

# 1 MHz, 273 W 掺镱棒状光纤啁啾脉冲放大系统\*

王栋梁<sup>1)2)</sup> 史卓<sup>1)2)</sup> 王井上<sup>1)2)</sup> 吴洪悦<sup>3)</sup> 张晓辉<sup>4)5)†</sup> 常国庆<sup>1)2)6)‡</sup>

1) (中国科学院物理研究所, 光物理重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240)

4) (华南理工大学材料科学与工程学院, 广州 510275)

5) (季华实验室, 佛山 528200)

6) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

(2024年2月28日收到; 2024年5月20日收到修改稿)

掺镱超快光纤激光器因光束质量好、输出功率高而被广泛应用于科学研究、工业加工、医疗诊断等领域。大模场面积的棒状光纤可以提供平均功率在百瓦量级的高能量飞秒脉冲输出, 本文基于掺镱棒状光纤搭建了啁啾脉冲放大系统, 详细研究脉冲输入功率对脉冲放大及压缩的影响。实验结果表明, 在低放大功率下 ( $< 160$  W) 增大输入功率可提升放大效率且脉冲压缩质量基本不受影响; 当放大功率进一步增大时, 需选择合适的输入功率避免积累过量非线性相位。该啁啾脉冲放大系统可将 20 W 圆偏光输入放大至 305 W, 压缩后产生平均功率为 273 W、能量为 273  $\mu$ J 的 264 fs 脉冲, 脉冲平均功率和峰值功率比 Pedersen 课题组 (Pedersen M E, Johansen M M, Olesen A S, Michieletto M, Gaponenko M, Maack M D 2022 *Opt. Lett.* **47** 5172) 结果约提升了一倍。

**关键词:** 超快光纤激光, 高平均功率, 脉冲放大

**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.-i

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240300

## 1 引言

光纤、碟片、板条是获得高功率超快激光的常见技术, 光纤激光器增益光纤长度长更加有利于散热, 获得了目前超快激光的最高功率。掺镱 ( $\text{Yb}^{3+}$ ) 超快光纤激光器因输出功率高、散热效果好、光束质量佳、光电效率高、空间体积小等优点, 在基础研究、工业加工、医疗诊断等许多领域发挥着巨大作用, 是当前超快激光研究的最热领域之一<sup>[1,2]</sup>。啁啾脉冲放大技术 (chirped-pulse amplification, CPA) 的出现使得高能量、高功率脉冲的获得成为了可

能<sup>[3]</sup>。考虑到超快激光的各种实际应用, 人们希望获得脉宽更短、能量更高的高峰值功率脉冲。受限于增益窄化和色散失配等因素, 掺镱光纤 CPA 系统输出的压缩脉冲宽度通常大于 200 fs, 因此改变光纤结构增大脉冲能量从而提升峰值功率成为了科研人员的研究重点<sup>[4,5]</sup>。

更大的模场面积允许光纤输出更高的脉冲峰值功率。受限于芯层/包层之间折射率差, 阶跃型单模光纤的最大纤芯直径约为 15  $\mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>。光子晶体光纤的纤芯周围被波长或亚波长尺度的微结构空气孔包围, 这些空气孔有效降低了包层区域的折射率, 使得光子晶体光纤的模场直径可达 50  $\mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>。

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFB3602602) 和国家自然科学基金 (批准号: 62175255, 62227822) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: 202011004153@mail.scut.edu.cn

‡ 通信作者。E-mail: guoqing.chang@iphy.ac.cn

进一步增大模场直径将产生高阶模,但是不同的模式与纤芯掺杂区域的重叠程度不同,基模的重叠最大,阶数越高的模式与掺杂区的重叠越差.基于这种高阶模离域效应,Eidam等<sup>[8]</sup>发明了可实现准单模运转的掺镱大间距光纤 (large pitch fiber, LPF).由于基模对弯曲非常敏感,这种光纤通常笔直地封装在散热座之内,呈现棒状,因此也被称作棒状光纤.截止目前,LPF光纤的最大纤芯直径为135  $\mu\text{m}$ ,模场面积超过普通单模光纤的100倍<sup>[9]</sup>.

