

高能量 MOPA 脉宽可调激光器

崔建丰^{1,2}, 邬小娇^{2*}, 李福玖², 卢春良², 岱 钦¹, 李业秋¹, 张 鹏¹, 张善春¹

(1. 沈阳理工大学 理学院, 辽宁 沈阳 110159)

(2. 鞍山紫玉激光科技有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

摘 要: 利用 MOPA 激光种子源, 结合氙灯泵浦行波放大方法研制了高能量脉宽可调 1 064 nm 波段激光器。激光器采用电调制脉宽方式控制 MOPA 光纤激光器脉冲信号的输出, 在保证高光束质量的前提下, 实现了脉宽 8.6~220.9 ns 可调的 1 064 nm 种子激光输出。选用双通放大级设计, 利用氙灯泵浦 Nd:YAG 晶体实现五级行波放大, 分析讨论了抑制自激振荡方法和行波放大过程中脉宽变窄的原因。当氙灯注入能量为 60 J, 重复频率 10 Hz 时, 实现了脉宽调范围为 4.2~173.3 ns 的稳定 1 064 nm 激光输出, 单脉冲能量最高可达 158 mJ。

关键词: 脉宽可调; 全固态激光器; 氙灯泵浦; MOPA 放大器

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0405005

High energy MOPA pulse-width-tunable laser

Cui Jianfeng^{1,2}, Wu Xiaojiao^{2*}, Li Fujiu², Lu Chunliang², Dai Qin¹, Li Yequi¹,
Zhang Peng¹, Zhang Shanchun¹

(1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Anshan ZY Laser Technology Co., Ltd, Anshan 114000, China)

Abstract: The high energy pulse width tuning 1 064 nm solid-state laser was developed by adopting MOPA laser source and combining the traveling wave amplification of xenon-lamp pumping. The pulse signal out of MOPA fiber laser was controlled by the method of electric modulation pulse width. Under the premise of ensuring high beam quality, a 1 064 nm laser source output with pulse width of 8.6–220.9 ns was achieved. Adopting double pass amplifier design, five-step travelling wave amplification was achieved by xenon lamp pumping Nd:YAG crystal. The technique of restraining self-oscillations and the reasons of narrowing pulse width in the process of traveling wave amplification were analyzed. When the inject energy of xenon-lamp was 60 J and the repetition rate was 10 Hz, a 1 064 nm laser output with pulse width of 4.2–173.3 ns was achieved. Single pulse energy was up to 158 mJ.

Key words: pulse width tuning; solid-state laser; xenon-lamp pumping; MOPA amplifier

收稿日期: 2018-11-08; 修订日期: 2018-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(61705145); 辽宁省科技计划项目(2014220040); 辽宁省高等学校创新人才支持计划(LR2016079); 沈阳市科技计划项目(17-33-6-00); 沈阳理工大学激光与光信息技术辽宁省重点实验室开放基金(1010131008603)

作者简介: 崔建丰(1977-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事固体激光技术方面的研究。Email: cuijf@163.com

0 引言

纳秒级激光光源是指激光脉冲脉宽(单个脉冲的持续时间)在纳秒级别的激光,由于其具有功率大、稳定性高、易实现等优点,因此在科学研究以及工业领域的许多方面应用广泛^[1-4]。近年来,随着激光技术的迅速发展,传统的单一脉宽激光输出在很多场合已不能满足应用需求,因此,脉宽可调谐的激光输出得到越来越多的重视。能够调节脉宽的方式有很多,如吕志伟等^[5]采用双池受激布里渊散射相位共轭镜(SBS)^[6-7]获得脉宽可调的激光输出,并且发现脉宽的调节范围与抽运能量有关;通过改变腔长的方式也能够实现脉宽的调节,但是频繁改变谐振腔的结构不利于激光输出的稳定性,并且多种腔长的光路设计也是其限制因素之一。目前,通过电调制实现脉宽调谐输出的方案已得到产业化生产,直接电调制方法对脉冲形状具有良好的控制能力,能够实现几纳秒到几百纳秒范围内可调,同时也能够得到良好的激光特性,但单脉冲能量较小。

