

# 20 W 全光纤 500 ps 主振荡功率放大激光器及其应用

荆利青 张孟雄 陈子聪 E.Luk\* A.Piper

深圳激扬光电有限公司, 广东 深圳 518000

**摘要** 利用中心波长为 1060 nm 的输出波形可调的皮秒脉冲激光器作为种子源, 采用掺镱(Yb)光纤放大器将该信号放大, 最终得到输出脉宽范围为 0.5~10 ns, 平均功率为 18~21 W, 峰值功率为 11~30 kW, 单脉冲能量为 0.02~0.13 mJ 的近似单模的 500 ps 脉宽可调主振荡功率放大(MOPA)光纤激光器( $M^2=1.5$ )。该高功率、高单脉冲能量及高平均功率的光纤激光器满足激光加工、材料处理和非线性转换等领域的需要, 尤其对于激光加工热影响敏感的材料是一种重要的光源。

**关键词** 光纤激光器; 皮秒; 脉冲放大器; 高功率; 主振荡功率放大; 激光加工

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.061402

## A 20 W All Fiber 500 ps Master Oscillator Power Amplifier Fiber Laser and Applications

Jing Liqing Zhang Mengxiong Chen Zicong E.Luk A.Piper

Shenzhen iLuma Photonics Company, Shenzhen, Guangdong 518000, China

**Abstract** A picosecond pulse laser with central wavelength of 1060 nm and adjustable output waveform is used as the seed source. This seed source is amplified by an Yb-doped double cladding fiber amplifier, and the output pulse width can be adjusted between 0.5~10 ns. In each waveform of the master oscillator power amplifier (MOPA) fiber laser, the highest average power is in the range of 18~21 W, peak power is in the range of 11~13 kW, and single pulse energy is in the range of 0.02~0.13 mJ with a near single-mode beam ( $M^2=1.5$ ). This high peak power, high single pulse energy and high average power fiber laser can meet the requirements of the area of the laser machining, material processing and the nonlinear transfer, and is a significant light source for some material which is sensitive to the heat when processed by lasers.

**Key words** fiber lasers; picoseconds; pulse amplifier; high peak power; master oscillator power amplifier; laser processing

**OCIS codes** 140.3510; 140.3280; 140.3390

## 1 引言

随着科学技术的发展, 激光加工、材料处理和非线性转换等领域对高功率脉冲光纤激光器的需求逐年增加<sup>[1]</sup>。按照单脉冲持续时间来说, 脉冲光纤激光器分为微秒, 纳秒, 皮秒及飞秒光纤激光器。但随着加工精度及加工工艺要求地不断提高, 微秒和纳秒脉冲光纤激光器由于单脉冲持续时间太长, 不能用于对激光加工热敏感材料的加工<sup>[2-3]</sup>。飞秒光纤激光器由于其单脉冲能量低, 在工业上的应用具有局限性。因此, 目前皮秒激光器是微加工行业比较理想的脉冲激光光源。皮秒脉冲光纤激光器兼顾较高峰值功率, 相对较高的单脉冲能量, 窄脉宽, 高平均功率的特点, 得到越来越多的关注和应用开发。基于固体激光技术的 10~100 ps 脉冲范围的激光器在材料冷加工(Cold Ablation)等方面得到了广泛的应用, 但由于 10~100 ps 激光器成本较高, 体积较大等诸多因素影响了该种激光器的应用范围。在此背景下, 工业界需要一款价格适中, 性能介于 10~100 ps 激光器之间的一种新型光源。

收稿日期: 2013-12-25; 收到修改稿日期: 2014-01-18; 网络出版日期: 2014-04-29

作者简介: 荆利青(1986—), 女, 硕士, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: lq.jing@ilumaphotonics.cn

\*通信联系人。E-mail: eric.luk@ilumaphotonics.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

本文采用主控振荡功率放大(MOPA)技术<sup>[4]</sup>,选用自主研发的最大可输出功率为600 mW的皮秒脉冲激光器作为种子源,通过光纤放大器放大后可以得到脉冲宽度范围为0.5~10 ns,最高重复频率为1 MHz的短脉冲光纤激光器。MOPA脉冲激光器采用低功率高质量光束质量的激光器作为种子光源,利用双包层掺杂光纤作为放大器,可获得高质量光束、较高脉冲能量及高平均功率的激光输出。不仅如此,它还具有可方便改变激光频率、脉宽以及转换效率高的优点,现在逐渐受到广泛关注。

