

全光纤超短脉冲掺铒光纤自相似放大系统研究

夏敬华, 王 蓊*, 宋华溢, 杜沅朋

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年2月26日; 录用日期: 2024年4月5日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

本文研究了1.5 μm 波段基于全光纤结构的超短脉冲掺铒光纤自相似放大器。采用正常色散的掺铒增益光纤分析脉冲在放大过程中的自相似演化过程。实验将种子源输出的重复频率为44 MHz, 脉冲宽度为797 fs的信号光经预放大级, 用高增益正色散掺铒光纤将种子源输出的孤子脉冲整形为抛物线型脉冲, 整形后的信号光通过主放大级使用双向泵浦方式将0.43 mW的种子光输出功率放大到60.14 mW, 实现主放大级功率放大且光谱宽度为61.69 nm, 脉冲宽度1.82 ps。最后经2.3 m长的普通单模光纤(SMF)进行压缩。最终实现了平均输出功率60.14 mW, 脉冲宽度83 fs, 峰值功率16.85 kW的高功率自相似超短脉冲输出。

关键词

全光纤结构, 自相似放大, 超短脉冲

Research on the Self Similarity Amplification System of All Fiber Structure Ultra Short Pulse Erbium-Doped Fiber

Jinghua Xia, Ji Wang*, Huayi Song, Yuanpeng Du

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 26th, 2024; accepted: Apr. 5th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

Abstract

This article studied 1.5 μm band ultra short pulse erbium-doped fiber self similarity amplifier based on all fiber structure, and analyzed the self similarity evolution process of pulses during amplification using erbium-doped gain fibers with normal dispersion. In the experiment, the sig-

*通讯作者。

nal light output by the seed source with a repetition frequency of 44 MHz and a pulse width of 797 fs was subjected to a pre amplification stage. The soliton pulse output by the seed source was formed into a parabolic pulse using a high gain positive dispersion erbium-doped fiber. The shaped signal light was amplified from 0.43 mW to 60.14 mW using a bidirectional pump method in the main amplification stage, achieving power amplification in the main amplification stage with a spectral width of 61.69 nm and a pulse width of 1.82 ps. Finally, it was compressed using a 2.3-meter-long ordinary single-mode fiber (SMF). Ultimately, a high-power self similar ultra short pulse output was achieved with an average output power of 60.14 mW, a pulse width of 83 fs, and a peak power of 16.85 kW.

Keywords

All Fiber Structure, Self Similarity Amplification, Ultra Short Pulse

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 利用掺铒光纤产生和传输高功率、高能量且具有严格线性啁啾特性的超短脉冲是光纤光学领域的研究热点之一[1] [2]。自相似抛物线型脉冲很好的解决了传输中脉冲强度受限的问题[3], 脉冲在高功率传输时, 时域脉冲不会变形, 具有抵制光波分裂的能力[4]。另外, 这种脉冲自相似特性只与入射脉冲的初始能量有关, 且自相似脉冲严格的线性正啁啾, 可以进行高质量的脉冲压缩, 获得高功率的超短脉冲[5] [6] [7]。因此, 研究脉冲的自相似特性, 对于高功率的超短脉冲输出以及科学研究等领域具有非常重要的应用价值。2000年, Ferman 等首次证明, 在只考虑自相位调制和群速度色散的条件下, 光脉冲通过较长的正色散增益光纤时, 只要有足够长的传输距离, 脉冲形状最终就会演化成抛物线型。以此开始了对自相似脉冲放大理论的详细研究[8]。经过几年的快速发展, 在 2010 年, Bulent Oktem 等人搭建了一套孤子-自相似子光纤激光器(soliton-similariton fiber laser)。首次实现脉冲在掺铒光纤中的自相似放大, 最终获得脉冲能量为 3.1 nJ, 脉冲宽度为 110 fs 的脉冲输出[9]。2015 年, Liu W 等设计一套基于预啁啾管理的掺铒光纤自相似放大器, 输出重复频率 75 MHz, 输出脉冲经光栅对压缩至 60 fs, 平均功率高达 100 W [10]。2018 年, 李源等人设计了超短脉冲激光自相似放大系统, 用皮秒脉冲激光器做振荡级, 最后获得重复频率 60 MHz, 脉冲宽度 94 fs, 单脉冲能量为 70 nJ 的超短脉冲激光输出[11]。2020, Graini L 等人首次研究了多模光纤中自相似抛物线型脉冲演化的时空动力学, 研究了输入脉冲能量及其初始模态对产生的抛物线型脉冲和相应的空间光束轮廓的影响。当基模被高效激发时, 脉冲演化为线性啁啾脉冲, 其强度呈抛物线形状[12]。同年, 贺明洋等基于自相似光纤放大技术, 在大模场光子晶体光纤中实现自相似放大, 最终得到中心波长 1030 nm、重复频率 40 MHz、平均功率 34 W、脉冲宽度 50 fs, 峰值功率 17 MW 的高质量脉冲输出[13]。

