

高功率声光调 Q 主振荡功率放大器

王 彬¹, 孙洪涛², 于永吉¹, 张 健¹, 金光勇¹

(1. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022;

2. 吉林省农安县医院, 吉林 长春 130200)

摘 要: 为了实现在高重复频率调 Q 的同时, 又有好的光束质量。实验设计了激光二极管抽运的高重复频率、高功率的主功率放大(MOPA)结构激光器, 激光器采用声-光调 Q, 主振荡功率放大+二级放大的结构。优化了主功率放大(MOPA)激光器的结构和相关参数, 完成了关于高功率高重复主功率放大(MOPA)结构激光器的实验研究, 并且通过合理排列光学元件在谐振腔中的位置来实现光束质量的提高, 利用聚焦镜和狭缝来实现激光模式的匹配。在重复频率为 50 kHz 时, 实现了最高功率为 51.3 W, 输出脉宽为 18.62 ns, 光束质量为 $M_x^2=1.882$ 、 $M_y^2=1.971$ 的激光输出, 光-光转换效率为 23.75%。在增益导引的作用下, 主振荡功率放大(MOPA)激光器的输出光光束质量得到了有效的提高。

关键词: 光束质量; 主振荡器; 激光; Nd:YVO₄ 晶体

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1205003

High power acousto-optic Q-switched master oscillator power amplifier

Wang Bin¹, Sun Hongtao², Yu Yongji¹, Zhang Jian¹, Jin Guangyong¹

(1. Faculty of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Nongan County People's Hospital of Jilin Province, Changchun 130200, China)

Abstract: In order to realize the high repetition rate operation in Q-switching with good beam quality. A diode-pumped acousto-optic (AO) Q-switched master oscillator power amplifier (MOPA) all-solid-state laser with high repetition rate and high power was demonstrated by using a master oscillator power amplifier with two-pass amplification configuration. The structure and relevant parameters of the master oscillator power amplifier (MOPA) were optimized, the research of the high power MOPA system was completed. Through arranging the optical components in the resonator reasonably to improve beam quality, the focusing lens and aperture were used to achieve the laser mode matching. The maximum average power of the MOPA system is 51.3 W. Short pulses of 18.62 ns with beam quality $M_x^2=1.882$, $M_y^2=1.971$ at 50 kHz. And the corresponding total optical-to-optical efficiency is 23.75%. With the help of gain guiding effect, the quality of the beam which emitted from master oscillator power amplifier (MOPA) laser system can be improved.

Key words: beam quality; master oscillator; lasers; Nd:YVO₄ crystal

收稿日期: 2015-04-20; 修订日期: 2016-05-18

基金项目: 长春市科技局国际合作项目(20130523001HJ)

