

基于亚纳秒微片激光器的能量放大器的研究

唐瑞鑫, 段存丽*

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 高脉冲能量和窄脉冲宽度的激光放大器可以应用在诸多领域, 例如激光加工、激光医疗美容和激光雷达。种子源激光器与行波放大结构相结合的主振荡功率放大 (MOPA) 技术, 既能保证输出的脉冲激光相关特性 (如脉宽和重复频率等) 与种子源特性一致, 又能实现激光输出能量的放大。因此 MOPA 技术成为激光放大器工程应用中的主要技术。本课题针对医疗美容对亚纳秒级大能量激光放大器的需求, 研制了一台基于亚纳秒微片固体激光器的激光放大器。首先, 采用亚纳秒被动调 Q 微片固体激光器作为种子源。种子源激光器在重复频率为 10 Hz, 脉冲宽度为 487.3 ps 时输出能量为 190 μ J 的 1064 nm 种子光。然后, 利用自制的两个氙灯泵浦 Nd: YAG 模块作为主放大器对亚纳秒激光脉冲能量进行放大, 对放大过程自激振荡产生的能量实现了抑制, 有效地提高了放大过程中的能量转换效率。最终, 得到了波长 1064 nm 和 532 nm 可切换输出, 在重复频率为 10 Hz 时, 获得了脉冲宽度 496.4 ps, 脉冲能量 561 mJ@1064 nm, 330 mJ@532 nm, 能量稳定性 2% 且光斑均匀的亚纳秒激光输出。

关键词: 亚纳秒; 高能量; 氙灯泵浦; 波长可切换; 放大器

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210200

Research on energy amplifier based on sub-nanosecond microchip laser

Tang Ruixin, Duan Cunli*

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Laser amplifiers with high pulse energy and narrow pulse width can be used in many fields, such as material processing, medical plastic surgery and lidar. The Master Oscillator Power Amplification (MOPA) technology, which combining the seed laser and the amplifying structure, not only enables features of the output pulse laser are consistent with that of the seed laser (pulse width and repetition frequency, etc.), but also ensures the amplification of the output laser energy. Thus, MOPA technology becomes the main technology in laser amplifier based on engineering applications. In this subject, a laser amplifier based on a sub-nanosecond microchip solid-state laser was developed in response to the demand for sub-nanosecond high-energy laser amplifiers in medical cosmetology. Firstly, a sub-nanosecond passive Q-switched microchip solid-state laser was used as the seed source. The seed source laser has a repetition frequency of 10 Hz, a pulse width of 487.3 ps, and a wavelength of 1064 nm to output seed light with an energy of 190 μ J. Then two self-made xenon lamp-pumped Nd:YAG modules were used as the main amplifier to amplify the sub-nanosecond laser pulse energy. The energy generated from the self-oscillation in the amplification process was suppressed, and the energy transfer efficiency during the amplification was increased effectively. Finally, a switchable output with wavelengths of 1064 nm and 532 nm was obtained. When the repetition frequency was 10 Hz, a sub-nanosecond laser output with a pulse

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-05-16

作者简介: 唐瑞鑫, 男, 硕士生, 主要从事全固态激光放大方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 段存丽, 女, 副教授, 硕士生导师, 硕士, 主要从事光学检测及激光技术应用方面的研究。

width of 496.4 ps, a pulse energy of 561 mJ@1064 nm, 330 mJ@532 nm, an energy stability of 2% and a uniform spot were obtained.

Key words: sub-nanosecond; high pulse energy; xenon lamp pumping; wavelength switchable; amplifier

0 引言

高能量、亚纳秒脉宽并且结构紧凑的激光系统对许多应用都很有吸引力,包括激光雷达^[1]、激光加工^[2]。它们还可用于在各种应用中有效地将波长转换为绿色波长,例如激光美容^[3]。对于高能量、窄脉宽的激光器大多采用主振荡器功率放大(MOPA)技术来放大短脉冲宽度激光脉冲的输出能量^[4-5]。