本文对掺铒光纤自相似放大器进行了研究, 首先通过一段正色散掺铒光纤, 将孤子脉冲整形为自相似抛物线型脉冲, 然后通过一段正色散掺铒光纤对自相似脉冲进行了功率放大, 最后使用一段负色散的普通单模光纤完成了脉冲压缩, 通过实验获得平均输出功率 60.14 mW, 脉冲宽度 83 fs, 峰值功率 16.85 kW 的高功率自相似超短脉冲输出。

2. 实验装置与原理

全光纤超短脉冲掺铒光纤自相似放大器实验结构如图 1 所示, 包括脉冲整形预放大级和功率放大级。

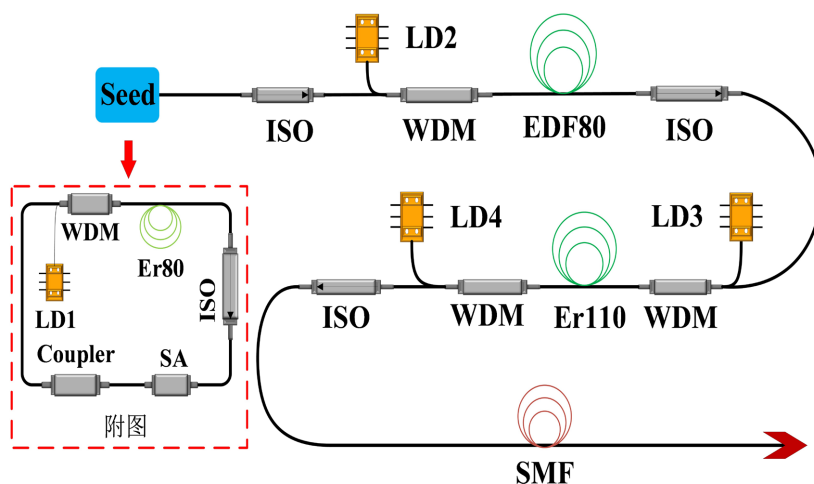


Figure 1. Experimental structure diagram of ultra short pulse erbium-doped fiber self-similarity amplifier

图 1. 超短脉冲掺铒光纤自相似放大器实验结构图

种子源是自行研制的碳纳米管可饱和吸收体锁模光纤激光器。利用 980 nm 的半导体激光器 LD1 作为泵浦源, 经过波分复用器(WDM)将泵浦光与信号光耦合进 0.25 m 长的掺铒增益光纤 Er80 中, 增益光纤的模场直径为 $9.5 \mu\text{m}@1550 \text{ nm}$; 纤芯的峰值吸收为 $80 \text{ dB/m}@1530 \text{ nm}$; 数值孔径 $\text{NA} = 0.13$; 色散 $D = 16 \text{ ps/km/nm}$; 可以算出 $\beta_2 = -20.26 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。碳纳米管薄膜夹持在两个 FC/PC 连接器中间, 构成三明治结构的可饱和吸收体。最后使用耦合器来提取激光器中 10% 的光用于输出, 其余 90% 的光保留在激光环形腔内继续循环。

自相似掺铒光纤放大器由脉冲整形预放大级和功率放大级组成, 两级放大器的增益光纤均采用正色散的掺铒光纤。预放大级中使用 980 nm 的半导体激光器 LD2 连接到掺铒增益光纤前端的 WDM 上进行前向泵浦, 信号光与泵浦光经 WDM 耦合进高正色散的 EDF80 掺铒光纤中, 经隔离器输出, 以此实现抛物线型脉冲的输出, 其中掺铒增益光纤长度为 2.4 m, 色散为 $D = -48 \text{ ps/km/nm}$, 计算得到 $\beta_2 = 61 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。功率放大级采用双向泵浦方式, 分别采用两个 980 nm 的半导体激光器 LD3、LD4 作为泵浦源, 功率放大级的增益光纤为具有高增益的 Er110 掺铒增益光纤, 长度为 0.9 m, 模场直径为 $6.5 \mu\text{m}@1550 \text{ nm}$, 色散值 $D = -12 \sim -18 \text{ ps/km/nm}$, 可以算出 $\beta_2 = 15.3 \sim 22.9 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。最后, 采用单模光纤(SMF-28e)对放大后的激光进行脉宽压缩, 用来补偿放大过程中产生的线性啁啾以实现超短脉冲输出。

3. 结果与讨论

3.1. 种子源的输出特性

我们搭建了如图 1 附图中所示的锁模光纤激光器, 当种子源的环形腔内放入碳纳米管后, 不断的增加泵浦功率, 观察示波器。在泵浦功率增加到 35 mW 时形成了稳定的锁模脉冲。图 2 给出了泵浦功率 35 mW 时锁模脉冲的脉冲序列图, 锁模脉冲的重复频率为 44 MHz。图 3 为实验测得锁模掺铒光纤激光器的输出光谱和自相关曲线, 如图 3 所示, 中心波长为 1559.8 nm, 光谱宽度 3.89 nm, 脉冲宽度为 797 fs, 且种子脉冲形状是双曲正割型的孤子脉冲。

