

# 激光清洗用高功率纳秒脉冲掺镱光纤激光器

李磐<sup>\*\*</sup>, 师红星, 符聪, 薛亚飞, 邹岩, 郑也, 刘小溪, 王军龙<sup>\*</sup>, 王学锋<sup>\*\*\*</sup>

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

**摘要** 研制了激光清洗用高能量纳秒脉冲掺镱光纤激光器, 该激光器采用主动调 Q 技术产生纳秒脉冲, 脉冲经两级主振荡功率放大器(MOPA)后可以获得高的能量和平均功率。在重复频率为 100 kHz 时, 激光器输出的平均功率最高可达 302 W, 脉冲宽度为 203 ns, 单脉冲能量为 3 mJ, 光光转换效率为 84%。利用该激光器进行了激光除锈实验, 实验结果证明该激光器稳定可靠, 可满足激光除锈、激光除漆等多种应用的需求。

**关键词** 激光器; 掺镱光纤激光器; 纳秒脉冲; 激光清洗

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121406

## High Power Nanosecond Pulsed Ytterbium-Doped Fiber Laser for Laser Cleaning

Li Pan<sup>\*\*</sup>, Shi Hongxing, Fu Cong, Xue Yafei, Zou Yan, Zheng Ye,  
Liu Xiaoxi, Wang Junlong<sup>\*</sup>, Wang Xuefeng<sup>\*\*\*</sup>

Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China

**Abstract** High energy nanosecond pulsed ytterbium-doped fiber laser is developed. The laser utilizes active Q-switching technology to generate nanosecond pulses, and the pulses can obtain high energy and average power after it passes through two-stage master oscillator power amplifier (MOPA) system. When the pulse repetition frequency is 100 kHz, the maximum average power of laser pulses is 302 W, pulse duration is 203 ns, single pulse energy is 3 mJ and the optical-to-optical conversion efficiency is 84%. Laser rust removal experiment is carried out using the laser, the experimental results show that the laser is stability, and the laser can meet the laser rust removal, laser paint removal and many other applications.

**Key words** lasers; ytterbium-doped fiber laser; nanosecond pulse; laser cleaning

**OCIS codes** 140.3510; 140.2020; 060.2420

## 1 引言

激光清洗是利用纳秒脉冲激光与材料的相互作用来对材料表面进行剥离和去除的一种清洗技术。激光清洗可实现高效、绿色、智能清洗, 具有广阔的应用前景, 引起了研究人员的广泛关注<sup>[1-6]</sup>。激光清洗技术的核心部件是具有大脉冲能量、高平均功率、高峰值功率的脉冲激光器。与固体激光器相比, 光纤激光器具有高光束质量、高转换效率、良好的散热性能等优点, 已成为激光清洗和激光剥离的首选光源之一<sup>[7]</sup>。

高功率脉冲光纤激光器通常采用种子源加多级

主振荡功率放大器(MOPA)的方式实现, 但受制于光纤中的非线性效应<sup>[8-9]</sup>、热和放大自发辐射(ASE)积累等因素, 难以获得大脉冲能量和高平均功率。为提升脉冲光纤激光器的性能, 国内外科研人员进行了大量研究。目前, 脉冲光纤激光器的平均输出功率已达到几百 W 量级, 单脉冲能量已提升至数十 mJ 量级, 峰值功率达到亚 MW 量级。2006 年, Maryashin 等<sup>[10]</sup>使用声光调制器得到了 300 ns 的激光脉冲, 经过 MOPA 结构后, 得到了平均功率为 200 W、脉冲重复频率为 1~50 kHz、脉冲能量达到 10 mJ 的高能量脉冲输出。2009 年, Li 等<sup>[11]</sup>通过非线性偏振旋转被动锁模方式获得了 1~15 ns 的可

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-06-11; 录用日期: 2018-06-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405100)

\* E-mail: wjl\_casc@126.com; \*\* E-mail: lipan\_clark@126.com; \*\*\* E-mail: xuefeng\_wang@sina.cn