2017年,汪超等人实现了一个四灯泵浦钕玻璃四通放大结构的MOPA系统,使用全光纤激光器获得波长为1053nm,脉冲能量为1nJ的种子光,经过氙灯泵浦钕玻璃棒四通放大器后,获得的脉冲激光输出最大能量为1J^[6]。2018年,刘晶等人展示了一个纳秒MOPA系统,种子源在脉冲宽度为12ns,重频为5Hz,波长为1064nm时,输出脉冲能量为10mJ的种子光。采用三通Nd:YAG板条结构作为主放大级对种子光进行放大。最终,激光系统在泵浦能量为26.8J,输出频率为5Hz,输出脉冲宽度11.3ns时,获得的纳秒脉冲激光输出最大脉冲能量5.4J^[7]。2018年,Vincent Yahia等人报道了一台光纤耦合激光二极管端面泵浦Nd:YAG棒状结构的高亮度亚纳秒MOPA激光器,激光系统在输出脉冲宽度为600ps,重复频率为10Hz,输出波长为1064nm时,获得的亚纳秒脉冲激光输出脉冲能量为235mJ^[8]。2020年,周一平等人采用半导体激光器侧面泵浦Nd:YAG棒状结构亚纳秒MOPA系统,获得了脉冲宽度为730ps,重复频率20Hz,脉冲能量203mJ的亚纳秒激光输出^[9]。然而,这些研究未能实现在10Hz的重复频率下亚纳秒激光的脉冲能量大于500mJ且波长可切换。

文中研究提出了一种采用亚纳秒微片激光器的主振荡器-功率放大(MOPA)系统。采用氙灯泵浦二级放大实验方案,将重复频率为10Hz,脉冲宽度487.3ps,脉冲能量为190μJ的亚纳秒种子激光,放大得到脉冲宽度496.4ps,脉冲能量561mJ@1064nm,330mJ@532nm的亚纳秒激光脉冲输出,激光系统在180min的工作时间内,能量稳定性小于2%。研究中开发的

波长可切换激光系统可用于激光医疗美容应用。

1 实验装置

亚纳秒激光MOPA系统种子源采用激光二极管泵浦的被动调Q微片固体激光器,其结构如图1所示。

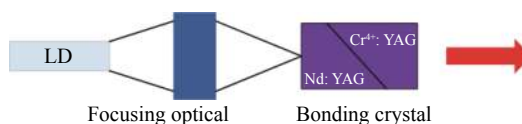


图 1 种子源装置示意图

Fig.1 Layout of the seed source

泵浦源为光纤耦合半导体激光器,输出波长为808nm,纤芯直径105μm,数值孔径0.22。激光介质Nd:YAG晶体与可饱和吸收体Cr⁴⁺:YAG键合,采用铜热沉贴合散热。光纤耦合半导体激光器发出泵浦光,泵浦光由光纤输出后经准直聚焦系统准直后对晶体进行泵浦,输出波长为1064nm,脉冲能量190μJ,脉冲宽度487.3ps的脉冲激光,其输出脉冲宽度如图2所示。

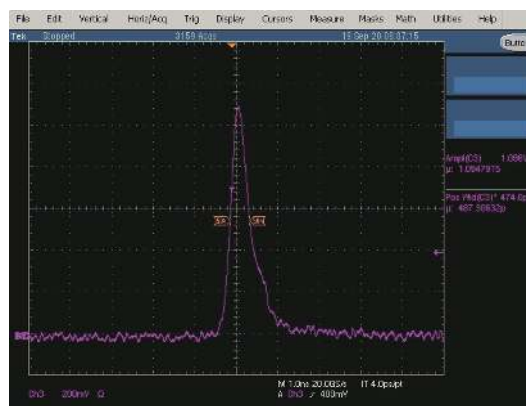


图 2 种子源输出脉冲激光波形图

Fig.2 Profile of the pulse of the seed source

亚纳秒激光MOPA系统和实物如图3、图4所示。MOPA结构采用二级放大,采用两个氙灯泵浦Nd:YAG模块放大亚纳秒激光脉冲的脉冲能量,一级放大采用尺寸为7mm×7mm×110mm,Nd³⁺掺杂浓度

为 0.8% 的晶体棒, 二级放大采用尺寸为 8 mm×8 mm ×110 mm, Nd³⁺掺杂浓度为 0.8% 的晶体棒。为了防止放大器中的回程光损坏种子源, 在种子源和一级放大器之间放置法拉第光学隔离器。