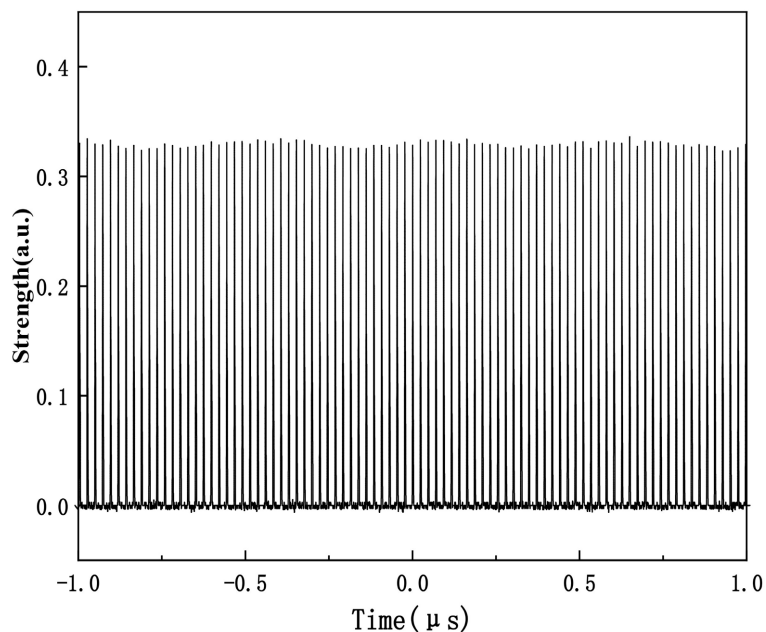


Figure 2. Output pulse sequence of mode-locked fiber laser
图 2. 锁模光纤激光器输出脉冲序列

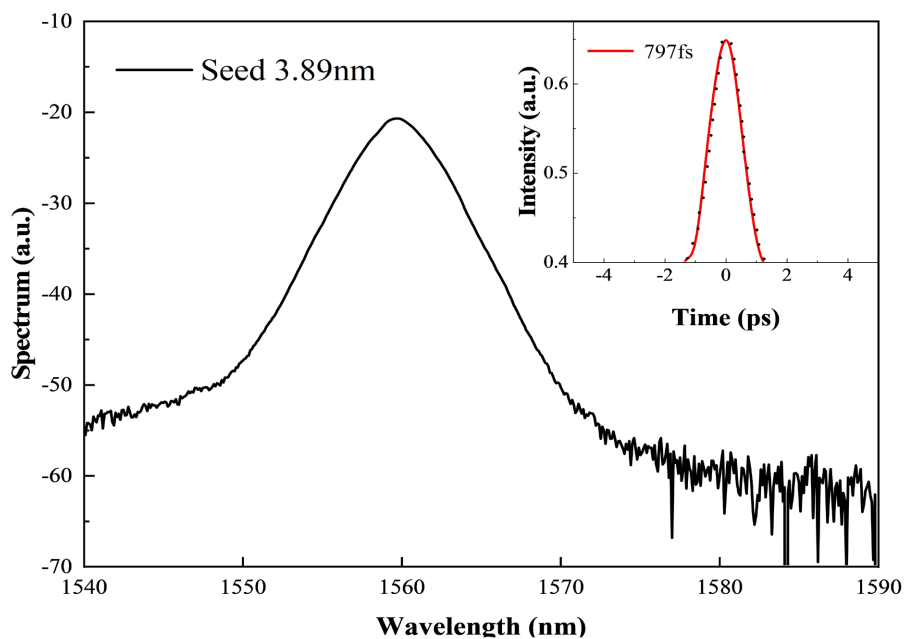


Figure 3. Output spectrum of mode-locked fiber laser with a pump power of 35 mW (the illustration shows the output autocorrelation curve of a mode-locked fiber laser)
图 3. 泵浦功率 35 mW 时锁模光纤激光器输出光谱(插图为锁模光纤激光器输出自相关曲线)

3.2. 预放大级实验结果及分析

基于自相似放大原理, 自相似抛物线型脉冲需通过正常色散光纤得以演化形成[14]。为此, 实验选用 2.4 m 长的低增益高色散的掺铒光纤作为预放大级的增益光纤, 选用前向泵浦方式。如图 4 所示, 为随着泵浦功率增加预放大级输出脉冲形状的演变过程。从图中可以看出, 随着泵浦功率的不断增加, 脉冲宽

度也被逐渐展宽。泵浦功率从 60 mW 增加到 90 mW 时, 脉冲宽度从 1.15 ps 展宽至 1.22 ps, 且脉冲形状由双曲正割型的孤子脉冲演变为抛物线型自相似脉冲。

