

用于355 nm 紫外光源的腔外倍频全固态激光器

耿爱丛^{1,2*}, 赵慈¹, 李宝河¹, 徐登辉¹, 李熊¹

(1. 北京工商大学 机械工程学院, 北京 100048; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘要:为保证高输出功率前提下获得高光束质量的1064和532 nm激光共向输出, 实验中, 首先采用主振荡功率放大器系统有效地控制基频光束质量, 获得平均功率为70 W、重复频率为10 kHz、脉宽为60 ns和光束质量因子 M^2 约为3.9的1064 nm基频激光; 接着利用二级放大器, 获得平均功率为182.9 W、脉宽为80 ns的1064 nm激光。然后, 采用KTP晶体腔外倍频技术保证了基频和倍频激光同时、共向输出, 最终获得了平均功率为65.7 W、脉宽约为60 ns的532 nm绿光, 相应的倍频效率为35.9%。通过有效措施, 绿光的光束质量因子 M^2 约控制在6, 为开展355 nm紫外激光研究奠定了良好的基础。

关键词:激光器; 腔外倍频; 光束质量; 355 nm

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A 文章编号: 1005 0086(2011)02-0185-04

All solid state extracavity double frequency laser for 355 nm UV source

GENG Ai cong^{1,2*}, ZHAO Ci¹, LI Baoh he¹, XU Deng hui¹, LI Xiong¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The purpose of this study is to ensure high output power and high beam quality of 1064 nm and 532 nm laser collinear output. Firstly, the beam quality of 1064 nm laser fundamental frequency was effectively controlled by using a master oscillator and power amplifier (MOPA), to achieve maximum average power of 70 W, repetition rate of 10 kHz, pulse width of 60 ns, and beam quality factor or M^2 of 3.9. Then using two power amplifiers, a 1064 nm beam with average output power of 182.9 W and pulse width of 80 ns was generated. Finally, by extra cavity double frequency generation with a KTP crystal, which ensures that fundamental laser and double frequency laser are isochronous and collinear, a green laser at 532 nm with average power of 65.7 W and pulse width of about 60 ns was obtained. The corresponding frequency-doubling efficiency is 35.9%, and green beam quality M^2 is controlled at 6.

Key words: laser; extra cavity double frequency; beam quality; 355 nm

1 引言

高功率紫外全固态激光器是近年全固态激光器技术发展的一个重大方向, 355 nm紫外高功率激光可通过非线性光学晶体对Nd: YAG激光(1064 nm)三倍频来获取^[1~6], 因此需要首先获得满足要求的532 nm激光光源。目前, 运用腔内倍频方法获得全固态532 nm激光的技术已经较为成熟^[7~15], 绿光平均功率最高为315 W(采用KTP和LBO腔内倍频)^[8]。但是, 实现三倍频技术需要532与1064 nm激光同时、共向输出, 并且要求两激光功率配比合适, 高功率腔外倍频全固态绿光激光器可容易实现这些条件^[16,17]。

与腔内倍频方式相比, 腔外倍频在获得倍频光的同时, 可以在同一方向上同时获得基频光输出, 无需改变基频激光腔的参数、也无需借助其它光学元件即可直接实现, 不会影响基频光的入射功率; 并且功率配比的调节方式灵活, 可以通过设计聚焦透镜参数、调节倍频晶体位置以及调节倍频晶体温度等多种方式实现, 操作独立、简单, 不会对基频光谐振腔产生任何影响。可见, 腔外倍频激光器具有明显优势, 更适合用作三倍频的泵浦源。由于基频功率密度不高, 腔外倍频效率相对较低, 选择有效非线性系数较高、损伤阈值又较低的KTP晶体^[18,19], 正好适合用于高功率腔外倍频。本文首先开展了主振荡级与

* E mail: aicong_77@126.com

收稿日期: 2010 02 15 修订日期: 2010 08 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61007021); 北京市教委科技发展计划资助项目(KM200910011010), 中国博士后科学基金资助项目

(20080430563); 北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR20107122)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