作者简介: 王彬(1989-), 男, 硕士, 主要从事固体激光器等方面的研究。Email: 739036317@qq.com

0 引言

1 064 nm 激光器在信号传输、测试和光纤激光器种子源等领域有着广泛的应用, 这些应用均要求 1 064 nm 半导体激光器能实现单模大功率输出^[1-3]。目前, 在高功率激光器中, 随着泵浦功率的提高, 激光晶体受热不均匀导致了热透镜和热断裂, 端面受热会引起端面损伤和镀膜损坏, 进而影响了输出功率和光束质量^[4-5]。在 MOPA 系统中, 主振荡器决定了输出激光的波长、脉宽、重复频率等性能, 因而对整个 MOPA 系统的输出光束特性有很大的决定作用^[6-11]。端面泵浦是一种常见的有利于输出高光束质量、高功率的结构, 然而, 通常在端面泵浦的二极管结构很难通过声光 Q 开关实现高重复频率, 只有通过高的掺杂粒子浓度晶体获得高的增益, 但是高的泵浦强度将会导致晶体的热断裂。2003 年, Garc'ia-L'opez 等, 报道一台声光(AO)调 Q、采用板条 Nd:YVO₄ 晶体、激光掠入射几何腔的激光器, 重复频率为 500 kHz, 平均输出功率达到 16.4 W, 脉宽为 30 ns^[12]。2005 年, Minassian 等设计了一台声光调 Q、二极管泵浦板条 Nd:GdVO₄ 晶体 MOPA 结构激光器, 重复频率为 400 kHz, 输出功率达到 101 W, 脉宽为 20 ns^[13-14]。在 2006 年, Omatsu 等人设计了一台泵浦掺钕钒钇晶体激光器, 在重复频率为 650 kHz 时, 输出脉宽为 40 ns, 输出平均功率为 17 W^[15]。上面提到的所有方法, 尽管在 MOPA 结构激光器中使用了各种的补偿方法, 在 MOPA 系统中由于一些不利的因素导致激光通过放大级之后光束质量变差。例如, 泵浦的不均匀性, 增益介质掺杂粒子分布不均, 增益饱和, 衍射效应, 晶体的热透镜效应等^[16]。文中设计了一个高光束质量, 短脉冲的二级放大 MOPA 结构激光器, 其主振荡和放大级都采用键合 Nd:YVO₄ 晶体, 采用 54 W 二极管光纤耦合泵浦, 主振荡级输出功率为 27.06 W, 脉宽为 16.39 ns, 光束质量 $M_x^2=1.236, M_y^2=1.208$, 重复频率为 50 kHz, 经过放大级之后, 最高得到了 51.3 W 输出功率, 光光转换效率为 23.75%, 在这个条件下, MOPA 系统光束质量得到提高。

1 实验

1.1 主振荡级

图 1 为主振荡级的结构示意图。主振荡级和二

级放大结构都采用平-平腔结构, 主振荡级采用对称的两端面泵浦双棒串接模式, 抽运源为德国 DILAS 公司生产的两个高功率光纤耦合输出的半导体激光器, 光纤端面直径为 400 μm, 数值孔径 NA 为 0.22, 最高输出功率为 100 W, 输出激光的中心波长为 808 nm。信号光从振荡器的 1:2 输出耦合镜出射后首先经过一组 45°镜后到注入键合 Nd:YVO₄ 激光晶体, 然后经过调 Q 晶体, 注入第二块键合 Nd:YVO₄ 激光晶体。采用 45°、1 064 nm 全反镜用来改变信号光的光轴, 使其能与后面放大级连接。实验中选用键合 Nd:YVO₄ 晶体作为放大的增益介质, 尺寸为 3 mm×3 mm×(16+4) mm³, a 轴切割, 键合 Nd:YVO₄ 晶体端面镀有 808 nm 和 1 064 nm 双色增透膜, 并且为了进一步缓解热效应, 实验中将键合 Nd:YVO₄ 用 2 mm 厚度的铝箔包裹至于紫铜热沉内进行循环水冷却, 晶体水温控制在 18 ℃。声光调 Q 晶体采用的是英国古奇公司的型号为 QS041-10G-SO3 的调 Q 晶体。M1、M2 为谐振腔腔镜, 其中 M1 为对 1 064 nm 具有 48% 透射率的输出镜, M2 对 1 064 nm 的激光高反($R>99%$), 对 808 nm 的抽运光高透($T>95%$) 双色镜采用 45°镀膜, 对 808 nm 高透, 对 1 064 nm 全反。并且在谐振腔内加入一个狭缝, 狭缝宽度为 1 mm, 加入狭缝的作用是抑制高阶模振荡。狭缝距离 M1 (M2) 的距离为 20 mm。主振荡级的腔长为 130 mm。

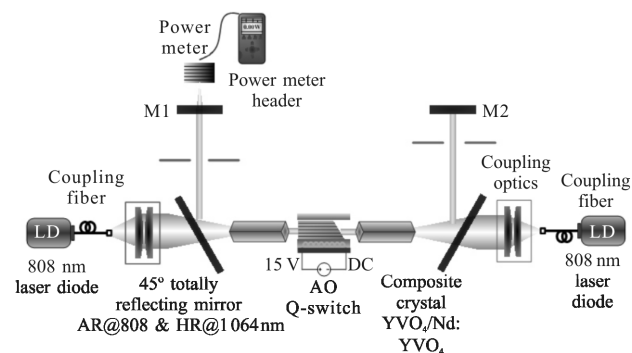


图 1 本振荡级光路图

Fig.1 Schematic layout of the master oscillator

1.2 功率放大器

放大器的泵浦模块与本振荡级的完全相同, 同样采用德国 DILAS 生产的高功率光纤耦合输出的半导体激光器。功率放大级结构如图 2 所示, 利用聚焦镜聚焦作用来实现激光模式的匹配, 通过合理配置两个放大级之间的距离, 使前一个放大器的透镜的