产自丹麦NKT公司的纤芯直径为85  $\mu\text{m}$ 的商用LPF光纤已取得诸多成果.截至目前,采用被动合成技术实现了平均功率大于100 W、脉冲能量大于1 mJ的输出<sup>[10]</sup>;采用主动合成技术实现了脉冲能量大于30 mJ的高能量输出<sup>[11]</sup>和平均功率大于1000 W的高功率输出<sup>[12,13]</sup>.该公司单根棒状光纤稳定输出的功率小于150 W,进一步提升超快光学激光系统的参数需改进光纤结构,减少光纤内的热量积累,提高光纤的横模不稳定阈值.最近,NKT研制了最新款的棒状光纤,将976 nm泵浦吸收提升至17 dB,有效缓解了光纤内的热量积累并提高了放大效率.2022年,NKT公司报道了他们最新版棒状光纤的输出结果,实现了单棒大于200 W的输出,且可以长时间稳定工作,但受限于光栅压缩系统的低效率及未补偿的高阶色散,最终输出功率仅有175 W,且脉冲基底较大<sup>[14]</sup>.

本文搭建基于该新款棒状光纤的CPA系统,详细探究在不同放大功率下,脉冲压缩质量与输入功率之间的关系.通过优化高阶色散补偿以及采用

更效率的压缩系统,获得了重复频率为1 MHz、平均功率高达273 W的高质量飞秒脉冲,脉冲宽度为264 fs.这些结果为高功率、大能量超快光纤激光系统的性能优化提供了重要实验依据.

## 2 实验装置

CPA系统如图1所示,系统前端含有掺镱光纤振荡器、光纤预放大器、啁啾光纤光栅 (chirped fiber Bragg grating, CFBG)、脉冲选单器,其中CFBG具有调节色散的功能,可以将脉宽展宽至约1 ns,同时补偿系统的高阶色散.最终前端可以提供中心波长为1034 nm的1 ns脉冲输出,光谱宽度为9 nm,重复频率为1 MHz.改变前端泵浦的大小,输出的脉冲平均功率可以在1—30 W之间连续调节.主放大器为棒状光纤 (NKT aero-GAIN-ROD 3.1) 单通放大器,采用反向泵浦,泵浦光中心波长锁定为976 nm,最大功率为500 W.为了压缩放大后的脉冲,从而获得接近变换极限的超短脉冲,压缩器采用一对刻线密度为1740线/mm的衍射光栅 (Gitterwerk 1366\_33×38\_3\_X/1070\_131×30\_6.35\_N),单次衍射效率超过97%,压缩效率超过90%.压缩器具有较大的利特罗角和光栅对间距,需要高精度平移台与旋转台的配合才能保证压缩效率和光束质量.

增加主放大器的输入光功率可以提升放大效率,但脉冲在放大过程中也会积累更多的非线性相移,非线性相移的积累来自于光纤内的自相位调

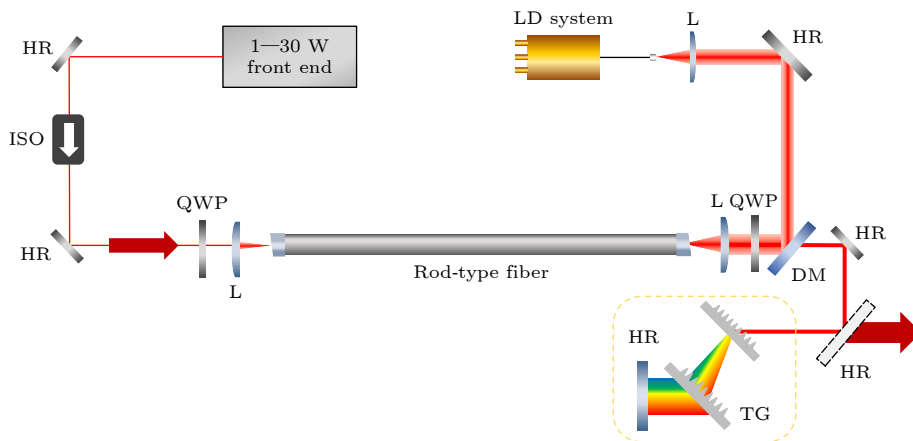


图1 基于棒状光纤的CPA系统示意图 (HR, 高反镜; ISO, 光隔离器; QWP, 1/4波片; L, 透镜; Rod-type fiber, 棒状光子晶体光纤; DM, 双色镜; LD system, 泵浦; TG, 透射光栅)