功率放大器(MOPA)系统的实验研究,通过MOPA系统控制基频光束质量,得到了高功率、高光束质量的基频,输出1064 nm激光平均功率为182.9 W,脉宽约为80 ns,重复频率为10 kHz。然后通过KTP晶体腔外倍频,最终获得了平均功率为65.7 W、脉宽约为60 ns和光束质量因子 M^2 仅为6的准连续532 nm绿光,相应的倍频效率为35.9%,为开展三倍频研究奠定了良好的实验基础。

2 实验装置

MOPA主要包括两部分:首先主振荡器产生具有高光束质量的种子光源,输出功率可大可小,因而输出光较易做到所需的时域、频域特性和保持良好的光束质量;然后经过一级或多级功率放大器,实现对种子光源的高功率放大。因此,MOPA系统在保证输出光高光束质量的同时又实现了高功率、高能量输出,即它结合了低功率种子源的良好脉冲、良好光束质量特性和功率放大器的高功率放大特性的优点^[2],因此有利于提高二次倍频激光的输出功率以及倍频效率。

图1给出了MOPA腔外倍频光路示意图,其包括1个主振荡器和两级放大器。主振荡器采用双棒串接热近非稳腔,两个完全一样的激光棒串接,中间加90°旋光片补偿热致双折射效应,声光Q开关对激光进行调制, M₁、M₂为主振荡器的谐振腔镜, M₃为1064 nm全反镜, M₄为透过率为30%的1064 nm输出耦合镜。热近非稳腔是指考虑激光棒的热透镜效应,通过合理设计腔结构使得激光器工作在热稳定区域的边缘,此时可在激光介质位置处获得大的基模体积的谐振腔。热近非稳腔充分利用了激光介质的自限模作用,同时又可以使得激光二极管(LD)泵浦功率加到最大,因而在保证激光输出功率的前提下,简单有效地提高了激光光束质量,具有其独特的优点。两个激光棒各采用LD阵列侧面泵浦结构,每个激光棒用9个LD列阵从三围对称泵浦,每个LD列阵最大输出功率为20 W; Nd:YAG晶体长为64 mm,直径为3 mm,掺杂浓度为0.6%;声光Q开关中心频率为27.12 MHz,重复频率1~50 kHz连续可调。主振荡器输出10 kHz的准连续基频光,通过M₃和M₄两块45°反射镜入射到放大器,保证激光器总体尺寸小巧并方便应用。两级放大器中,每个激光棒用30个LD列阵,分别从五围对称侧面泵浦Nd:YAG圆棒,Nd:YAG晶体直径为4 mm,长为120 mm和掺杂浓度为0.6%。两级放大器中间,同样加90°旋光片补偿热致双折射效应。

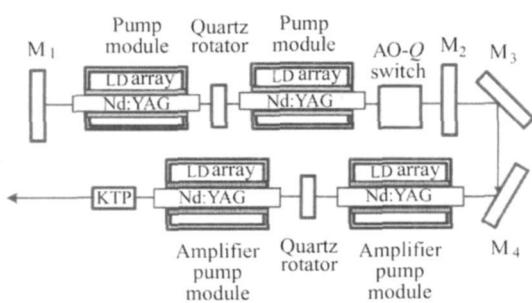


图1 MOPA系统KTP腔外倍频实验装置

Fig.1 Experimental setup of MOPA+KTP extracavity double frequency system

主振荡器为对称平-平腔结构,因此光腰位于腔镜上,即主振荡器输出为发散光。第1级放大器中心与主振荡器腔镜的距离,等于放大级激光棒加到最大泵浦功率下的热焦距长度,两级放大器采用 $\frac{1}{2}$ 系统,即KTP晶体放置在二级放大器形成的热焦点上。另外,双棒串接加90°旋光片方法补偿热致双折射时需努力做到让光束横截面中每一点近似经过两个晶体的相同位置,这不但要求激光器左右对称,并要求两个激光棒一致,包括激光棒的结构、实验时的水冷量和激励电流等。实验中,MOPA系统主振荡器的两个激光棒完全一致,两个放大器的激光棒也完全一致,从而保证了热致双折射效应的有效补偿。该MOPA系统最大的优点是充分利用了激光棒的热透镜效应,而不必添加辅助匹配透镜,系统简单,易于调节,又有效地减少了透镜的透射损耗。