MOPA 光纤激光技术能够实现同时具有高光束质量和高能量的激光输出^[8-11]。但对于更大能量的需求,由于光纤增益介质自身的限制无法实现。而脉冲氙灯注入能量高,能够有效地激励增益介质实现上能级粒子数的反转,获得更高的储能效率。氙灯泵浦激光放大技术能够在低重频的条件下获得大能量的激光输出^[12-15]。

文中通过电调制脉冲信号输出,将 MOPA 光纤放大方法与氙灯泵浦行波放大方法相结合,10 Hz 重复频率条件下,实现了脉宽从 4.2~173.3 ns 可调的 1 064 nm 激光稳定输出,最高单脉冲能量可达 158 mJ。

1 实验装置

激光器主要由脉宽调制 MOPA 光纤激光种子源、氙灯泵浦多重行波放大结构两部分构成。如图 1 所示,MOPA 光纤激光器包括半导体激光器种子源构成的主振荡器以及由泵浦激光器抽运的掺镱光纤构成的放大器。主振荡器所用半导体激光器中心波长 1 064 nm,具备高光束质量且易于实现脉宽调制。波长 975 nm 的半导体激光二极管作为泵浦光源,

利用熔接耦合方式将种子光和泵浦光通过合束器分别耦合进掺 Yb³⁺光纤的纤芯和包层中。增益光纤工作波长 1 064 nm,纤芯与包层直径分别为 6 μm 和 125 μm,纤芯数值孔径为 0.07。泵浦光在纤芯中传播时被掺杂离子吸收,实现上能级的粒子数反转,当种子光作为激励光沿纤芯传输时,产生受激辐射光使信号光得到放大。光隔离器用于避免反向传输的光对种子光源以及泵浦光源造成损坏。

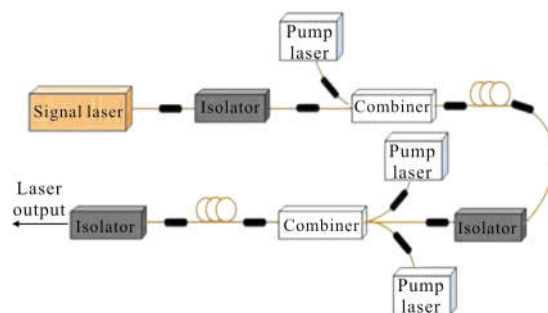


图 1 MOPA 光纤激光种子源光路示意图

Fig.1 Optical path schematic diagram of MOPA fiber laser seed source

脉宽调制采用直接电调制方式,控制图 1 中半导体激光种子源的脉宽调制信息,利用脉宽处理电路与脉宽控制电路进行脉宽信息的提取与检测。输入控制信号后,当脉冲信号处理电路检测到脉冲控制信号的下降沿来临时,根据脉冲处理电路提取的脉宽信息向半导体激光器触发一个具有目标脉宽的脉冲。利用光纤增益介质实现放大,MOPA 光纤激光种子源产生具有对应脉宽信息的激光。

行波放大部分选用氙灯泵浦 Nd:YAG 晶体方式,利用单灯三棒聚光腔实现五级行波放大。聚光腔中晶体棒的位置设计如图 2 所示,能够同时获得小

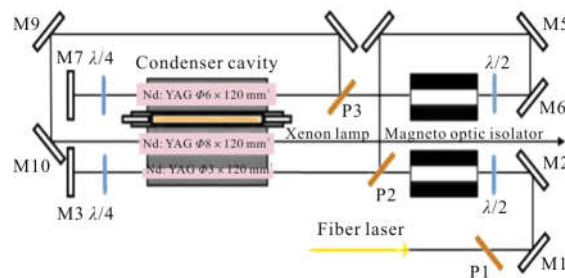


图 2 氙灯泵浦行波放大光路示意图

Fig.2 Optical path schematic diagram of travelling wave amplifying of xenon-lamp pumping