Fig. 1. Schematic setup of the CPA system using the rod-type fiber (HR, high-reflection mirror; ISO, isolator; QWP, quarter-wave plate; L, lens; Rod-type fiber, rod photonic crystal fiber; DM, dichroic mirror; LD system, pump; TG, transmission grating).

制,可以使用  $B$  积分来定量描述该过程,其定义为  $B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L n_2 I(z) dz$ , 其中  $I(z)$  为脉冲峰值强度随光纤长度  $L$  的变化,  $\lambda$  为激光中心波长,  $n_2$  为非线性折射率系数. 从公式可以看出,更强的入射脉冲会增大峰值光强,从而增大  $B$  积分即非线性相移的积累,过量的非线性相移则会导致脉冲压缩质量的恶化<sup>[15]</sup>. 在棒状光纤前后各放置一片 1/4 波片,将主放大器中的脉冲转换为圆偏振光,圆偏振脉冲的非线性折射系数是线偏振脉冲的 2/3,可以减少非线性相移的积累<sup>[16-18]</sup>. 本系统改变前端平均功率,测量不同功率下的输出功率及脉冲压缩结果,探究了输入功率对放大效率和压缩质量的影响.

### 3 实验结果及讨论

在不同前端功率情况下,主放大器的输出功率与泵浦功率之间的关系如图 2 所示. 图中黑色曲线展示了前端功率为 1 W 时在不同泵浦功率下的放大结果,输出功率随着泵浦功率的提升逐渐增加,但在泵浦功率大于 400 W 时,信号光功率增加变缓,出现增益饱和现象. 从图 2 也可明显看出,提高前端功率能够有效缓解增益饱和现象,放大效率随前端功率的增大而提高. 当泵浦为 429 W 时,考虑到耦合损耗以及泵浦泄漏,假设其中 85% 被增益光纤吸收,那么放大效率在 30 W 前端功率时高达 80%,而前端功率为 1 W 时放大效率仅有 50%. 当泵浦功率为 429 W,前端功率为 20 W 及 30 W 时分别获得了 305 W 和 323 W 的输出,且此时光斑质量良好,输出功率稳定,展示了高功率前端放大时的优点.

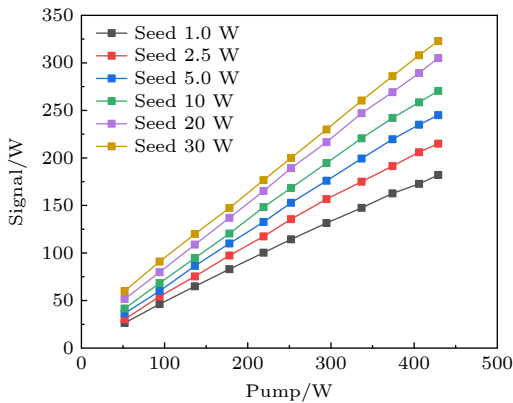


图 2 不同前端功率输出曲线

Fig. 2. Relationship between output power and pump power.

为了减少脉冲在放大过程中积累的非线性相移,本系统采用了圆偏振放大,棒状光纤中的圆偏振光经过第二块 1/4 波片转换为线偏振光后依然可以维持极高的偏振消光比,在前端功率为 1 W, 2.5 W, 5 W 时偏振消光比可维持在 23 dB,在前端功率为 10 W, 20 W, 30 W 时可维持在 21 dB. 图 3 展示了当前端功率为 20 W 时,不同输出功率下的偏振消光比,从图中可知在输出功率高达 305 W 时, S 偏振光功率高达 302 W, P 偏振光仅有 2.4 W, 偏振消光比达到 21 dB.