调谐脉冲,通过三级 MOPA 结构对脉冲进行放大,最终在纤芯/包层直径为  $41\ \mu\text{m}/170\ \mu\text{m}$  的大模场面积掺镱光纤中获得了平均功率为  $280\ \text{W}$ ,重复频率为  $1.9\ \text{MHz}$  的激光脉冲输出。2012 年,粟荣涛等<sup>[12]</sup>使用电光调制器调制半导体激光器获得了重复频率为  $10\ \text{MHz}$ 、脉冲宽度为  $8\ \text{ns}$  的激光脉冲,经过 MOPA 结构后,脉冲平均功率被提升至  $300\ \text{W}$ 。2015 年,Huang 等<sup>[13]</sup>将半导体调制源作为 MOPA 放大器的种子源,在纤芯/包层直径为  $35\ \mu\text{m}/420\ \mu\text{m}$  的大模场面积掺镱光纤中获得了平均功率为  $736\ \text{W}$ 、重复频率为  $1.9\ \text{MHz}$ 、脉冲宽度为  $6\ \text{ns}$  的激光脉冲。

目前,脉冲掺镱光纤激光器已实现了高能量、高峰值功率、高平均功率的输出,但上述报道的结果仅局限于实验阶段,目前商业上的高能量( $>300\ \text{W}$ )脉冲掺镱光纤激光器被 IPG 公司垄断,国内尚未研制出稳定工作的商用纳秒脉冲掺镱光纤激光器。激光清洗等激光应用技术迫切需要研制性能稳定可靠、平均功率在百 W 量级的纳秒脉冲掺镱光纤激光器。基于此目的,本课题组通过对主功率放大器采用双向抽运的方法有效缓解单向抽运 ASE 积累和热量集中的问题,研制了平均脉冲宽度为  $200\ \text{ns}$ 、重复频率为  $100\ \text{kHz}$ 、平均功率为  $302\ \text{W}$  的高能量纳秒脉冲掺镱光纤激光器,其光光转换效率可达  $84\%$ 。该激光器性能稳定可靠,可以满足激光清洗等多种激光应用技术的需求。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,该光纤激光器由振荡器和两级光纤放大器组成。振荡器采用一对光纤光栅作为振荡腔的反射镜,高反宽带光纤光栅(HR-FBG)的反射率为  $99.5\%$ ,低反光纤光栅(PH-FBG)的反射率为  $10\%$ ,中心波长为  $1063.6\ \text{nm}$ ,振荡器的

增益光纤(Yb-fiber)采用  $10\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$  掺镱光纤。振荡腔采用主动调 Q 方式获得纳秒脉冲,调 Q 器件为声光晶体开关(AOM),实验中采用  $200\ \text{ns}$ 、 $100\ \text{kHz}$  的电脉冲驱动声光晶体以实现主动调 Q 产生光脉冲。振荡腔的抽运源采用  $976\ \text{nm}$  多模半导体激光器,其抽运功率为  $7\ \text{W}$  时,振荡器输出功率为  $1.6\ \text{W}$ ,输出激光脉冲的脉冲宽度为  $130\ \text{ns}$ ,脉冲重复频率为  $100\ \text{kHz}$ 。脉冲经过振荡器输出后,再通过自制包层光剥离器(CPS1)滤除包层中残余的抽运光,以防止抽运光损坏隔离器等器件。

为了进一步提升脉冲的能量,为主功率放大器提供足够的脉冲能量,实验中采用一级包层预放大器对脉冲进行放大,预放大器的增益光纤为  $10\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$  的掺镱光纤,该光纤在  $976\ \text{nm}$  的吸收为  $4\ \text{dB/m}$ ,增益光纤的长度为  $4\ \text{m}$ 。预放大器的抽运采用平均功率为  $27\ \text{W}$  的  $976\ \text{nm}$  多模半导体激光器,在最大抽运功率时,预放大器输出的功率可达到  $16\ \text{W}$ 。