## 2 500 ps 脉冲光纤激光器

本实验采用公司自主研发的中心波长为1060 nm的皮秒脉冲单模激光器作为信号源。该皮秒脉冲激光器可以通过调节输入信号的频率及脉宽等实现在一定范围内任意波形的单模输出。其输出皮秒激光脉冲的最大平均功率为600 mW,光谱宽度为2.4 nm,最高重复频率为1 MHz。图1为该皮秒脉冲激光器在放大之前输出的脉宽为500 ps及10 ns的脉冲波形图。采用MOPA技术,利用自主研发的掺镱光纤放大器对该皮秒脉冲信号源进行放大(图2),放大后的输出波形及光谱与入射的脉冲信号几乎相同。所以可以通过调节皮秒脉冲激光信号源的输出信号方便地改变该高功率的信号输出,实现多种波形的任意输出。该放大器是由中心波长为915 nm、最大输出功率为45 W的激光二极管抽运,通过耦合进入放大器中的掺镱双包层有源粗光纤中,使信号得到放大。信号源以及光放大器都经过特殊设计,使其输出合适的功率及光谱宽度,从而减小短脉冲在高功率时所产生的非线性效应,进一步保证了激光器的稳定性。利用功率计、光谱仪及示波器对该500 ps激光脉冲输出的功率、光谱及脉冲波形进行了相应的测试。通过测试,得到在重复频率为1 MHz、脉冲宽度为500 ps时,脉冲的最高峰值功率为34.5 kW;在重复频率为150 kHz、脉冲宽度为10 ns时,脉冲的最高单脉冲能量为0.13 mJ。

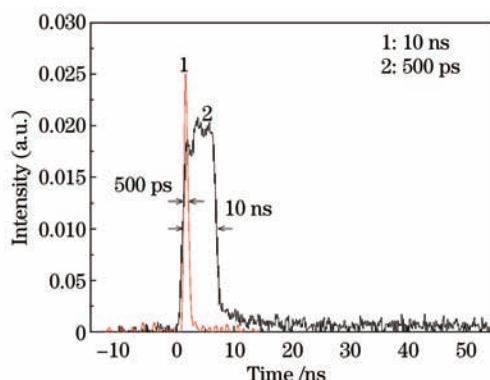


图1 单模皮秒激光器输出的脉宽分别为500 ps及10 ns的脉冲波形图

Fig.1 Pulse traces of a single mode picosecond laser with pulse width of 500 ps and 10 ns, respectively

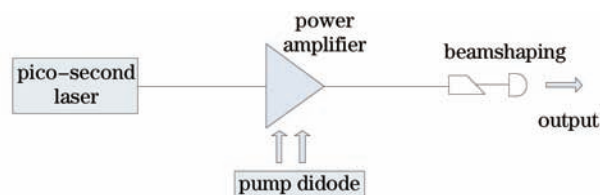


图2 20 W、500 ps脉冲光纤激光器结构示意图

Fig.2 Structure diagram of a 500 ps pulse fiber laser with 20 W

## 3 实验结论

在皮秒脉冲激光源开启的情况下,利用光纤放大器进行光放大。根据工业激光应用的需要,设计了脉宽范围为0.5~10 ns,中心波长为1060 nm,输出功率为20~21 W的高功率脉冲激光器( $M^2=1.5$ )。考虑到信号光在被放大时会产生严重的非线性效应<sup>[5]</sup>,通过选用合适的皮秒激光器信号及对放大器功率、有源光纤及耦合等进行特殊设计,有效地降低了信号在放大过程中的非线性效应。如图3所示,黑色曲线为脉冲宽度为0.505的皮秒脉冲激光源在输入放大之前的光谱宽度为2.4 nm的光谱图;红线、绿色、蓝色、紫色曲线分别表示该激光脉冲经过放大器后输出功率分别为4、10、15、18 W时的光谱曲线图。从图中可以看出,由于短脉冲光强的瞬时变化引起自相位调制(SPM)非线性效应,从而导致在输出功率升高时,光谱逐渐被展宽。当输出功率为18 W时,光谱被展宽至8.4 nm。同时在长波段(1110 nm)处出现一些受激拉曼散射(SRS),但是信号强度比中心波长1060 nm处低了约15 dB。这里认为该SRS与信号的差值可以继续优化,但是还未进行相应的实验。

图4为脉宽分别为10 ns和500 ps情况下,输出功率与输入抽运功率的关系图。分别选用由皮秒激光器输出的脉冲宽度为500 ps和10 ns的信号进行放大,均得到20 W的高功率激光输出。由图4可以看出,该激光器在其输出脉宽可调范围500 ps~10 ns内,最低的抽运效率为57%,而且输出功率随着抽运功率的上升而线性上升,说明只要抽运功率足够高,皮秒激光输出功率还可以上升。图5表示500 ps的激光脉冲在放大过程中其峰值功率、脉冲宽度的变化。短脉冲激光由于SPM以及群速度色散(GVD)等非线性效应的影响在传输过程中会被展宽,但从图中可以看出,在脉冲宽度为500 ps的情况下,输出激光脉冲宽度在放大的过程中没有被展宽,说明该激光器不存在由GVD导致脉冲宽度展宽的现象。