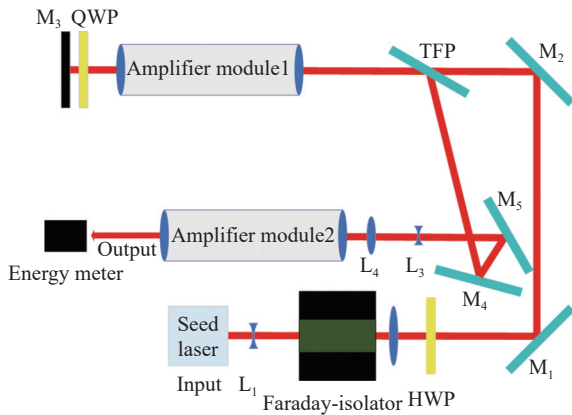


图 3 激光放大器装置示意图 (L₁ 为凹透镜, L₂ 为凸透镜, FI 为法拉第隔离器, HWP 为半波片, M₁、M₂ 为 45°反射镜, TFP 为薄膜偏振片, AM1 为一级放大模块, QWP 为四分之一波片, M₃ 为全反射镜, M₄、M₅ 为 30°反射镜, L₃ 为凹透镜, L₄ 为凸透镜, AM2 为二级放大模块)

Fig.3 Layout of the experimental setup (L₁, Concave lens; L₂, Convex lens; FI, Faraday-isolator; HWP, Half wave plate; M₁、M₂, 45° reflection mirror; TFP, Thin film polarizer; AM1, Amplifier module I; QWP, Quarter-wave plate; M₃, Total reflection mirror; M₄、M₅, 30° reflection mirror; L₃, Concave lens; L₄, Convex lens; AM2, Amplifier module II)

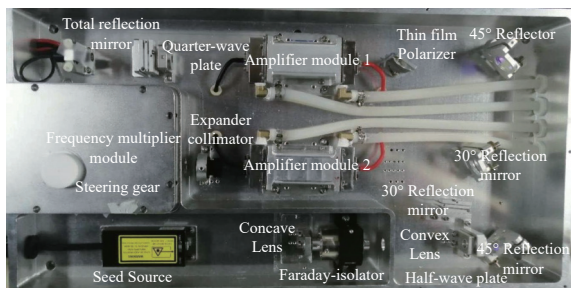


图 4 激光放大器实物图

Fig.4 Photo of the laser amplifier

2 实验结果和讨论

种子源在重复频率 10 Hz, 波长 1064 nm, 得到了脉冲能量 190 μJ 的激光输出, 测得种子光通过法拉第隔离器后脉冲能量达到 180 μJ, 使用示波器测得脉宽为 487.3 ps, 如图 2 所示。

在获得亚纳秒种子激光输出后, 种子光进入二级放大器实现放大。在放大器泵浦脉宽为 200 μs, 经氙灯泵浦 Nd:YAG 模块二级放大后, 其输出激光脉冲能量随泵浦电压变化如图 5 所示。

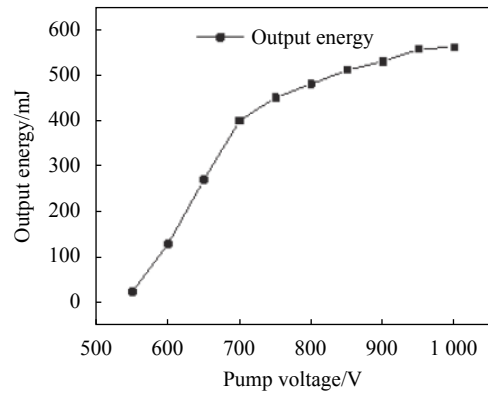


图 5 输出能量随泵浦电压关系图

Fig.5 Relationship between output energy and pump voltage

从实验结果来看, 在放大级泵浦电压达到 1000 V 时, 得到了输出脉冲能量为 561 mJ 激光输出, 种子源能量被放大了 3 117 倍, 能满足医疗美容领域对激光放大器的要求。

为了实现激光放大器波长可切换输出, 文中采用 13 mm×13 mm×5 mm KTP 晶体作为倍频所需晶体, 放大后输出的脉冲激光经过一扩束系统进入 KTP 晶体实现倍频。由于 KTP 晶体倍频效率无法达到 100%, 因此倍频后输出的脉冲激光包含 1064 nm 和 532 nm 两种光, 这对应用有很大的干扰。文中课题在 KTP 倍频晶体后加入滤光片, 只有波长为 532 nm 的脉冲激光能够输出。图 6 所示为 532 nm 输出激光脉冲能