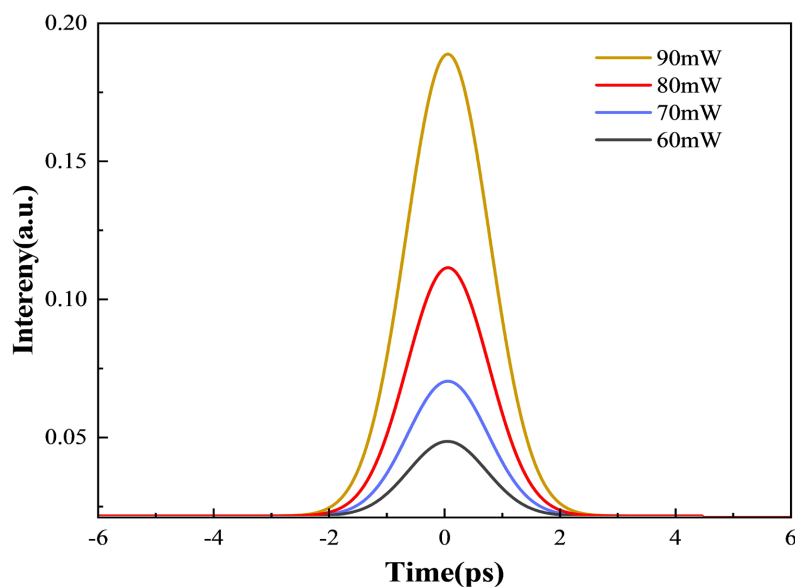


Figure 4. Pulse autocorrelation curve at pump power of 60~90 mW in the preamplifier stage
图 4. 预放大级泵浦功率 60~90 mW 时的脉冲自相关曲线

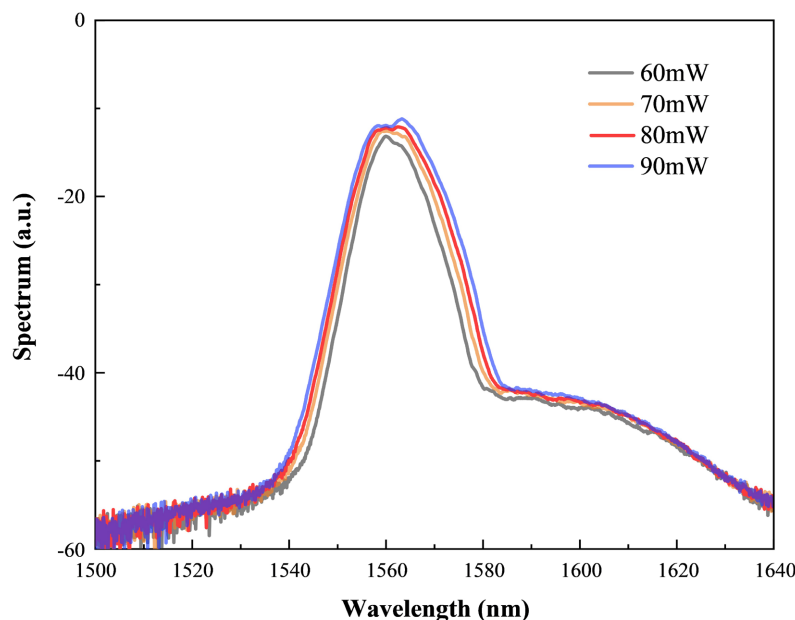


Figure 5. Evolution of spectral curve at pre amplification stage pump power of 60~90 mW
图 5. 预放大级泵浦功率 60~90 mW 时光谱曲线的演变

在获得抛物线型时域脉冲的同时, 也要保证预放大后的光谱能够尽量保持抛物线形状而不发生畸变, 从而为之后的主放大级提供良好的信号光。为此, 测量了随着泵浦功率增加预放大级输出光谱的演化过程, 如图 5 所示。从图 5 中我们可以分析出, 当泵浦光功率从 60 mW 增加到 90 mW 时, 测得光谱宽度从 8.31 nm 被不断展宽至 11.95 nm。图 5 中红色曲线为泵浦功率 80 mW 时的光谱曲线, 光谱曲线顶部趋

于平滑，边沿陡峭，形状较好且无畸变，符合抛物线特征。图 5 中蓝色曲线为泵浦光功率 90 mW 时的光谱，曲线顶部不再平滑开始发生畸变，这是由于自相位调制效应引起的，光谱宽度会随泵浦功率的增加而不断展宽，当泵浦功率持续增加时会导致光谱形状开始发生畸变[15]。结合图 4、图 5 预放大过程中脉冲和光谱的演化特性，在泵浦功率 80 mW 时，获得光谱宽度 11.11 nm，脉冲宽度 1.20 ps、功率 3.81 mW 的自相似脉冲，由此作为主放大级的输入信号。