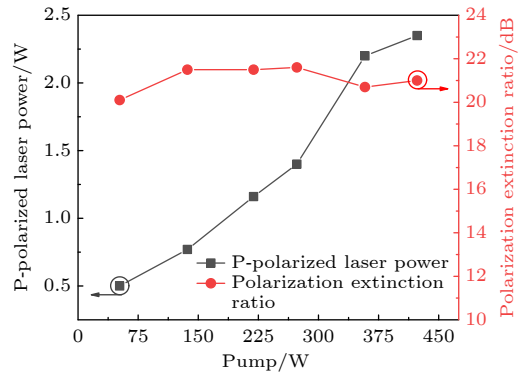


图 3 前端功率 20 W 时的 P 偏振光功率曲线和偏振消光比  
Fig. 3. P-polarized light power and polarization extinction ratio at 20 W front end power.

我们利用光栅对压缩放大后的脉冲,并测量了不同前端功率下压缩后的脉冲宽度.当前端功率在 1—30 W 之间改变时,压缩后脉宽都维持在 200—300 fs (双曲正割拟合,下文所有脉冲均为双曲正割拟合).在多级放大的光纤激光系统中,非线性相移积累主要来自最后一级主放大;前端功率的提升会导致主放大级积累的非线性相移增多,压缩质量下降.图 4 展示了不同前端功率下,主放大级输出达到 160 W 时的脉冲压缩结果.从图 4(a)—(c) 可以看出,在前端功率分别为 1 W, 2.5 W, 5 W 时,压缩后的脉冲基本无基底;图 4(d)—(f) 展示了当前端功率分别为 10 W, 20 W, 30 W 时,放大至 160 W 时的脉冲压缩结果,可以明显看出,随着非线性相移的增大,压缩后脉冲的基底逐渐增大.

泵浦功率进一步增至 429 W 时,不同前端功率对应的压缩后脉冲如图 5 所示,其中图 5(a)—(f) 分别对应前端功率为 1—30 W 时压缩脉冲的自相关曲线,图 5(f) 为泵浦功率 406 W 时的放大结果.脉冲的基底随着前端功率的提升而逐渐增大,在前端功率为 30 W 时出现了较大的次脉冲,脉冲质量严重退化.

