正色散放大器中实现了最短脉冲宽度达22.7 fs、脉冲能量达2.8 nJ的少周期脉冲输出,系统重复频率为44.6 MHz。为了获取50 fs量级的高功率超短脉冲,Ou等^[10]结合了CPA与非线性放大压缩技术,将重复频率为50 MHz、脉冲宽度为117 fs的种子脉冲输入10 m长的色散补偿光纤中进行展宽,然后通过全负色散光纤主放大器在功率放大的同时进行脉冲压缩,获得了脉冲宽度为47 fs、脉冲能量为24 nJ的脉冲输出,但脉冲旁瓣较为明显。2018年,Hekmat等^[11]将脉冲宽度为360 fs的种子脉冲通过正色散掺铒光纤预放大器进行自相似放大,得到脉宽宽度为1.32 ps、光谱宽度为26 nm的抛物线型预啁啾脉冲,再利用负色散双包层光纤主放大器进行非线性放大及脉冲压缩,获得了脉冲宽度为63 fs、脉冲能量为38 nJ的脉冲输出,重复频率为52 MHz。上述实验的光路结构采用了非保偏光纤,环境变化会干扰锁模振荡器及放大器的输出参数,系统稳定性和可靠性不足。2016年,Yu等^[12]搭建了基于全保偏单模光纤的放大压缩系统,两级放大器分别选用了增益系数和色散常数不同的掺铒光纤,通过单模光纤压缩后得到了脉冲宽度为34 fs、脉冲能量为1.6 nJ、重复频率为200 MHz的脉冲输出。2019年,Jiang等^[13]报道了基于保偏光纤的掺铒CPA系统,光纤振荡器输出的重复频率为48.8 MHz、脉冲宽度为370 fs的脉冲在保偏正色散光纤中展宽至30 ps,再经铈共掺双包层光纤放大后,被空间光栅对压缩至187 fs,对应的脉冲能量可达47.2 nJ。

分离脉冲放大(Divided-pulse Amplification,

DPA)在1.55 μm 波段也已被证明是一种极具潜力的功率放大方案,该技术通过对脉冲能量进行时域分割来管理光纤放大器中的非线性效应,避免了长尺度展宽光纤带来的高阶色散管理问题。目前尚未有在DPA系统中实现50 fs左右的脉冲输出的相关报道。2021年,Chen等^[14]数值模拟了基于预啁啾管理的分离脉冲放大方案,合成后脉冲宽度可达44 fs,但缺少相关实验论证。本文通过将分离脉冲放大与非线性压缩技术相结合,在1.55 μm 波段获得了平均功率为510 mW、脉冲宽度为55 fs的脉冲输出。

实验装置如图1(a)~(e)所示。其中,LD1与LD2为单模激光二极管,中心波长为976 nm,最大输出功率为400 mW;WDM为波分复用器;F-PBS为光纤偏振分束器;FRM为光纤法拉第反射镜;EDF为掺铒增益光纤;HWP为半波片;ISO为光隔离器(Thorlabs, IO-2.5-1550-HP);PBS为偏振分束晶体;COL1为光纤准直器;COL2与COL3为光纤耦合器;Divider为八脉冲分离器;Combiner为泵浦合束器;LD3为多模激光二极管,中心波长为976 nm,最大输出功率为27 W;EYDF为铈共掺双包层光纤;PM1550为单模保偏光纤;Port A为合成光输出端口;Port B为泄漏光输出端口。

种子光由一台重复频率为80.4 MHz的全保偏SESAM光纤振荡器提供,注入单模光纤预放大器的光功率为2.7 mW,中心波长为1557 nm,光谱宽度为7.79 nm。单模光纤预放大器由非保偏掺铒光纤(EDF80,群速度色散参量 $\beta_2 = 45.0 \text{ fs}^2/\text{mm}$)与无源匹配光纤(SMF-28e, $\beta_2 = -23.0 \text{ fs}^2/\text{mm}$)构成。图1(b)为预放大器示意图,双程放大结构可起到隔离环境扰动、抑制自发辐射的作用。光纤预放大器输出的脉冲经Divider后被等分割为8个子脉冲。如图1(d)所示,该脉冲分离器由长度分别为10,20,40 mm的钽酸钇(YVO_4)晶体构成,晶轴与水平轴分别成 45° 、 0° 、 45° 放置,依次提供6.7,13.4,26.8 ps的群速度延迟。双包层光纤主放大器采用与单模光纤预放大器相同的双程结构,增益光纤选择为铈共掺双包层光纤(EYDF, $\beta_2 = -22.0 \text{ fs}^2/\text{mm}$)。