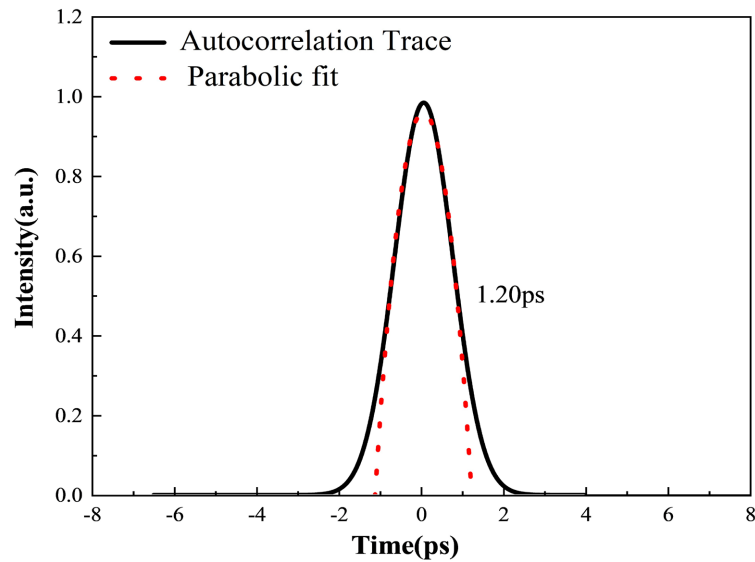


Figure 6. Autocorrelation parabolic fitting curve for pre amplification stage pump power of 80 mW
图 6. 预放大级泵浦功率 80 mW 时自相关抛物拟合曲线

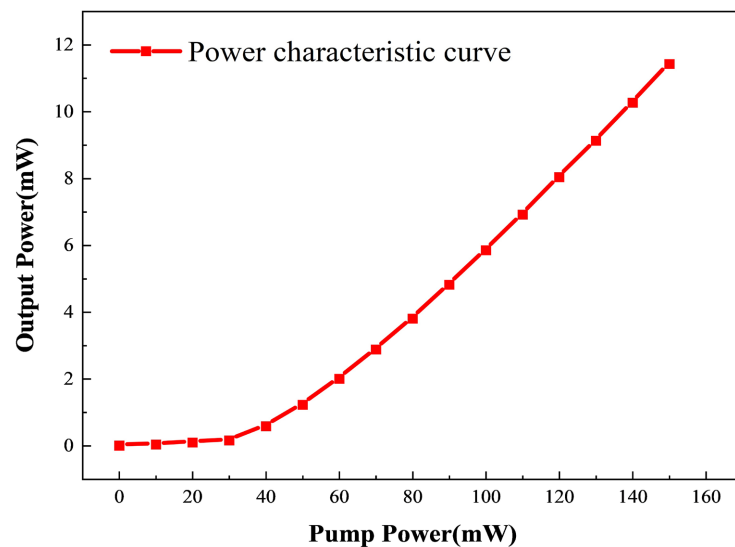


Figure 7. Output power characteristic curve of the preamplifier stage
图 7. 预放大级输出功率特性曲线

预放大级的作用主要是实现将种子光输出的孤子脉冲整形形成自相似抛物型脉冲，为此我们将预放大级获得的输出脉冲进行了抛物线拟合，如图 6 所示。根据图 6 中的拟合结果显示，预放大级输出脉冲形状符合自相似抛物线型，其中实线是实际测量曲线，虚线是抛物拟合曲线。如图 7 所示，为预放大级的

输出功率随泵浦功率的变化情况。在预放大级中,使用 2.4 m 长的正色散掺铒光纤,在泵浦功率 80 mW 时,脉冲形状由种子源输出的双曲正割型演变为类似抛物线型的自相似脉冲。

3.3. 主放大级实验结果及分析

主放大级为双向泵浦方式,采用 0.9 m 长的高增益低正色散的掺铒光纤作为增益介质,用于功率放大和光谱展宽,前向和后向泵浦源的最大输出功率分别为 850 mW 和 550 mW。首先增加前向泵浦,当泵浦增加到最大功率 850 mW 时,开启后向泵浦,泵浦功率最大可增加到 550 mW。随着泵浦功率的增加,脉冲宽度的变化如图 8 所示,泵浦功率从 450 mW 增加至 1400 mW 时,脉冲宽度从 1.49 ps 展宽至 1.82 ps。