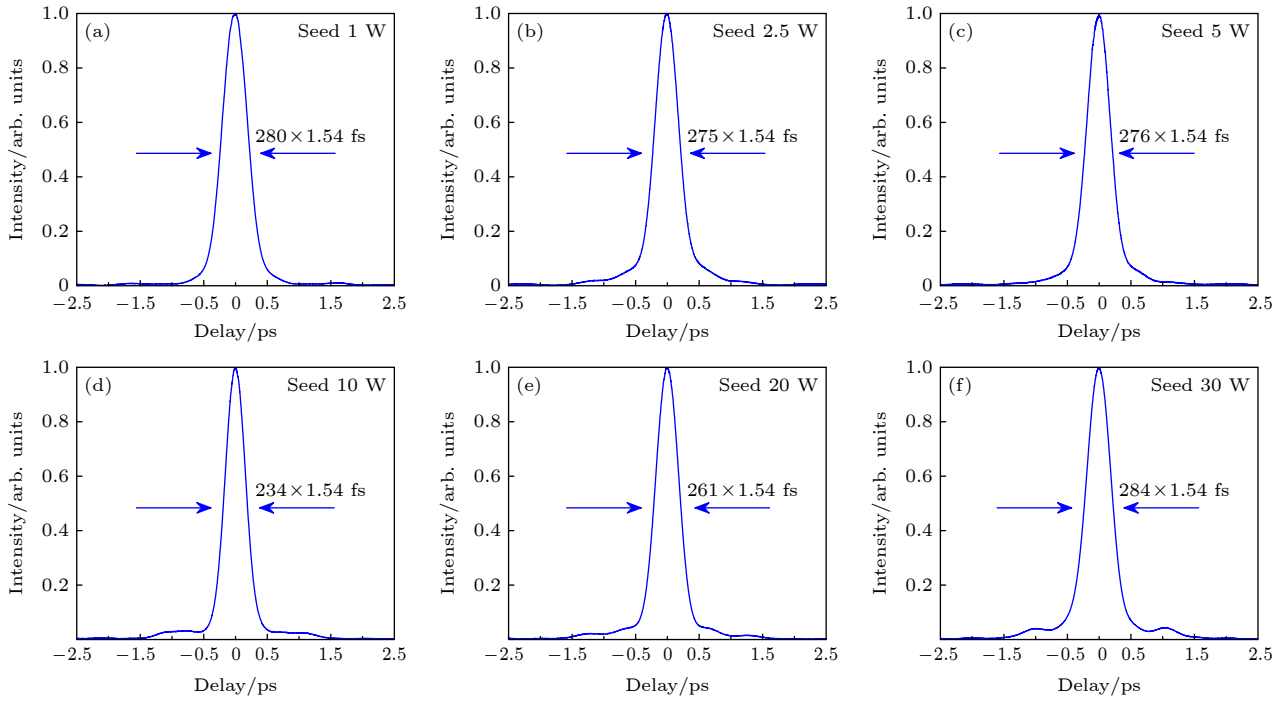


图 4 不同前端功率放大至 160 W 时脉冲压缩结果

Fig. 4. Pulse compression results at different front-end power amplifications up to 160 W.

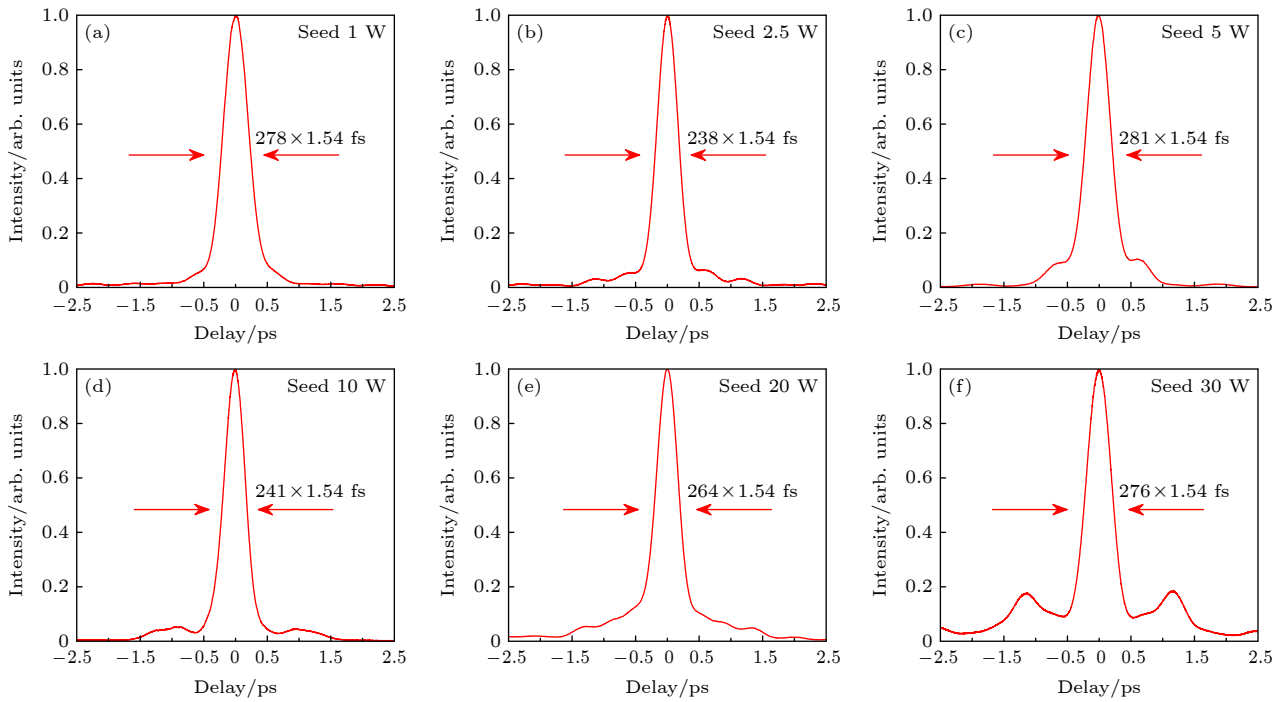


图 5 不同前端功率下脉冲压缩结果

Fig. 5. Pulse compression results under different frontend power.