热透镜聚焦可以将光斑以合适的尺寸镜像到下一个增益介质上。实验中,将聚焦镜 f1 在主振荡级和放大级之间来控制两级间的距离和光的方向。聚焦镜 f2 放在第一放大级和第二放大级之间。聚焦镜 f1 的焦距为 60 mm, 聚焦镜 f2 的焦距为 65 mm。

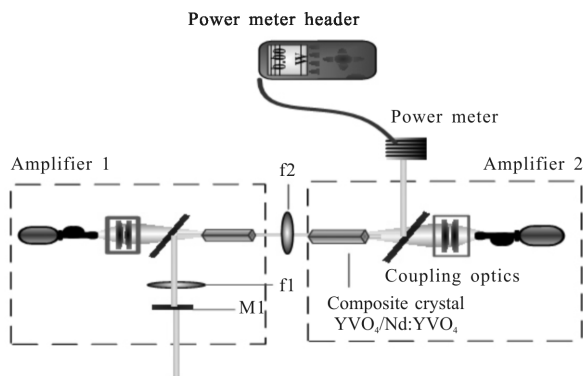


图 2 二级放大结构示意图

Fig.2 Schematic layout of the two-pass amplification

2 实验结果与分析

实验中,在重复频率为 50 kHz 时测量了主振荡级的输出功率,此时输出最高平均功率为 27.06 W,光束质量为 $M_x^2=1.236, M_y^2=1.208$,脉冲宽度为 16.39 ns,此时总的抽运功率为 108 W。可以从图 3 和图 4 观察到分别在 M1 和 M2 前加入狭缝,光束质量有所提高。采用英国 Spiricon 公司 Pyrocam-III 测试在没有狭缝时的光束质量,此时 M2 测量为 $M_x^2=1.882, M_y^2=1.867$ 。

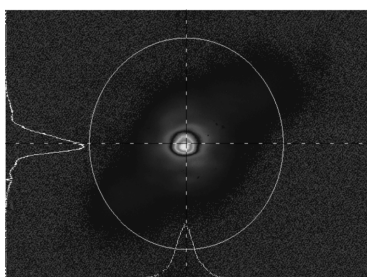


图 3 不加狭缝时光斑强度分布图

Fig.3 Intensity distribution of laser beam without aperture

这可能是由于双棒结构采用了两块增益介质,两块介质由于声场及切割等原因,其物理及光学性

质不可能完全相同,并且两块增益介质的控温及对应的 LD 泵浦曲线也不是完全一致,单 Nd:YVO₄ 晶体也存在各向异性其水平(a-轴)和竖直(c-轴)两个方向的导热率均不相同,所有的这些原因可能导致激光输出的模式存在有高阶模结构,高阶模的存在导致了激光介质中激光模式尺寸的增加,也会降低激光器所能运转的最高重复频率。而由于加入了一个限模的孔径光阑,对高阶横模引入了较大的损耗,高阶模会被抑制掉,测得的光束质量有所提高。