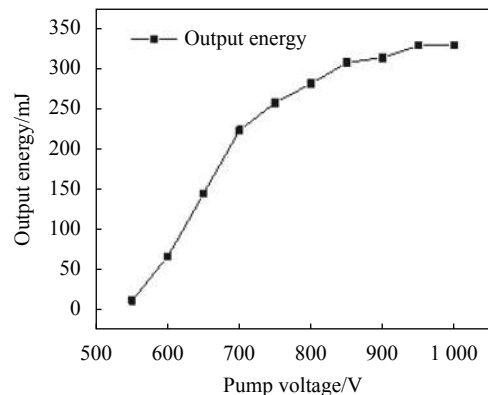


图 6 532 nm 输出能量随泵浦电压关系图

Fig.6 Relationship between 532 nm output energy and pump voltage

量随泵浦电压的变化。

针对放大后的输出脉冲激光进行能量稳定性测试, 1064 nm 和 532 nm 输出激光脉冲能量随时间的变化如图 7 所示。在泵浦电压为 1000 V 条件下, 持续工作 180 min, 每 20 min 记录一个输出脉冲激光能量值, 得到该激光放大器的稳定性为 2%, 激光放大器的输出脉冲激光能量和能量稳定性都可以满足医疗美容领域的应用需求。

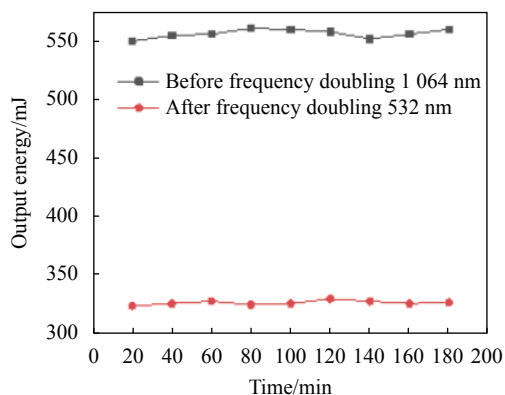


图 7 激光输出能量稳定性测试

Fig.7 The stability of output energy

当放大器使用未切倾角的 Nd:YAG 晶体棒, 在一级双程放大中, Nd:YAG 晶体的一个端面与全反射镜形成了腔, 存在严重的自激振荡效应, 展宽了种子源产生的激光脉冲的脉冲宽度, 严重影响了激光主振荡器的稳定工作和输出脉宽。无种子光注入时, 观察到了自激现象, 会消耗放大器中的反转粒子产生的能量, 降低放大器的增益, 成为限制放大器性能的主要因素。实验中测得在泵浦电压为 1000 V 时, 自激光的能量最大可达 43 mJ。可以将棒的两端面磨成较小的斜角, 使棒端面反射的光线不再返回棒中。假定棒直径为 D , 长度为 L , 斜角为 α 。则: $\alpha = \arctan(D/L)$ ^[10]。将一级放大的 Nd:YAG 晶体棒的端面切 3.6° 倾角, 二级放大的 Nd:YAG 晶体棒的端面切 4.2° 倾角来抑制自激振荡产生的损耗, 避免影响激光输出能量, 并且将 Nd:YAG 晶体的两个端面均镀上 1064 nm 增透膜提高转化效率。当泵浦电压为 1000 时自激光从 43 mJ 降到 1.07 mJ, 自激振荡效应得到很好的抑制。

实验中, 采用光电二极管和示波器对二级单程放大中的输出 1064 nm 激光脉冲宽度进行测量, 二级单程放大后输出激光脉宽波形图如图 8 所示。测得放

大后的脉冲激光脉冲宽度为 496.4 ps, 而种子源激光脉冲宽度为 487.3 ps, 激光脉冲宽度有一定的展宽, 这是因为放大器对激光脉冲产生时间畸变引起的^[11]。

采用 Coherent 光束质量分析仪对二级单程放大中的输出脉冲激光光斑进行测量, 如图 9(a)、9(b) 所示。整形前光斑直径为 6.5 mm, 均匀度为 40%, 光斑均匀度较低, 能量分布不均匀, 不适用于激光美容的应用。为了使放大后的脉冲激光均匀性提升, 在放大器输出端加入扩束准直系统对光斑进行扩束整形, 并加入软边光阑^[12] 使光斑能量分布均匀, 无强心, 整形后光斑均匀度达到 80%, 光斑直径为 12.5 mm, 可以满足激光医疗美容的应用。