经预放大后的激光脉冲经过自制包层剥离器(CPS2)和隔离器后进入主功率放大器,主功率放大器采用双向抽运结构,其增益光纤为  $30\ \mu\text{m}/250\ \mu\text{m}$  大模场掺镱光纤,纤芯/包层的数值孔径为  $0.06/0.46$ ,增益光纤对  $976\ \text{nm}$  抽运光的吸收为  $5.1\ \text{dB/m}$ 。为防止主功率放大器反向抽运光对前级隔离器的影响,在二级放大输出隔离器后增加自制包层剥离器(CPS3)。主功率放大器的前向抽运采用 3 个  $70\ \text{W}$  的  $976\ \text{nm}$  半导体激光器,使用合束器进行合束后的总抽运功率为  $210\ \text{W}$ 。后向抽运采用 2 个  $70\ \text{W}$  的  $976\ \text{nm}$  半导体激光器,使用合束器进行合束后的总抽运功率为  $140\ \text{W}$ 。主功率放大器的输出端为带有隔离功能的准直器,在主功率放大器和输出准直器之间制作高功率光剥离器,防止抽运光损坏输出准直器,同时也能防止使用该激光器加工时,零件反射光对放大器的影响,确保激光器稳定运行。

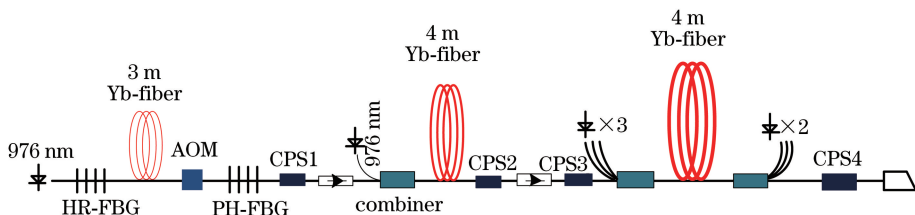


图 1 高功率纳秒脉冲掺镱光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic of high power nanosecond pulsed ytterbium-doped fiber laser

## 3 实验结果与数据分析

在实验中,振荡器采用主动调 Q 的方式获得纳

秒脉冲,声光晶体由幅值为  $24\ \text{V}$ 、重复频率为  $100\ \text{kHz}$ 、脉冲宽度为  $200\ \text{ns}$  的电脉冲驱动。当  $976\ \text{nm}$  的抽运功率达到  $2\ \text{W}$  时,可以得到稳定的

调 Q 脉冲序列, 脉冲宽度为 570 ns。随着抽运功率增加, 脉冲宽度逐渐降低, 在最大抽运功率为 7 W 时, 脉冲宽度压缩为 130 ns, 脉冲宽度随抽运功率变化的曲线如图 2 所示。

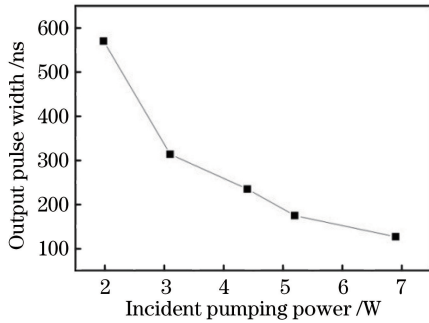


图 2 输出脉冲宽度随抽运功率的变化  
Fig. 2 Variation of output pulse width with the pumping power

当振荡腔抽运功率为 7 W 时, 输出的脉冲波形如图 3 所示: 脉冲宽度为 130 ns, 输出脉冲平均功率为 1.4 W, 脉冲重复频率为 100 kHz, 对应的单脉冲能量为 14  $\mu$ J。图 4 为脉冲序列图, 从图中可以看出脉冲具有良好的稳定性, 可作为 MOPA 的种子脉冲进行放大。

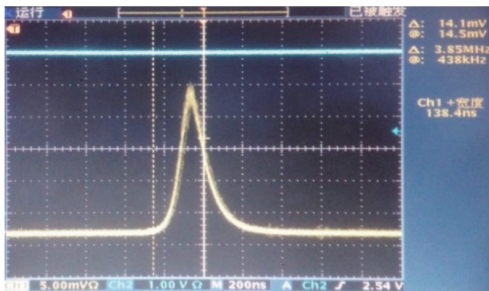


图 3 主动调 Q 振荡器输出的脉冲波形图  
Fig. 3 Output pulse waveform of the active Q-switching oscillator