当前端功率为 20 W 时, 可获得 305 W 的输出功率, 此时压缩效率为 90.4%, 压缩后的输出功率为 273 W. 我们测量了压缩后脉冲的光谱并计算了对应的变换极限脉冲的自相关曲线, 如图 6 所

示. 图中黑色虚线为变换极限脉冲的自相关曲线, 红色实线为实际测量的自相关曲线, 插图为压缩后光谱. 光谱的中心波长为 1035 nm, 半高宽为 7.2 nm, 对应的变换极限脉冲脉宽为 247 fs, 而脉冲实测脉

宽为 264 fs, 两者较为接近, 证明脉冲质量较高, 色散可调的 CFBG 充分发挥了作用. 但受限于非线性相位的积累, 脉冲基底依旧较为明显.

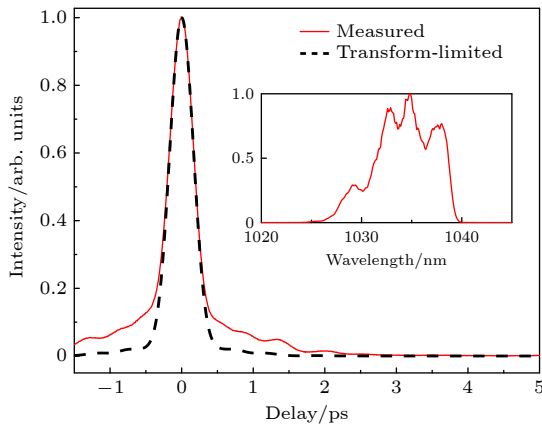


图 6 20 W 前端放大到 300 W 时光谱及对应变换极限脉冲, 插图光谱, 黑色虚线为变换极限脉冲自相关曲线, 红色实线为实测自相关轨迹  
Fig. 6. 20 W front end amplification to 300 W spectrum and transform limit pulse, illustration (spectrum), measured autocorrelation (red) and transform-limited autocorrelation (black dashed) trace.

最后, 测量系统输出脉冲的形状和光束质量. 棒状光纤工作在准单模状态, 压缩前的脉冲近似为高斯光束, 直径约 3 mm. 图 7 展示了信号和输出功率分别为 20 W 和 200 W 时, 压缩后光束质量因子  $M^2$  的测量结果,  $M_x^2$  和  $M_y^2$  分别为 1.02 和 1.19. 图 7 内插图展示了压缩后的光斑, 由于光束在压缩器中不断爬低, 因此输出光在 Y 方向偏离高斯光斑. 进一步提升该 CPA 系统的输出功率, 光斑大小基本不变且光束质量因子  $M^2$  均小于 1.3.

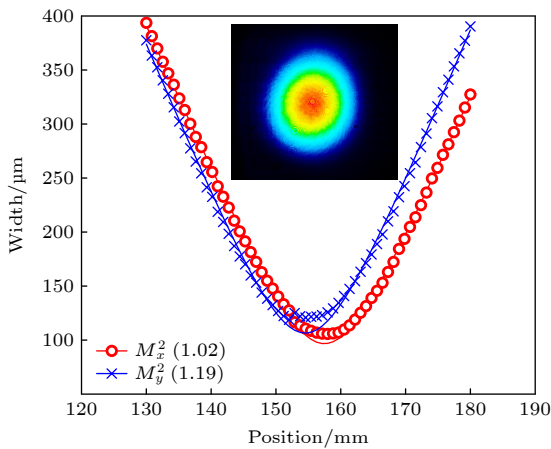


图 7  $M^2$  测量结果, 插图压缩后光斑  
Fig. 7. Beam quality factor ( $M^2$ ) of the compressed output beam, illustration (compressed beam).