尺寸晶体棒的高增益与大尺寸晶体棒的高储能,提高泵浦效率与输出效率。Nd:YAG 晶体尺寸分别为 $\phi 3 \times 120$ 、 $\phi 6 \times 120$ 、 $\phi 8 \times 120 \text{ mm}^3$,增益介质 Nd^{3+} 的掺杂浓度为 1%,为防止自激振荡,端面均具有 1° 倾斜角。如图 2 所示,P1、P2、P3 为水平偏振片,布儒斯特角为 45° 。M1、M2、M4、M5、M6、M8、M9、M10 为 45° 全反镜,镀 1064nm 全反膜,反射率 $R > 97\%$ 。M3、M7 为 0° 全反镜,镀 1064 nm 全反膜, $R > 97\%$ 。脉冲氙灯为软极灯,外径 8 mm,放电弧长 95 mm。

当 MOPA 光纤激光种子源发出的激光进入 $\phi 3 \times 120 \text{ mm}^3$ Nd:YAG 晶体棒进行一级放大前,利用磁光隔离器进行隔离,防止反射光对光路造成损坏。P1、P2 起到起偏与检偏的作用。激光通过一级放大到达全反镜 M3,旋转 $\lambda/4$ 波片的角度,使光轴与水平方向成 45° ,水平偏振光经过两次 $\lambda/4$ 波片,则变为垂直偏振光,再一次通过 $\phi 3 \times 120 \text{ mm}^3$ Nd:YAG 晶体棒,实现二级放大,即双通放大。经过水平偏振片 P2 时发生反射,磁光隔离器能够有效隔离 $\lambda/4$ 波片调节过程中因误差产生的反射光对种子光造成的损坏。同理, $\phi 6 \times 120 \text{ mm}^3$ Nd:YAG 晶体棒实现三级、四级双通放大设计。激光经由 $\phi 8 \times 120 \text{ mm}^3$ Nd:YAG 晶体棒五级放大后输出。

2 结果与讨论

实验测量了脉宽调制 MOPA 光纤激光种子源在 10 Hz 重复频率下的 1064 nm 输出参量,通过输入不同的控制信号,脉宽可实现 8.6~220.9 ns 范围内 8 档可调输出脉宽,如图 3 所示。当脉宽超过 80 ns 时波形产生畸变,这是由于出光信号给调制电路后,调制电路开始工作,有激光输出,由于调制电路自身上升沿影响,光强越来越强,就形成了上升延。当调制电路完全打开后,光的强度就会趋于平衡不再增长;当关闭信号到达时,调制电路关闭,同样,受调制电路下降沿影响,脉宽相应形成下降延。在这个过程中,如果调制电路到关闭时还未完全打开,就会形成类似正态分布的脉冲波形;但当调制电路到关闭时已完全打开并持续一段时间后,就会形成类似方波的脉冲波形,正态分布方波发生畸变,如图 3 中脉宽超过 80 ns 时。半导体激光二极管输出波长受温度影响发生改变,当温度过低或过高时,泵浦波长与光

纤增益介质中的激活离子吸收波长不能很好地重合,因此对整个系统的输出能量影响较大。实验测得 MOPA 光纤激光种子源各脉宽条件下获得的最大单脉冲能量如表 1 所示,脉宽越大,单脉冲能量越高,最大单脉冲能量可达 580 μJ 。

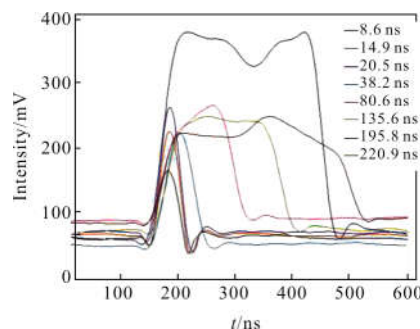


图 3 种子源脉冲波形

Fig.3 Pulse waveform of laser source

表 1 不同脉宽条件下单脉冲能量值

Tab.1 Single pulse energy in different pulse-width conditions

Pulse width/ns	Energy/ μJ	Pulse width/ns	Energy/ μJ
8.6	347	80.6	495
14.9	385	135.6	531
20.5	420	195.8	567
38.2	458	220.9	580