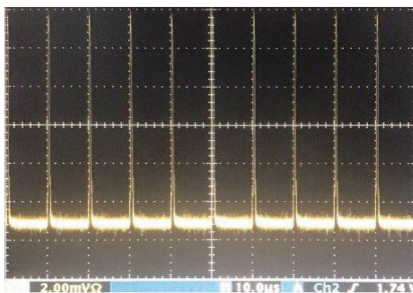


图 4 主动调 Q 振荡器输出的脉冲序列  
Fig. 4 Output pulse sequence of active Q-switched oscillator

脉冲在较低能量下进行主功率放大时, 由于增益过大, 会导致主功率放大器未被消耗掉的上能级

粒子数转化成 ASE, 从而降低光转换效率。为使主功率放大器获得足够的种子光输入能量, 脉冲从振荡器输出后, 经过一级光纤预放大器对脉冲能量进行提升, 光纤预放大器的最大抽运功率为 27 W, 脉冲经过预放大器后的功率提升至 16 W, 对应的脉冲单脉冲能量提升至 160  $\mu$ J, 脉冲的峰值功率为 1.3 kW。

脉冲经过预放大器后进入主功率放大器, 主功率放大器采用纤芯/包层直径为 30  $\mu$ m / 250  $\mu$ m 的大模场面积掺镱光纤作为增益光纤, 通过多次实验, 将增益光纤的长度优化为 4 m。主功率放大器采用双向抽运结构, 使增益光纤的热负载均匀地分配到整段光纤上, 以降低光纤因局部受热而导致增益光纤烧毁的概率。在放大过程中, 首先加载前向 3 个抽运源, 然后加载后向 2 个抽运源, 输出功率随抽运功率的增长曲线如图 5 所示: 随着抽运功率增加, 主功率放大器的输出功率线性增大, 在最高抽运功率为 350 W 时, 放大器的输出功率为 302 W, 主功率放大器的斜效率为 84%。图 6 为主功率放大器在最高输出功率时的脉冲波形图, 可见, 此时输出的脉冲宽度为 203 ns。

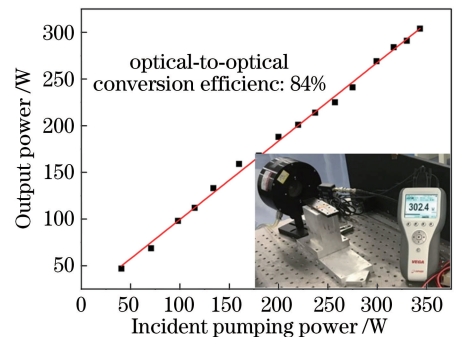


图 5 主功率放大器输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 5 Variation of output power of main power amplifier with the increase of incident pumping power

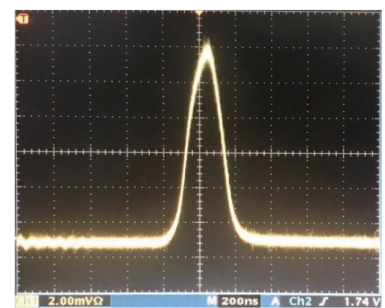


图 6 主功率放大器在最大输出功率时的脉冲波形图  
Fig. 6 Output pulse waveform of the main power amplifier at the maximum output power

主功率放大器在最大输出功率时的光谱如图 7 所示:光谱的中心波长为 1063.6 nm,光谱 3 dB 宽度为 2.4 nm;在光谱中没有观察到受激拉曼散射 (SRS) 现象,最大输出功率时的光学信噪比为 30 dB。实验中采用的增益光纤的纤芯/包层直径为 30  $\mu\text{m}$  / 250  $\mu\text{m}$ ,大模场面积增益光纤的使用提高了实验中的非线性阈值,在今后的实验中,可通过增加抽运源功率进一步提升脉冲的峰值功率。