实验探究了在不同脉冲宽度的注入条件下分离脉冲主放大器的合成效率,发现较长入射脉冲宽度有利于合成效率的提高。为避免偏振正交的相邻子脉冲在时域上产生重叠,选择的脉冲宽度最大为

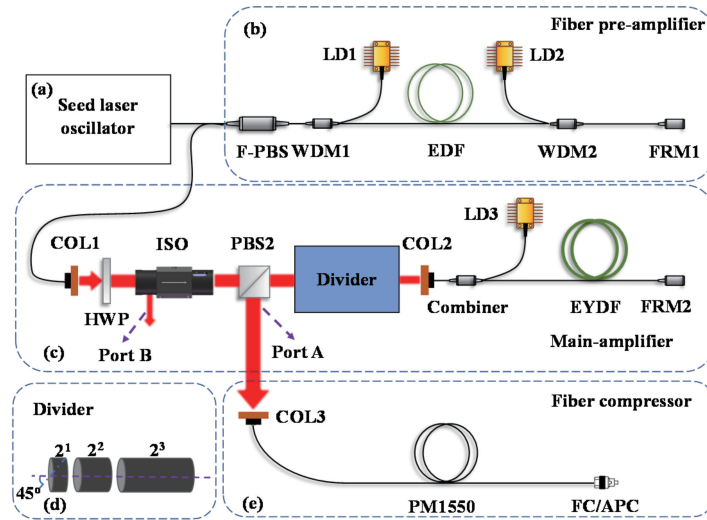


图 1 实验装置图。(a)掺铒光纤振荡器;(b)光纤预放大光路;(c)主放大光路;
(d)八脉冲分离器原理图;(e)光纤压缩器

Fig. 1 Experiment setups. (a) Er-doped fiber oscillator; (b) fiber pre-amplifier; (c) main-amplifier; (d) schematic of pulse divider with eight replicas; (e) fiber compressor

3.0 ps。当脉冲宽度分别为 1.7, 2.2, 3.0 ps 时,随着主放大抽运功率的增加,脉冲宽度为 3.0 ps 的脉冲始终保持较高的合成效率,而脉冲宽度为 2.2 ps 和 1.7 ps 的脉冲的合成效率表现出不同程度的下降,如图 2(a)所示。其中,当抽运功率在 2.5 W 以下时,合成效率几乎不随入射脉冲宽度发生变化,保持在 99.8% 以上。当抽运功率达到 7.9 W 时,脉冲宽度为 1.7 ps 的脉冲的合成效率降至 78.4%,脉冲宽度为 2.2 ps 的脉冲的合成效率降至 94.5%,脉冲宽度为 3.0 ps 的脉冲的合成效率仍能保持在 99.2%。此时,3.0 ps 脉冲的最大输出功率可以达 1.54 W,泄漏光功率仅为 13 mW,而 1.7 ps 脉冲的最大输出功率为 1 W,泄漏光功率达到了 287 mW,如图 2(b)和 2(c)所示。脉冲在经过脉冲分离装置中的双折射晶体后,将积累额外的群延时色散差,在

1560 nm 处第一个子脉冲与第八个子脉冲之间的群延时色散差异可达 3878.7 fs²。脉冲中原有频率成分积累的群延时色散差异可在分离和合成过程中互相补偿。但在放大过程中,自相位调制产生的新频率成分仅会在脉冲合成过程中积累群延时色散,从而降低脉冲相干性,这是造成合成效率下降的主要原因。此外,增益饱和和效应引起的子脉冲能量不一致、晶体的群速度色散对子脉冲的展宽以及增益光纤中由 Kramers-Kronig 关系导致的相位变化等也有可能影响最终的合成效率^[15-16]。当抽运功率在 2.5 W 以下时,子脉冲的峰值功率较低,传输过程中非线性效应并不明显,因此能保持较高的合成效率。由于非线性效应的强弱与脉冲能量正相关,且与脉冲宽度负相关,随着抽运功率的逐渐提升,非线性效应开始增强,脉冲积累的非线性相移增加,光谱在自