## 4 结论

针对基于 NKT 最新款棒状光纤的 CPA 系统, 本文通过测量不同输入功率下的放大效率和脉冲压缩结果, 探究了棒状光纤的放大能力及非线性相位积累对压缩脉冲质量的影响. 实验结果表明, 增加输入功率可以大幅提升放大效率, 当输入功率在 20—30 W 之间时, 放大效率的提升接近饱和. 在 20 W 输入功率和 429 W 泵浦功率下, 放大后的脉冲功率达到 305 W, 且输出脉冲有着较高的偏振消光比 (21 dB); 压缩后获得了重复频率为 1 MHz、平均功率为 273 W、宽度为 264 fs 的高质量脉冲, 平均功率和峰值功率比 Pedersen 等<sup>[14]</sup>的结果约提升了一倍.

进一步提升光纤激光系统的参数需要将脉宽展至更宽<sup>[19]</sup>, 但大展宽量对应的大色散量对光栅对压缩系统提出了更大挑战, 无论是光栅的尺寸、空间距离都将随之增大. 近年来人们利用时间分脉冲合成提升光纤系统的能量, 采用空间相干合成提升光纤激光器的功率<sup>[20]</sup>, 使用多通腔等压缩技术来缩短光纤激光器的脉冲宽度<sup>[21]</sup>, 使得超快光纤激光技术不断发展. 我们相信利用该款棒状光纤, 通过合适的参数选取, 结合分脉冲、相干合成、非线性压缩等技术能够进一步优化当前超快光纤激光系统, 为超快激光加工、阿秒脉冲驱动等提供稳定可靠的优质光源.

## 参考文献

- [1] Jackson S D 2012 *Nat. Photonics* **6** 423
- [2] Chang G, Wei Z 2020 *iScience* **23** 101101
- [3] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **55** 447
- [4] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *JOSA B* **27** B63
- [5] Zervas M N 2014 *Int. J. Mod. Phys. B* **28** 1442009
- [6] Limpert J, Stutzki F, Jansen F, Otto H J, Eidam T, Jauregui C, Tünnemann A 2012 *Light: Sci. Appl.* **1** e8
- [7] Stutzki F, Jansen F, Otto H J, Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2014 *Optica* **1** 233
- [8] Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, Jansen F, Hädrich S, Carstens H, Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2011 *Opt. Express* **19** 255
- [9] Stutzki F, Jansen F, Liem A, Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2012 *Opt. Lett.* **37** 1073
- [10] Shi Z, Wang J S, Zhang Y, Wang J L, Wei Z Y, Chang G Q 2023 *JOSA B* **40** 2429
- [11] Stark H, Benner M, Buldt J, Klenke A, Limpert J 2023 *Opt. Lett.* **48** 3007
- [12] Müller M, Kienel M, Klenke A, Gottschall T, Shestaev E, Plötner M, Limpert J, Tünnemann A 2016 *Opt. Lett.* **41** 3439

- [13] Stark H, Buldt J, Müller M, Klenke A, Limpert J 2021 *Opt. Lett.* **46** 969
- [14] Pedersen M E, Johansen M M, Olesen A S, Michieletto M, Gaponenko M, Maack M D 2022 *Opt. Lett.* **47** 5172
- [15] Limpert J, Roser F, Schimpf D N, Seise E, Eidam T, Hädrich S, Rothhardt J, Misas C J, Tünnermann A 2009 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **15** 159
- [16] Schimpf D N, Eidam T, Seise E, Hädrich S, Limpert J, Tünnermann A 2009 *Opt. Express* **17** 18774
- [17] Zhang Y, Chen R Z, Huang H D, Liu Y Z, Teng H, Fang S B, Liu W, Kaertner F, Wang J L, Chang G Q, Wei Z Y 2020 *OSA Continuum* **3** 1988
- [18] Zhang Y, Wang J S, Teng H, Fang S B, Wang J L, Chang G Q, Wei Z Y 2021 *Opt. Lett.* **46** 3115
- [19] Wang T, Li C, Ren B, Guo K, Wu J, Leng J, Zhou P 2023 *High Power Laser Sci. Eng.* **11** e25
- [20] Müller M, Aleshire C, Klenke A, Haddad E, Légaré F, Tünnermann A, Limpert J 2020 *Opt. Lett.* **45** 3083
- [21] Müller M, Buldt J, Stark H, Grebing C, Limpert J 2021 *Opt. Lett.* **46** 2678