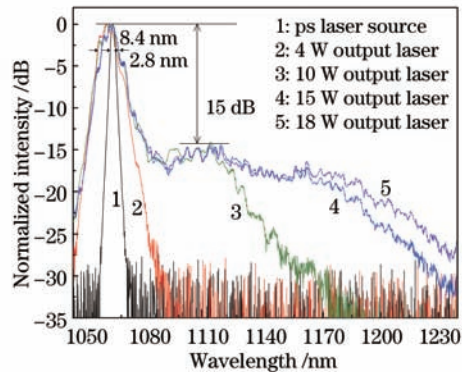


图3 500 ps激光脉冲在放大前后的光谱曲线对比图  
Fig.3 Spectrums of 500 ps laser pulse before and after amplification

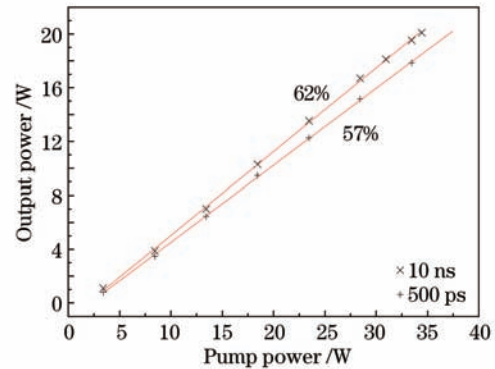


图4 脉宽分别为8 ns与500 ps的激光脉冲输出功率曲线  
Fig.4 Relational graph between the output power and the pump power of the laser with 8 ns and 500 ps, respectively

图6显示了脉冲宽度在500 ps~10 ns范围内,且输出功率为18~21 W的情况下,其峰值功率的对比图。从图中可以看出,它们的峰值功率均在12 kW以上,最高峰值功率为34.5 kW。图7显示了在500 ps~10 ns范围内,且输出功率为18~21 W的情况下的单脉冲能量值。从图中可以看出,单脉冲能量变化范围为20  $\mu$ J~0.13 mJ,满足阳极氧化铝表面打黑以及PE塑料处理<sup>[6]</sup>等应用对单脉冲能量的需要。结合图6和图7可以看出,该激光器可以实现较高单脉冲能量、较高峰值功率、较高重复频率的近似单模的脉冲激光输出,满足对激光加工热敏感材料的高精度加工的需要。

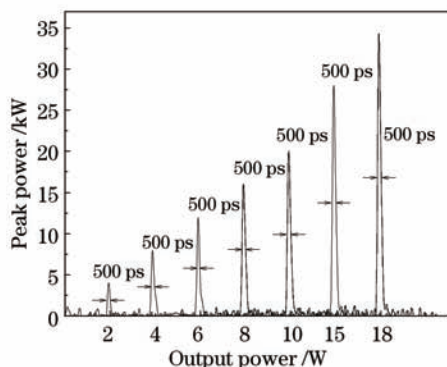


图5 脉宽为500 ps的脉冲在放大过程中脉冲宽度及峰值功率的变化情况

Fig.5 Change of pulse width and peak power of 500 ps pulse during amplification process

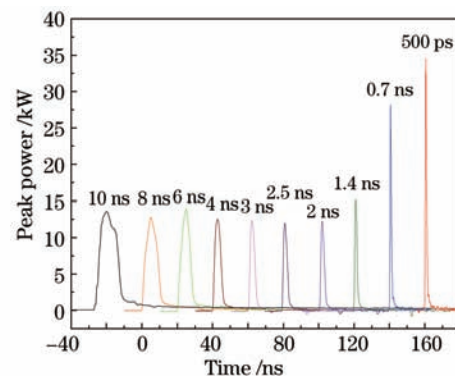


图6 在脉冲可调脉宽范围500 ps~10 ns内,且输出功率为20 W时,脉冲的峰值功率对比图

Fig.6 Peak power of pulses with duration between 500 ps and 10 ns at output power of 20 W

图8为该高功率激光器对阳极氧化铝打黑效果图。表1为相应波形所需的最佳参数表。本实验采用的阳极氧化铝厚度为20  $\mu$ m,利用柯尼卡美能达CM-700d对处理结果进行相应的测试,测试结果如表1所示。其中, $L^*a^*b$ 的L值与黑度有关,L值越低,黑度值就越高。结合图表可以看出,对该项目材料进行打黑处理时,使用不同脉冲宽度的激光,其相应所需的最佳功率几乎相同。且均在最佳功率情况下,使用速度及间距等相同时,脉冲宽度越窄,黑度越好。实验表明,皮秒激光的打黑效果优于纳秒激光脉冲,且由于作用时