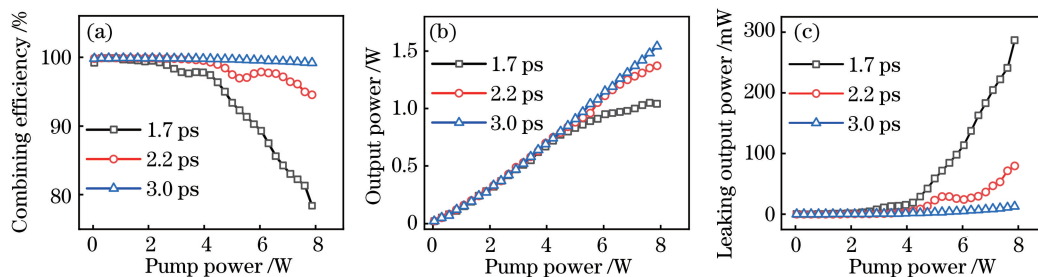


图 2 不同预放大输出脉冲宽度下的合成效率和输出功率。(a)合成效率随主放大抽运功率的变化曲线;
(b) Port A 端的输出功率随主放大抽运功率的变化曲线;(c) Port B 端的输出功率随主放大抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Combining efficiencies and output powers under different pre-amplifier output pulse durations. (a) Combining efficiency versus main-amplifier pump power; (b) output power of Port A versus main-amplifier pump power; (c) output power of Port B versus main-amplifier pump power

相位调制的作用下产生大量新频率成分,相应的合成效率开始下降,且同一抽运功率下脉冲宽度越窄,合成效率的下降越明显。因此,实验下一步选取平均功率为 74.8 mW、脉冲宽度为 3.0 ps、光谱宽度为 17.9 nm(相应的时间带宽积为高斯拟合傅里叶变换极限的 14.4 倍)的预啁啾脉冲注入主放大器中。

为产生亚百飞秒脉冲,将主放大器的输出脉冲耦合进一段单模光纤(PM1550,模场直径为 8.5 μm)中进行非线性压缩,如图 1(e)所示,光纤耦合器(COL3)的效率为 75.6%。在非线性压缩过程中,光谱展宽与脉冲压缩的程度与非线性相移和群速度色散密切相关。当注入功率过高时,光谱在自

相位调制(Self-phase modulation, SPM)的作用下迅速展宽,过量的非线性相移使得脉冲时域自相关曲线表现出较大的基底。我们通过调节主放大器的抽运功率和改变光纤长度来优化输出脉冲参数。系统在单模光纤长度为 52 cm、脉冲平均功率为 510 mW 时,得到了最短脉冲输出为 55 fs。此时,Port A 端的光谱宽度为 23.58 nm,脉冲宽度为 1.2 ps,分别如图 3(a)和 3(b)所示,相应的时间带宽积为傅里叶变换极限的 7.87 倍(高斯拟合)。图 3(c)显示了经光纤压缩后的光谱,该光谱的傅里叶变换极限脉冲宽度为 49 fs。压缩后的脉冲强度自相关曲线如图 3(d)所示,可以看到,脉冲宽度仅为傅里叶变换极限脉冲宽度的 1.12 倍。