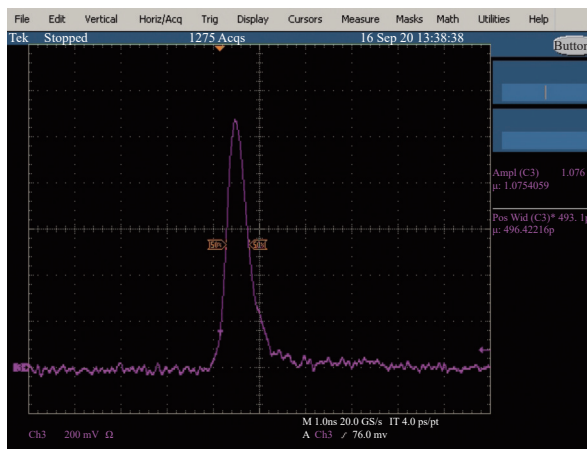


图 8 放大激光脉宽波形图

Fig.8 Profile of the pulse of the amplifier

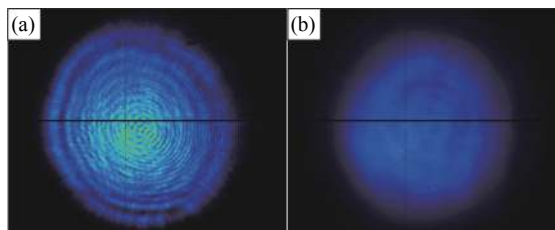


图 9 激光光斑图: (a) 整形前激光光斑图; (b) 整形后脉冲激光光斑图
 Fig.9 Photo of the light spot: (a) Photo of before optimizing the light spot; (b) Photo of after optimizing the light spot

3 结 论

文中研究了一种高能亚纳秒 MOPA 激光系统。研究并抑制了激光放大器中的自激振荡效应。采用激光二极管泵浦的被动调 Q 微片固体激光器获得了脉冲宽度约为 487.3 ps、重复频率为 10 Hz 的亚纳秒

激光脉冲。采用氙灯泵浦二级放大结构,亚纳秒激光的脉冲宽度约为 496.4 ps,脉冲能量达到 561 mJ@1 064 nm, 330 mJ@532 nm, 能量稳定性为 2%。对放大后的激光光斑均匀性进行了研究,放大后光斑均匀度达到 80%。高脉冲能量,波长可切换亚纳秒 MOPA 激光系统是一个有前途的激光器,可用于激光医疗美容应用。

参考文献:

- [1] Kilmer J, Iadevaia A, Yin Y. Laser sources for lidar applications[C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8379: 837912.
- [2] Wang Feiyue, Zou Tingting, Xin Wei, et al. Control of the wettability of graphene oxide surface with femtosecond laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201064. (in Chinese)
- [3] Anderson R R, Parrish J A. Selective photothermolysis: Precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation [J]. *Science*, 1983, 220(4596): 524-527.
- [4] Du Xinbiao, Chen Meng, Ren Junjie, et al. Research on 1 kHz high-power sub-nanosecond solid-state laser amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0305001. (in Chinese)
- [5] Duan Jialin, Li Xudong, Wu Wentao, et al. Research on LD pumped 1.06 μm burst-mode laser and the amplification systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0105003. (in Chinese)
- [6] Wang Chao, Wei Hui, Wang Jiangfeng, et al. 1 J, 1 Hz lamp-pumped high-gain Nd: Phosphate glass laser amplifier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(1): 011401.
- [7] Liu Jing, Li Lei, Shi Xiangchun, et al. High-beam-quality, 5.4 J, 5-Hz diode-pumped Nd: YAG active mirror laser amplifier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(12): 121402.
- [8] Yahia Vincent, Taira Takunori. High brightness energetic pulses delivered by compact microchip-MOPA system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8609-8618.
- [9] Zhou Yiping, Li Xudong, Wu Wentao, et al. 500 Hz, 47.1 mJ, sub-nanosecond MOPA laser system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106592.
- [10] Lan Xinju. Laser Technology[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [11] Koechner W. Solid State Laser Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [12] Liu Tianyu. Engineering research on the application of soft-edge aperture in high-power solid-state lasers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)