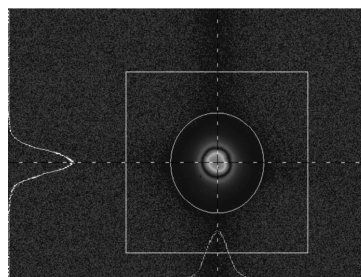


图 4 加狭缝时光斑强度分布图

Fig.4 Intensity distribution of laser beam with aperture

如图 5 所示,经过一级放大最高的输出功率为 39.5 W,此时的光束质量为 $M_x^2=2.782, M_y^2=2.617$,脉冲宽度为 19.1 ns。而伴随着抽运功率的增大,激光晶体中的泵浦密度逐渐增大,因此,放大后的激光功率逐级增大。此时一级放大的斜率效率为 19.27%,二级放大的斜率效率为 25.20%。如图 6 所示,在重复频率为 50 kHz 时,经过两级放大的光束质量图,此时最高的输出功率为 51.3 W,光束质量为 $M_x^2=1.882, M_y^2=1.971$,脉冲宽度为 18.62 ns,总的泵浦功率为 216 W。

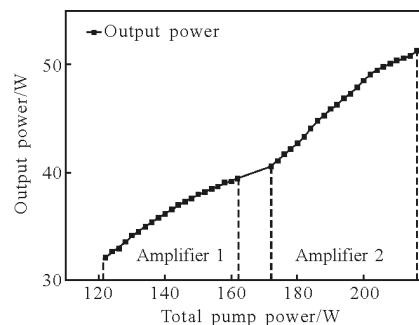


图 5 在 MOPA 系统中输入激光功率与输出功率的关系图

Fig.5 Relationship between input power and output power in MOPA system

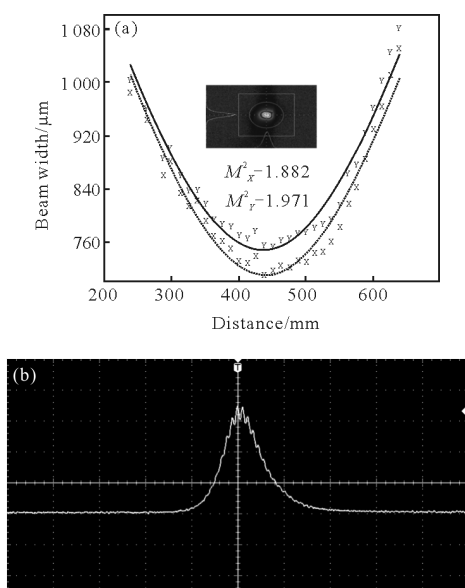


图 6 MOPA 系统光束质量图和脉冲宽度图

Fig.6 Beam quality graph and the pulse width of MOPA system

如图 7 和图 8 所示,在通过二级放大之后可以得到以下结果:其中系统中的高光束质量振荡器光称作信号光。信号光经过一级放大过程中光束质量不断恶

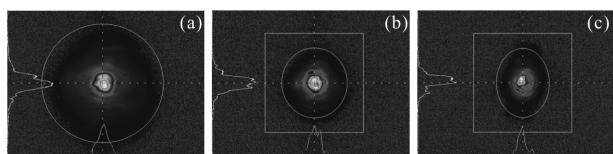


图 7 一级放大光斑强度分布图

Fig.7 Intensity distribution of laser beam after first amplifiers

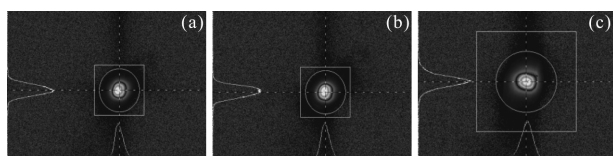


图 8 二级放大光斑强度分布图

Fig.8 Intensity distribution of laser beam after second amplifiers

化,这是由于放大器增益介质在泵浦时产生的热效应及非均匀泵浦和增益饱和效应等,导致光束在放大过程中不断畸变,最后光束质量不断恶化。在激光放大的过程中,当一个模放大后,就会使其他模的增益降低,因而阻止了其它模的放大。优势模式的入射会引起反转粒子密度的下降,而反转粒子数密度的下降又导致弱势模式增益系数的下降。所以,优势模式不仅使自身的增益系数下降,也使其他弱势模式的增益也以同等程度下降,表现在输出光上为优势模式比弱势

模式所占比重越来越大。如果只考虑增益且低阶模式首先被放大,那么被放大的输出激光将优于输入激光,即可以通过增益来改善激光光束质量。所以,经过二级放大,输出的激光的光束质量会随着二级放大的泵浦光功率的提高而有所改善。