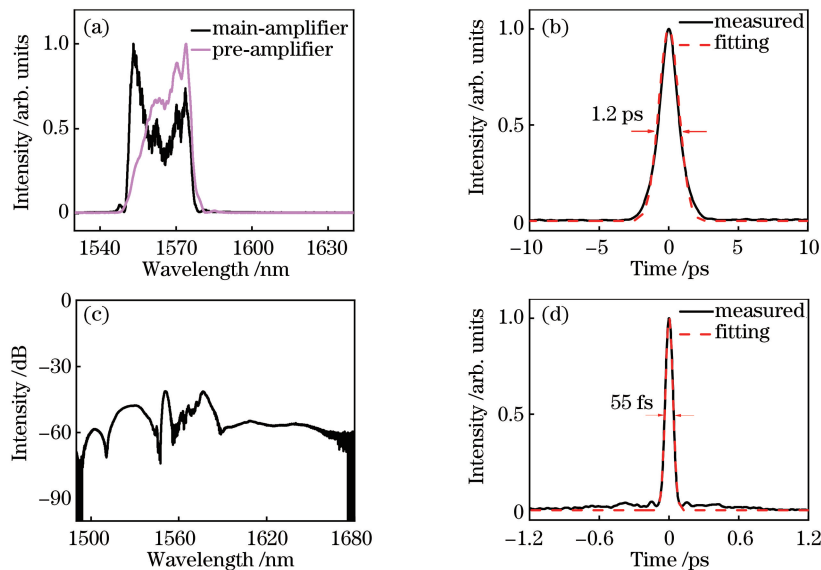


图 3 光谱图和自相关图。(a)预放大和主放大输出光谱;(b)主放大输出脉冲的强度自相关曲线;(c)压缩后的输出光谱;(d)压缩后的输出脉冲的强度自相关曲线

Fig. 3 Spectra and auto-correlograms. (a) Output spectra of pre-amplifier and main-amplifier; (b) intensity autocorrelation traces of main-amplifier output pulse; (c) output spectrum after compression; (d) intensity autocorrelation traces of output pulse after compression

随后,使用焦距为 8 mm 的透镜将输出脉冲聚焦到一块周期性极化掺氧化镁铌酸锂晶体(MgO:PPLN)上,在常温下进行光学倍频处理。晶体通光方向长度为 0.3 mm,极化周期为 20.6 μm 。当飞秒脉冲的入射光功率为 470 mW 时,倍频光功率为 146 mW,相应的倍频效率为 31%,光谱中心波长位于 783.4 nm。实验测量得到的倍频光脉冲宽度为 75 fs,脉冲展宽是由于晶体倍频带宽有限。

综上,介绍了基于八脉冲皮秒分离放大技术的掺铒光纤激光器,通过单模光纤非线性压缩产生了平均功率为 510 mW、脉冲宽度为 55 fs 的脉冲输出。下一步,计划采用大模场直径光子晶体光纤替

换单模光纤进行非线性压缩,有望进一步提升压缩后的脉冲的输出功率。

参 考 文 献

- [1] Zach A, Mohseni M, Polzer C, et al. All-fiber widely tunable ultrafast laser source for multimodal imaging in nonlinear microscopy[J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5218-5221.
- [2] Gambetta A, Galzerano G, Rozhin A G, et al. Sub-100 fs two-color pump-probe spectroscopy of single wall carbon nanotubes with a 100 MHz Er-fiber laser system[J]. Optics Express, 2008, 16(16): 11727-11734.

- [3] Tokel O, Turnalı A, Makey G, et al. In-chip microstructures and photonic devices fabricated by nonlinear laser lithography deep inside silicon [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(10): 639-645.
- [4] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(8): e16133.
- [5] Wang T Y, Xu C. Three-photon neuronal imaging in deep mouse brain[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 947-960.
- [6] Yang W, Wu D L, Wu R L, et al. Femtosecond fiber laser at 780 nm for two-photon autofluorescence imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(7): 071405.
- [7] 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.
- [8] Elahi P, Kalaycıoğlu H, Li H H, et al. 175 fs-long pulses from a high-power single-mode Er-doped fiber laser at 1550 nm[J]. *Optics Communications*, 2017, 403: 381-384.
- [9] Luo H, Zhan L, Zhang L, et al. Generation of 22.7-fs 2.8-nJ pulses from an erbium-doped all-fiber laser via single-stage soliton compression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(17): 3780-3784.
- [10] Ou S M, Liu G Y, Lei H, et al. Generation of 47 fs pulses from an Er: fiber amplifier [J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(7): 074207.
- [11] Hekmat M J, Omoomi M, Gholami A, et al. All-fiber high-power monolithic femtosecond laser at 1.59 μm with 63-fs pulse width[J]. *Applied Physics B*, 2017, 124(1): 1-7.
- [12] Yu J, Feng Y, Cai Y J, et al. 34-fs, all-fiber all-polarization-maintaining single-mode pulse nonlinear amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16630-16637.
- [13] Jiang X G, Chen F H, Yin T C, et al. Generation of high-power 780 nm femtosecond pulses by an all-polarization-maintaining Er-doped fiber amplification system[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(16): 4492-4496.
- [14] Chen R Z, Chang G Q. Pre-chirp managed divided-pulse amplification using composite birefringent plates for pulse division and recombination: en route toward GW peak power[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 6330-6343.
- [15] Guichard F, Hanna M, Zaouter Y, et al. Analysis of limitations in divided-pulse nonlinear compression and amplification[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 619-623.
- [16] Kienel M, Klenke A, Eidam T, et al. Analysis of passively combined divided-pulse amplification as an energy-scaling concept[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 29031-29042.