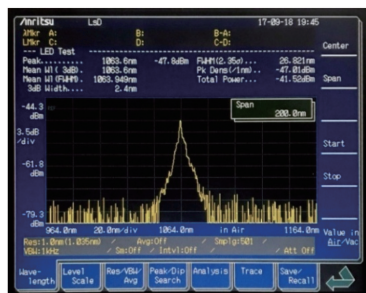


图 7 主功率放大器在最大输出功率时的光谱图

Fig. 7 Spectrum of the main power amplifier at the maximum output power

光纤中受激拉曼散射的阈值为

$$P_0^{\text{CR}} = \frac{16A_{\text{eff}}}{g_{\text{R}}L_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中: $A_{\text{eff}}$ 为有效模场面积; $g_{\text{R}}$ 为非线性系数; $L_{\text{eff}}$ 为有效光纤长度,这里等效为增益光纤长度和反向合束器尾纤长度之和,约为 6 m。经计算可知拉曼阈值功率约为 18 kW,高于实验中的脉冲峰值功率 15 kW,因此没有 SRS 现象出现,理论与实验结果相吻合。

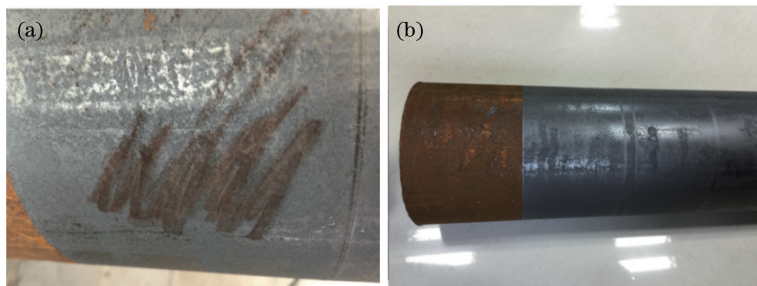


图 9 不同脉冲功率下的激光除锈实验效果图。(a) 100 W;(b) 300 W

Fig. 9 Laser rust removal results at different pulse powers. (a) 100 W; (b) 300 W

## 4 结 论

本课题组设计了高能量纳秒脉冲掺镱光纤激光器。该激光器采用主动调 Q 技术产生纳秒脉冲,经过两级主振荡功率放大器后,脉冲能量得以放大,得到了平均功率为 300 W 的高能量激光脉冲输出。高能量激光脉冲宽度为 200 ns,重复频率为 100 kHz,在

在完成上述高功率脉冲激光器研制的基础上进行激光除锈实验,实验装置如图 8 所示。在实验中,焦距为 220 mm,光斑在焦点 $\pm 10$  mm 处,光斑直径约为 120~150  $\mu\text{m}$ ,振镜扫描的速率为 8000 mm/s,脉冲激光器的重复频率固定为 100 kHz,通过调节平均功率来调节输出激光的单脉冲能量。实验结果如图 9 所示。

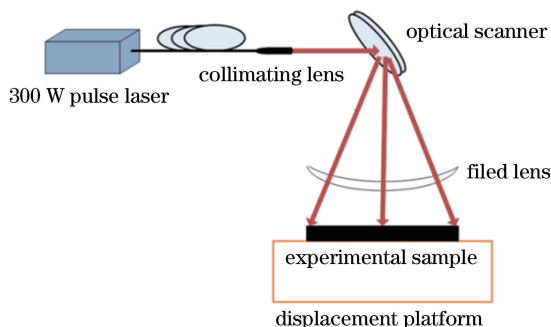


图 8 激光剥离除锈实验装置图

Fig. 8 Experimental device for laser rust removal

图 9(a)、(b)分别为在其他参量不变的情况下,脉冲平均功率分别为 100 W 和 300 W 时,激光清除样品上铁锈的效果图。当脉冲激光的平均功率较小时,虽然激光表面的浮锈已被清洗干净,但通过刮擦已清洗的样品仍可以看到残留的底层锈蚀;保持其他参数不变,当功率增加至 300 W 时,刮擦已清洗样品后可以看出表面铁锈和底层锈蚀均已完全清除。可见,选择较高的脉冲平均功率和较大的脉冲能量有助于底层浮锈的去除。