# 1 MHz, 273 W average power Ytterbium-doped rod-type fiber chirped pulse amplification system\*

Wang Dong-Liang<sup>1)2)</sup> Shi Zhuo<sup>1)2)</sup> Wang Jing-Shang<sup>1)2)</sup> Wu Hong-Yue<sup>3)</sup>

Zhang Xiao-Hui<sup>4)5)†</sup> Chang Guo-Qing<sup>1)2)6)‡</sup>

1) (Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

4) (School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510275, China)

5) (Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

6) (Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China)

( Received 28 February 2024; revised manuscript received 20 May 2024 )

## Abstract

Ytterbium-doped ultrafast fiber lasers are widely used in scientific research, industrial processing, medical diagnosis, and other fields due to their excellent beam quality and high power output. The larger mode area allows the fiber to transmit higher peak-pulse power. The commercial rod-type Ytterbium-doped fiber with a core diameter of 85  $\mu\text{m}$ , produced by NKT in Denmark, can produce ultra-short pulses on the order of 100 watts and 100 microjoules. Based on this rod-type fiber, we construct a chirped-pulse amplification (CPA) system in which the high-efficiency transmission gratings and temperature-tunable chirped fiber Bragg grating (CFBG) are used to compensate for dispersion. We investigate the effect of power input on the amplified power and pulse compression quality, and find that higher power input slows down the gain saturation and improves amplification efficiency. At power inputs of 20 W and 30 W, we obtain power outputs of 305 W and 323 W respectively, with an amplification efficiency of about 80%. To reduce the accumulation of nonlinear phase shift, we use circular polarization amplification. At low power outputs (less than 160 W), the effect of nonlinear phase accumulation on the compressed pulse is negligible, and the increase in power input increases the amplification efficiency. When the power output exceeds 200 W, the cumulative increase of nonlinear phase shift reduces the pulse compression quality, which implies that the input power is appropriately reduced to the power range between 5 W and 20 W. With a power input of 20 W and pump power of 429 W, the power output can reach 305 W. After pulse is compressed by using a diffraction-grating pair, this rod-type fiber CPA system can deliver 1 MHz, 264 fs pulses with 273 W in average power. These results provide an important experimental basis for optimizing the performance of high-power and high-energy ultrafast fiber lasers.

**Keywords:** ultrafast fiber laser, high average power, pulse amplification

**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.-i

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240300

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFB3602602) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62175255, 62227822).

† Corresponding author. E-mail: 202011004153@mail.scut.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: guoqing.chang@iphy.ac.cn



1 MHz, 273 W 掺镱棒状光纤啾啾脉冲放大系统

王栋梁 史卓 王井上 吴洪悦 张晓辉 常国庆

1 MHz, 273 W average power Ytterbium-doped rod-type fiber chirped pulse amplification system

Wang Dong-Liang Shi Zhuo Wang Jing-Shang Wu Hong-Yue Zhang Xiao-Hui Chang Guo-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 134204 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240300

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240300>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

飞秒光纤激光相干合成技术最新进展

Recent progress of coherent combining technology in femtosecond fiber lasers

物理学报. 2021, 70(3): 034206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201683>

基于色散管理的自相位调制光谱展宽滤波技术

Dispersion management dual-pass self-phase modulation-enabled spectral selection

物理学报. 2023, 72(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230088>

高损伤阈值可饱和吸收体锁模脉冲光纤激光器的研究进展

Research progress of mode-locked pulsed fiber lasers with high damage threshold saturable absorber

物理学报. 2022, 71(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212442>

基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

高功率全光纤1.6微米类噪声方形脉冲激光器

High-power 1.6  $\mu\text{m}$  noise-like square pulse generation in an all-fiber mode-locked laser

物理学报. 2020, 69(16): 164202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200245>

基于M型掺镱光纤的近单模2 kW光纤放大器

Near-single-mode 2-kW fiber amplifier based on M-type ytterbium-doped fiber

物理学报. 2022, 71(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211751>