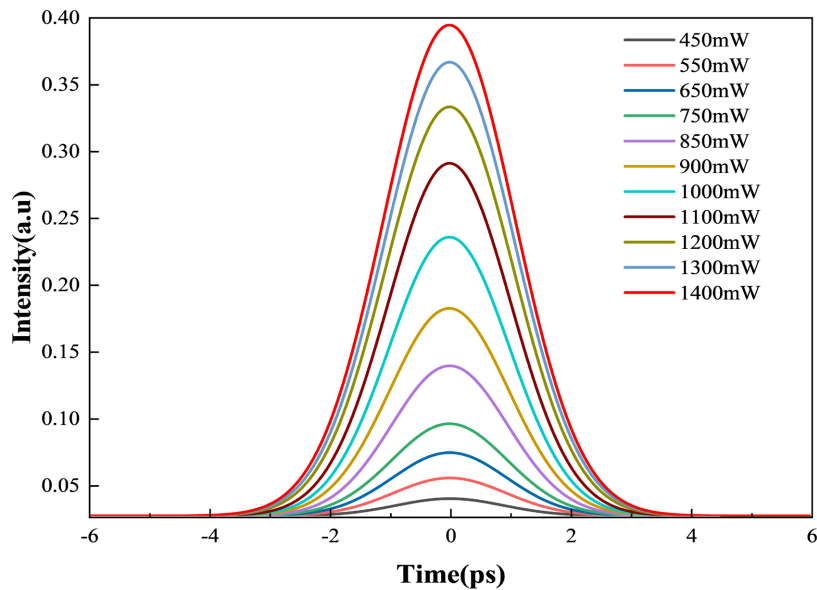
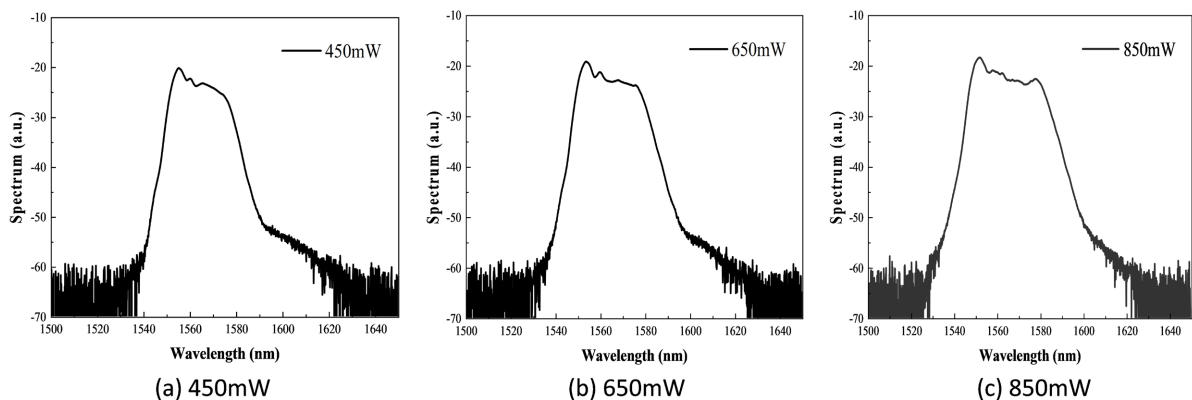


Figure 8. Pulse autocorrelation curve at pump power of 450~1400 mW in the main amplifier stage
图 8. 主放大级泵浦功率 450~1400 mW 时的脉冲自相关曲线

如图 9 所示,对不同泵浦功率下的主放大级输出光谱进行了测量。从图 9(a)~(f)中分析出,当泵浦光功率从 450 mW 增加到 1400 mW 时,随着泵浦功率的提高,由于非线性效应的影响,光谱宽度被不断展宽,光谱顶部也逐渐变得平坦,观察光谱有着波浪形结构的顶部和陡峭的边缘,是典型的自相似孤子的特征。当两个泵浦的功率增加到最大值时,如图 9(f)红色曲线所示,测得光谱宽度可达到 61.69 nm,此时的泵浦总功率为 1400 mW。



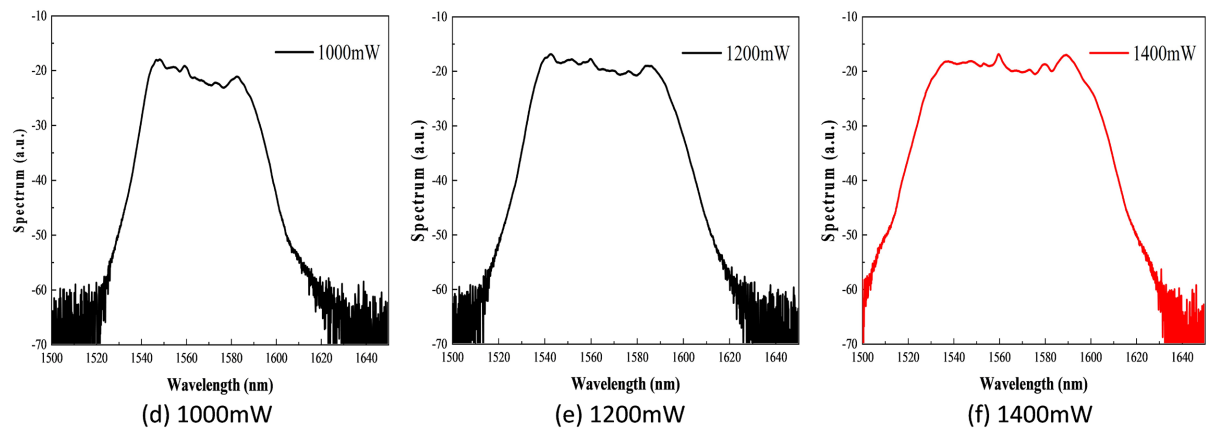


Figure 9. Evolution of spectral curve at pump power of 450~1400 mW in the main amplifier stage
图 9. 主放大级泵浦功率 450~1400 mW 时光谱曲线的演变