间短,没有对材料造成过度加热的现象,这对于激光用于高精度高工艺加工具有重要意义。

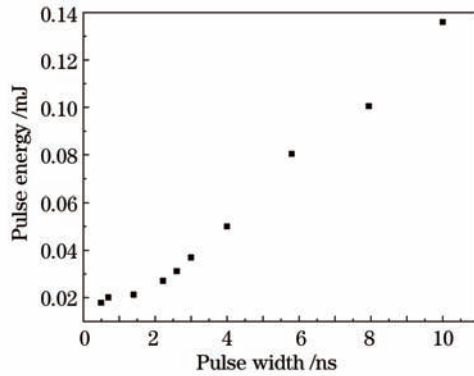


图7 不同脉宽脉冲的单脉冲能量

Fig.7 Single pulse energy of different pulse widths

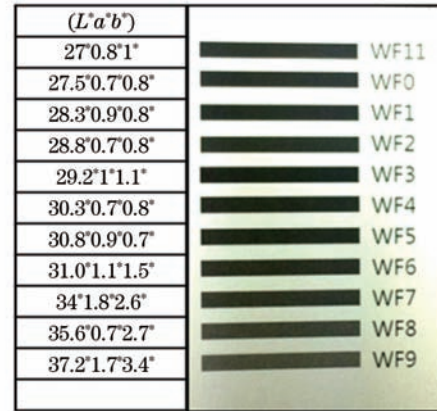


图8 对阳极氧化铝进行打黑处理效果图

Fig.8 Effect chart of blackening processing for anodic aluminum oxide material

表1 打黑时使用的各种详细参数说明表

Table 1 Detail parameters for the blackening processing

Waveform (WF)	Pulse width /ns	Average power* /W	Speed /(mm/s)	Filling space / $\mu$ m	Test results (L*a*b*)
11	0.55	3.91	1000	0.1	27*0.8*1*
0	0.7	3.91	1000	0.1	27.5*0.7*0.8*
1	0.8	3.68	1000	0.1	28.3*0.9*0.8*
2	1	3.45	1000	0.1	28.8*0.7*0.8*
3	1.5	3.38	1000	0.1	29.2*1*1.1*
4	2	3.68	1000	0.1	30.3*0.7*0.8*
5	2.5	3.35	1000	0.1	30.8*0.9*0.7*
6	3	3.78	1000	0.1	31.0*1.1*1.5*
7	5	4.6	1000	0.1	34*1.8*2.6*
8	8	4.6	1000	0.1	35.6*0.7*2.7*
9	10	5.5	1000	0.1	37.2*1.7*3.4*

\*represents best average power for material used in this project for corresponding waveform.

## 4 结 论

采用MOPA技术,选用自主研发的皮秒激光脉冲作为种子源,同时利用自主研发的掺镜光纤放大器进行放大,得到输出脉宽范围为500 ps~10 ns,平均功率为18~21 W,峰值功率11~34 kW,单脉冲能量0.02~0.13 mJ的高峰值功率,高脉冲能量及高平均功率的500 ps光纤激光器。该500 ps光纤激光器非常适合在一些对于热加工敏感的材料上应用,避免激光脉冲持续时间引起的热扩散从而导致过度加热等现象,特别对于PE塑料和阳极氧化铝在打黑处理时有着不可取代的作用。

## 参 考 文 献

- 1 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135-138.  
楼祺洪,周 军,朱健强,等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 135-138.
- 2 Liu X, Du D, Mourou G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses [J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1997, 33(10): 1706-1716.
- 3 Stuart B C, Feit M D, Herman S, *et al.*. Optical ablation by high-power short-pulse lasers [J]. *J Opt Soc Am B*, 1996, 13(2): 459-468.

- 4 Dong Xiaolin, Xiao Hu, Xu Shanhui, *et al.*. 122-W high-power single-frequency MOPA fiber laser in all-fiber format [J]. *Chin Opt Lett*, 9(11): 111404.
- 5 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]// P L Christiansen, M P Sorensen, A C Scott. *Nonlinear Science at the Dawn of the 21th Century*. Berlin: Springer, 2000. 195-211.
- 6 Jiang Haihe. Development and forecast of the laser processing technology application [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2001, 14(4): 1-12.  
江海河. 激光加工技术应用的发展与展望[J]. *光电子技术与信息*, 2001, 14(4): 1-12.