最高平均功率输出时,单脉冲能量为 3 mJ。在最大输出功率时,光谱的中心波长为 1063.6 nm,光谱 3 dB 宽度为 2.4 nm,在光谱中没有看到 SRS 等非线性现象。在今后的实验中,可通过增加抽运源功率使单脉冲能量得到进一步提升。激光除锈实验表明该激光器稳定可靠,可以满足激光除漆、激光除锈等多种应用的需求。

## 参 考 文 献

- [1] Shi S D, Du P, Li W, *et al.* Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0903001.  
施曙东, 杜鹏, 李伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903001.
- [2] Zhang H, Liu W W, Dong Y Z, *et al.* Experimental and mechanism research on paint removal with low frequency YAG pulsed laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 121401.  
章恒, 刘伟巍, 董亚洲, 等. 低频 YAG 脉冲激光除漆机理和实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121401.
- [3] Wang D L, Feng G Y, Deng G L, *et al.* Study of mechanism on laser paint removal based on the morphology and element composition of ejected particle [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003007.  
王德良, 冯国英, 邓国亮, 等. 基于颗粒形貌及成分分析的激光除漆去除机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003007.
- [4] Oujja M, Sanz M, Rebolgar E, *et al.* Wavelength and pulse duration effects on laser induced changes on raw pigments used in paintings [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2013, 102: 7-14.
- [5] Villarreal-Villela A E, Cabrera L P. Monitoring the laser ablation process of paint layers by PILA technique [J]. Open Journal of Applied Sciences, 2016, 6(9): 626-635.
- [6] Pouli P, Oujja M, Castillejo M. Practical issues in laser cleaning of stone and painted artefacts: optimisation procedures and side effects [J]. Applied Physics A, 2012, 106(2): 447-464.
- [7] Madhukar Y K, Mullick S, Shukla D K, *et al.* Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser [J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 892-901.
- [8] Yin Z, Yan F P, Liu S, *et al.* Research of stimulated Brillouin scattering effect in 2  $\mu\text{m}$  band single-frequency Raman fiber amplifier [J]. Navigation and Control, 2015, 14(1): 100-105.  
尹智, 延凤平, 刘硕, 等. 2  $\mu\text{m}$  波段单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射研究[J]. 导航与控制, 2015, 14(1): 100-105.
- [9] Zhao D, Yan F P, Liu S, *et al.* Analysis of the characteristics of the thulium doped fiber amplifier for dual-single-frequency amplification [J]. Navigation and Control, 2017, 16(1): 57-63.  
赵丹, 延凤平, 刘硕, 等. 掺铥光纤放大器对双单频激光放大的特性分析[J]. 导航与控制, 2017, 16(1): 57-63.
- [10] Maryashin S, Unt A, Gapontsev V P. 10-mJ pulse energy and 200 W average power Yb-doped fiber laser [C]. Proceedings of SPIE, 2006, 6102: 61020O.
- [11] Li W X, Hao Q, Yan M, *et al.* Tunable flat-top nanosecond fiber laser oscillator and 280 W average power nanosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. Optics Express, 2009, 17(12): 10113-10118.
- [12] Su R T, Zhou P, Wang X L, *et al.* Single-frequency nanosecond pulsed laser with output power of 300 W in all-fiber format [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1009-1010.  
粟荣涛, 周朴, 王小林, 等. 单频纳秒脉冲全光纤激光器实现 300 W 平均功率输出 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1009-1010.
- [13] Huang L J, Sun H Y, Leng J Y, *et al.* 736 W average power all-fiber nanosecond MOPA based on ultra-low NA Ytterbium doped fiber [C]. Advanced Solid State Lasers, 2015: AM5A.50.