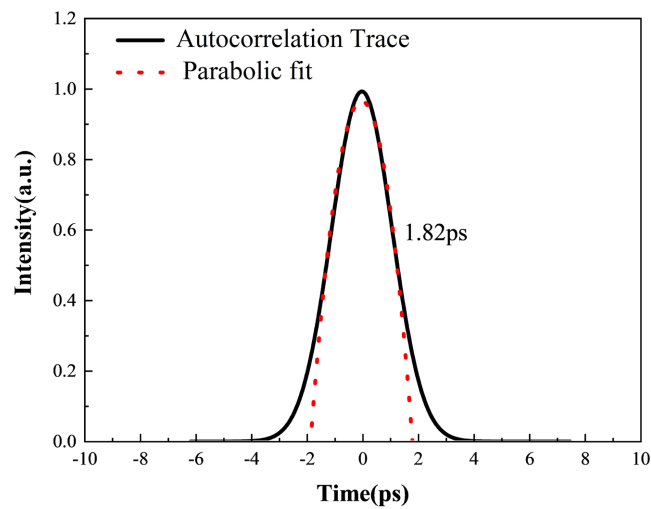


Figure 10. Autocorrelation parabolic fitting curve at main amplified pump power of 1400 mW
图 10. 主放大泵浦功率 1400 mW 时自相关抛物拟合曲线

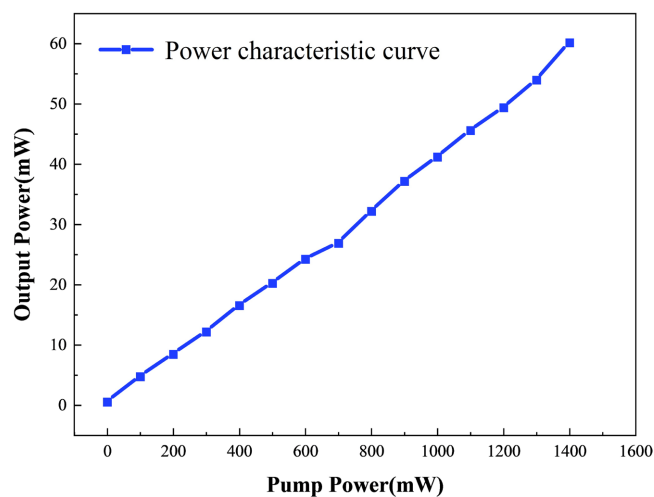


Figure 11. The variation of output power of the main amplifier stage with pump power
图 11. 主放大级输出功率随泵浦功率的变化

根据自相似脉冲具有抛物线形状,且在放大过程中也能保持抛物线形状这一特性,如图 10 为泵浦功率 1400 mW 时的脉冲形状曲线及其抛物线拟合曲线,验证了在主放大级中脉冲形状仍然保持抛物型。如图 11 所示,为主放大级的输出功率随泵浦功率的变化情况,最终功率被放大至 60.14 mW。结合图 8、图 9 主放大过程中脉冲和光谱的演化特性,最终在泵浦功率 1400 mW 时,获得光谱宽度 61.69 nm,脉冲宽度 1.82 ps,输出功率 60.14 mW 的脉冲输出。

3.4. 脉冲压缩实验结果及分析

由于自相似脉冲在放大过程中不断积累线性正啁啾,所以选择具有负色散单模光纤 SMF 进行脉冲压缩。通过改变单模光纤长度发现在 2.3 m 的 SMF 长度处脉冲得到最有效压缩。图 12 显示了在 2.3 m 单模光纤长度下测得的脉冲自相关轨迹。红色实线是压缩后的脉冲轨迹,蓝色实线是主放大后的脉冲轨迹,获得脉冲宽度 83 fs,峰值功率 16.85 kW 的超短脉冲输出。