3 结论

文中设计了一个高功率、短脉冲、高光束质量 MOPA 结构激光器,采用了二级放大的结构对于功率有明显的提高。MOPA 系统中最高输出功率为 51.3 W、脉冲宽度为 18.62 ns、光束质量为 $M_x^2=1.882$, $M_y^2=1.971$ 。光光转化效率为 23.75%。可以得出:在 MOPA 系统中,光束质量的提高可以通过增益引导效应的作用来实现,而这对于高功率和高光束质量 MOPA 结构激光器的设计具有非常重要的价值。

参考文献:

- [1] Wang De, Li Xueqian. Latest Development and application of semiconductor lasers [J]. *Opt Precision En*, 2001, 9(3): 279-284. (in Chinese)
王德, 李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状 [J]. *光学精密工程*, 2001, 9(3): 279-284.
- [2] Koechner W. Solid State Laser Engineering [M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [3] Shi Peng, Chen Wen, Li Long, et al. Influence of laser distribution on thermal effect of Nd:YVO₄ crystal [J]. *Opt Precision En*, 2008, 16(2): 197-201. (in Chinese)
史彭, 陈文, 李隆, 等. 激光分布对抽运 Nd:YVO₄ 晶体热效应的影响 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 197-201.
- [4] Zheng Jia'an, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, et al. Thermal effect study on LD end pumped Nd:YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(12): 1121-1126.
- [5] Yang Yongming, Wen Jianguo, Wang Shiyu, et al. The thermal lens focus of the end-pumped Nd:YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1769-1772.
- [6] Li Long, Dong Wuwei, Shi Peng, et al. Thermal effect of diode bar side-pumped Nd:YAG slab [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(11): 2120-2126. (in Chinese)
李隆, 董武威, 史彭, 等. 激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条的热效应 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2120-2126.
- [7] Jedrzejczyk D, Brox O, Bugge F, et al. High power distributed feedback tapered master oscillator power

- amplifiers emitting at 1 064 nm [C]//SPIE, 2010, 7583: 758317.
- [8] Jim J Chang, Emie P Dragon, Isaac L Bass. 315 W pulsed-green generation with a diode-pumped Nd:YAG laser [C]//CL EO'98, 1998, CPD2: 2-4.
- [9] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Domestic high-power semiconductor laser research and application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 189-194. (in Chinese)
马晓宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 189-194.
- [10] Liu Guojun, Bo Baoxue, Qu Yi, et al. High power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 4-6. (in Chinese)
刘国军, 薄报学, 曲轶, 等. 高功率半导体激光器技术发展与研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 4-6.
- [11] Hirano Y, Pavel N, Yamamoto S, et al. 100 W class diode-pumped Nd:YAG MOPA system with a double-stage relay-optics scheme [J]. *Optics Communications*, 1999, 170(6): 275-280.
- [12] Garc'a-L'opez J H, Aboites V, Kir'anov A V, et al. High repetition rate Q-switching of high power Nd:YVO₄ slab laser[J]. *Opt Commun*, 2003, 218: 155-160.
- [13] Minassian A, Thompson B A, Smith G R, et al. 104 W diode-pumped TEM₀₀ Nd:GdVO₄ master oscillator power amplifier[C]//Advanced Solid-State Photonics, 2005.
- [14] Minassian A, Smith G, Hompson T, et al. Ultrahigh repetition rate Q-switched 101W TEM₀₀ Nd:GdVO₄ laser system[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Europe-Technical Digest, 2015: 1567802.
- [15] Omatsu T, Okida M, Minassian A, et al. High repetition rate Q-switching performance in transversely diode-pumped Nd doped mixed gadolinium yttrium vanadate bounce laser [J]. *Opt Express*, 2006, 14: 2727-2734.
- [16] Dong Xiaolin, Xiao Hu, Xu Shanhu, et al. 122-W high-power single-frequency MOPA fiber laser in all-fiber format [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 911: 94-96.