采用如图 2 所示的光路图对 MOPA 光纤激光种子源进行五级行波放大,单灯三棒聚光腔实现两次双通放大的设计能够高效地在缩小体积、降低成本的基础上提高激光介质的增益与储能。而高增益能够增大自激振荡的产生,从而在放大过程中消耗上能级粒子数降低增益并对其他光学元件造成损坏。另外,在调节 $\lambda/4$ 波片实现双通放大过程中,反射光二次通过激光晶体棒,由于偏振片存在消光比,则有部分激光能够按原光路返回,也容易引起自己振荡的产生。由于自激振荡现象通常发生在激光晶体棒与其他光学元件构成的谐振腔的情况下,针对这一现象,实现采用两种方法进行解决。首先将激光晶体棒各端面均磨斜 1° ,增加光束与激光晶体棒的偏折角度。另外在两次双通放大前均加入法拉第磁光隔离器来使激光单向导通,从而避免自激振荡的发生。

经过氙灯泵浦五级行波放大后 1 064 nm 激光输出特性曲线如图 4 所示。可以看出,当输入电压为 85%(氙灯注入能量约 60 J)时,1 064 nm 激光单脉冲能量在最长脉宽条件下最大为 158 mJ, 最短脉宽 4.2 ns 条件下单脉冲能量为 10.4 mJ。输出能量不稳定度均小于 2%。增加氙灯注入能量,最短脉宽条件下,1 064 nm 激光可经五级放大后放大至 37.8 mJ。五级行波放大倍率最高可达 300 倍。输出激光光斑近似为圆形,直径 8 mm,发散角为 2 mrad,光束质量较好。

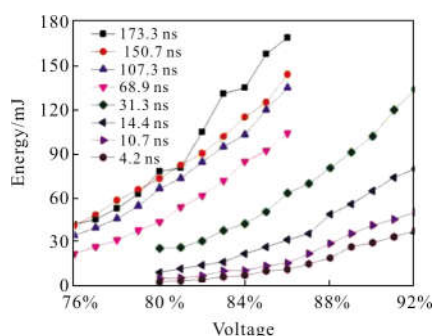


图 4 输出特性曲线

Fig.4 Output characteristic curves

当电源输入电压为 85%(氙灯注入能量 60 J)时,多重放大后 1 064 nm 脉宽波形如图 5 所示。可以看出,脉宽在 4.2~173.3 ns 范围内可调,相对于种子源脉宽,脉冲在放大过程中上升沿变陡,脉宽变窄,造成该现象的原因是因为放大级晶体棒的储能是有限的,里面的反转粒子数已经趋于饱和后,当放大之前的光的强度已足以让放大级晶体棒里面的反转粒子向下跃迁后,放大级晶体棒里积累的反转粒子就会在种子光束脉冲结束前被消耗完,就会出现种子脉冲开始时,激光的放大倍数较大,增益较为明

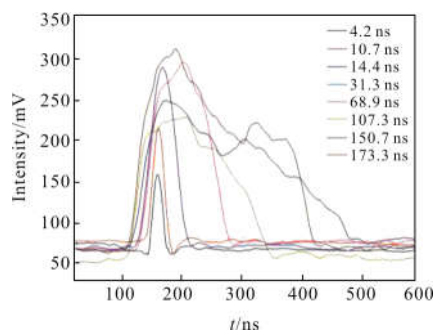


图 5 行波放大后脉冲波形

Fig.5 Pulse waveform of amplifier

显;而在种子脉冲结束阶段,由于放大级的反转粒子已经消耗殆尽,放大倍数较低。所以,当放大之前的光的强度已足以让放大级晶体棒里面的反转粒子向下跃迁后,放大级的反转粒子就会优先跟随于脉冲的前沿向下跃迁,造成前沿变窄,从而使得脉宽变窄。

3 结论

激光器采用直接电调制脉宽方式控制 MOPA 光纤激光器脉冲信号的输出,获得重复频率 10 Hz、脉宽 8.6~220.9 ns 范围可调 1 064 nm 种子激光输出,单脉冲能量 347~580 μ J。利用氙灯泵浦 Nd:YAG 晶体双通放大光路设计实现五级行波放大时,通过晶体棒端面斜角的选择以及磁光隔离器的放置,有效避免了自激振荡的产生。当氙灯注入能量为 60 J、重复频率 10 Hz 时,获得脉宽可调范围为 4.2~173.3 ns 的稳定 1 064 nm 激光输出,单脉冲能量最高可达 158 mJ。脉冲在放大过程中脉宽变窄,这是因为行波放大过程中,放大级的反转粒子优先跟随于脉冲的前沿向下跃迁。前沿放大倍数较大,增益较为明显,从而造成前沿变陡,脉宽变窄。