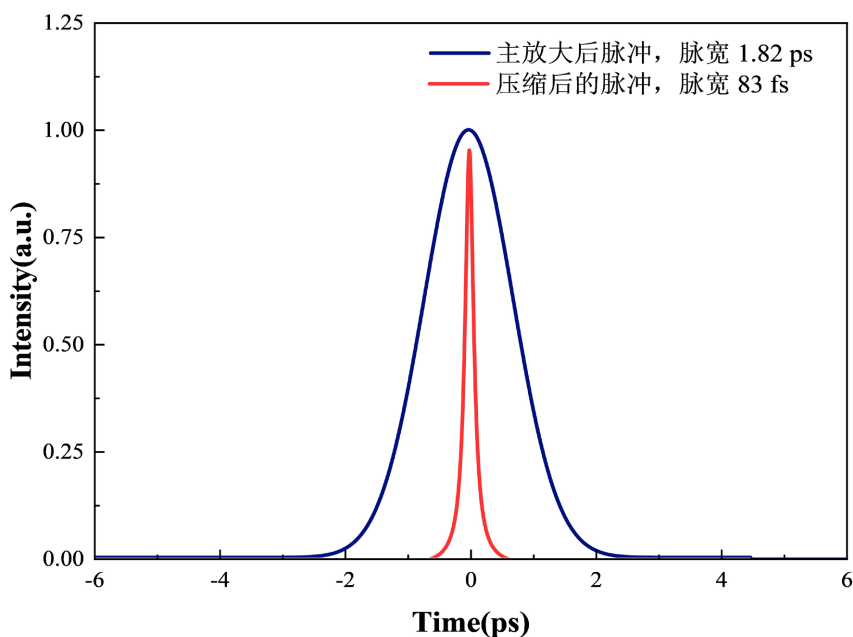


Figure 12. Autocorrelation curve of compressed optical fiber at 2.3 m (blue solid line as the main amplified autocorrelation curve, red solid line as the compressed autocorrelation curve)

图 12. 压缩光纤 2.3 m 时的自相关曲线(蓝色实线为主放大后的自相关曲线,红色实线为压缩后自相关曲线)

4. 结论

本文基于自相似放大技术搭建了一种超短脉冲放大系统,采用全光纤结构的环形腔获得锁模脉冲,通过预放大级在高正色散掺铒增益光纤中实现了自相似放大,经主放大级在高增益的掺铒光纤中实现功率放大和光谱展宽,压缩后最终得到平均功率 60.14 mW、脉冲宽度 83 fs、峰值功率 16.85 kW 的脉冲输出。在泵浦光功率最大时,没有达到增益饱和。因此,使用更高功率的泵浦源有望输出更高功率及更窄脉冲宽度的激光。通过优化系统和各模块尺寸,有望进一步减小系统的体积,使其广泛应用于工业和其他科学研究领域。

参考文献

- [1] 于峰,葛廷武,代京京,等. 全光纤结构超短脉冲光纤放大器[J]. 光电工程, 2011, 38(3): 115-118.

-
- [2] Hua, Y., Chang, G., Kärtner, F.X., *et al.* (2018) Pre-Chirp Managed, Core-Pumped Nonlinear PM Fiber Amplifier Delivering Sub-100-fs and High Energy (10 nJ) Pulses with Low Noise. *Optics Express*, **26**, 6427-6438. <https://doi.org/10.1364/OE.26.006427>
- [3] 李莉苹, 张爱玲. 正色散光纤中产生自相似脉冲的数值模拟[J]. 天津理工大学学报, 2011, 27(3): 1-5.
- [4] Dudley, J.M., Finot, C., Richardson, D.J., *et al.* (2007) Self-Similarity in Ultrafast Nonlinear Optics. *Nature Physics*, **3**, 597-603. <https://doi.org/10.1038/nphys705>
- [5] 江光裕, 陈凤英, 龚勇清, 等. 高非线性光纤产生自相似抛物线脉冲的特性研究[J]. 光学技术, 2010, 36(2): 269-273.
- [6] Li, W., Luo, D., Liu, Y., *et al.* (2020) 130 W, 180 fs Ultrafast Yb-Doped Fiber Frequency Comb Based on Chirped-Pulse Fiber Amplification. *Optics Express*, **28**, 4817-4824. <https://doi.org/10.1364/OE.386211>
- [7] 吴正国. 掺铒光纤放大器关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [8] Fermann, M.E., Kruglov, V.I., Thomsen, B.C., *et al.* (2000) Self-Similar Propagation and Amplification of Parabolic Pulses in Optical Fibers. *Physical Review Letters*, **84**, 6010-6013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.6010>
- [9] Oktem, B., Ülgüdür, C. and Ilday, F. (2010) Soliton-Similariton Fibre Laser. *Nature Photonics*, **4**, 307-311. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.33>
- [10] Liu, W., Schimpf, D.N., Eidam, T., *et al.* (2015) Pre-Chirp Managed Nonlinear Amplification in Fibers Delivering 100 W, 60 fs Pulses. *Optics Letters*, **40**, 151-154. <https://doi.org/10.1364/OL.40.000151>
- [11] 李源. 高能量窄脉宽飞秒激光自相似放大系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [12] Graini, L. and Ortac, B. (2020) Spatiotemporal Dynamics of Self-Similar Parabolic Pulse Evolution in Multimode Fibers. arXiv: 2006.11133.
- [13] 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): 255-260.
- [14] Du, L., Jin, C.H., Yang, Z., *et al.* (2022) Broadband Fiber Chirped-Pulse Amplification System Based on Parabolic Evolution. *Acta Photonica Sinica*, **51**, 1114002. <https://doi.org/10.3788/gzxb20225111.1114002>
- [15] 石郑楠. 2 μm 波段自相似脉冲的理论及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.