参考文献:

- [1] Duong V T, Andrew D, Thomas J W, et al. Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 357(A): 248-254.
- [2] Zhang Heng, Zhou Yun, Fang Zongbao, et al. Fabrication of micro-grating structure on glazed stainless-steel by nanosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(3): 448-451. (in Chinese)
张恒, 周云, 方宗豹, 等. 用纳秒激光在镜面不锈钢表面刻蚀微光栅结构[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 448-451.
- [3] Guo Bing, Zhao Qingliang, Chen Bing, et al. Precision grinding of optical glasses by laser micro-structured grinding wheels [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2659-2666. (in Chinese)
郭兵, 赵清亮, 陈冰, 等. 光学玻璃的激光微结构化砂轮精密磨削[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2659-2666.
- [4] Tarasenko V F, Panchenko A N, Bulgakova N M, et al. Formation of microstructure on liquid metal surface under nanosecond laser ablation[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(1): 46-52.

- [5] Lv Zhiwei, Liu Li, He Weiming, et al. Generation of high-quality tunable-duration pulses by phase conjugating mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(3): 389-394. (in Chinese)
吕志伟, 刘莉, 何伟明, 等. 利用相位共轭镜产生高质量宽度可调脉冲[J]. 光学学报, 2000, 20(3): 389-394.
- [6] Wang Yulei, Lv Zhiwei, He Weiming, et al. Investigation on a high energy stimulated Brillouin scattering phase-conjugate mirror [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2): 883-888. (in Chinese)
王雨雷, 吕志伟, 何伟明, 等. 一种大能量受激布里渊散射相位共轭镜的研究[J]. 物理学报, 2007, 56(2): 883-888.
- [7] Wang Guosong. Research on self-Q-switching mechanism of phase conjugate laser oscillator based on SBS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1437-1442. (in Chinese)
王国松. 受激布里渊散射位相共轭激光器自调Q机理研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1437-1442.
- [8] Okamoto Y, Uno Y, Mohri T, et al. Investigation of surface treatment method by high-speed scanning of single-mode fiber laser with MOPA [J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 407-408: 624-627.
- [9] Wang Guoxiang, Jiang Peipei, Yang Dingzhong, et al. MOPA structured pulsed Yb fiber laser with high average power [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 456-459. (in Chinese)
汪国香, 姜培培, 杨丁中, 等. 基于MOPA结构的高功率线偏振脉冲YB光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 456-459.
- [10] Feng Yutong, Du Songtao, Yang Yan, et al. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36 (8): 1932-1936. (in Chinese)
冯宇彤, 杜松涛, 杨燕, 等. 基于LD调制的全光纤MOPA结构激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 1932-1936.
- [11] Dong Lei, Liu Xinyue, Chen Hao. Properties of pulse single-frequency laser and extra-cavity double frequency green laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 800-805. (in Chinese)
董磊, 刘欣悦, 陈浩. 脉冲单频Nd:YVO₄激光器及其倍频输出特性研究[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 800-805.
- [12] Shuaibov A K, Grabovaya I A. Electrodischarge ultraviolet xenon/iodine lamp [J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2005, 72(2): 262-265.
- [13] Zhang Hua, Gao Yanxia, Fan Dianyuan, et al. Optimized design of xenon flashlamp pumping of Nd:Glass amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18 (12): 1615-1623. (in Chinese)
张华, 高艳霞, 范滇元, 等. 钨玻璃放大器氙灯泵浦的优化设计[J]. 光学学报, 1998, 18(12): 1615-1623.
- [14] Zhang Yongmei, Yu Yinshan. Studies on flashlamp-pumped Ti:sapphire laser with strong simmer current [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4 (5): 21-25. (in Chinese)
张永梅, 余饮山. 强预燃灯泵钛宝石激光器特性研究[J]. 光学精密工程, 1996, 4(5): 21-25.
- [15] Parsa S, Fallah H R, Ramezani M, et al. Generation of pulsed besell-gauss beams using passive axicon-theoretical and experimental studies[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(30): 7339-7344.