3 实验结果及分析

激光晶体的热透镜效应和热致双折射效应对谐振腔的稳定性、输出功率和光束质量有较大的影响,是激光腔型设计中必须考虑的问题。实验中,首先测定了LD不同泵浦功率时Nd:YAG晶体棒的热透镜焦距。然后,利用ABCD定律及高斯光束在腔内的自再现条件,充分考虑热透镜效应前提下对主振荡器的腔结构参数进行优化,使得腔内激光在Nd:YAG上具有最大的模体积,这极有利于抑制高阶模起振,提高激光光束质量,并且在LD最大泵浦功率时激光器工作在热稳区边缘。此时,双棒串接对称平-平腔中,输出镜到激光棒端面的距离为220 mm。接着,将90°石英旋光片置于两个串接的Nd:YAG晶体间,用以补偿热致双折射效应,使得两个偏振方向的热稳区重叠,从而提高输出功率和光束质量。最终,在LD最大泵浦功率时,主振荡器输出基频平均功率为70 W,重复频率为10 kHz,脉宽为60 ns,而光束质量因子 M^2 约被控制为3.9。此时,若增加激光腔长或采用光阑限模,可进一步改善光束质量,但激光输出功率会降低。因此,利用热近非稳腔的合理设计,在没有采用光阑限模、激光功率不损失的情况下,同时获得了最大功率输出和好的光束质量。

根据Nd:YAG晶体的热透镜焦距测定结果,一级放大器激光棒端面到主振荡器输出镜的距离设计为400 mm,两放大器激光棒端面相距340 mm,二级放大器端面到倍频晶体中心的距离为170 mm。在图2中,显示了主振荡器输出基频功率、经过一级和二级放大后的基频功率、倍频绿光输出功率随主振荡器泵浦功率的变化曲线。经过一级放大器后,基频被放大到107.5 W,提取效率为(107.5-70)/150=25%,其中150 W为放大器短腔功率;经过二级放大器后,基频被放大到182.9 W,脉宽约为80 ns,提取效率为(182.9-107.5)/150=50.3%。

进行腔外倍频实验时,首先将两级放大器的LD泵浦功率加到最大,然后再逐渐增加主振荡器的泵浦功率,这样操作能够保证腔外的光腰位置始终在倍频晶体中心,防止聚焦点扫过倍频晶体端面引起损伤。倍频晶体为II类临界相位匹配的KTP晶体,尺寸为8 mm×8 mm×15 mm,切割角度为θ=90°、ψ=25.3°。此时,匹配温度为100°C,有效非线性系数为3.3 pm/V,允许角度为10.55 mrad·cm,允许温度为26.26 K·cm。通过合理仿真高斯光束传输模式,确定KTP晶体的最佳

位置。KTP晶体被放置在自行研制的高精度控温晶体炉中,由于KTP晶体吸收基频光能量,会引起晶体内温度的升高。采用高的匹配温度可以在不影响倍频效率前提下有效降低晶体炉的冷却负担,适于高功率倍频;精确的温度控制可以让晶体处于最佳工作温度,提高了倍频效率,也能达到输出功率稳定的效果。最终,在实验中获得平均功率为65.7 W的倍频绿光,相应的倍频效率达到35.9%。重复频率为10 kHz时绿光脉宽约为60 ns,脉冲波形如图3所示,此时对应的峰值功率为 1.1×10^5 W。倍频激光的光束质量因子 M^2 约控制在6,远场光斑的二维及三维图形如图4所示。因为实验中的KTP晶体采用II类临界相位匹配($1064.0(e) + 1064.0(o) = 532.0(e)$),虽然此时有效非线性系数较大,但是由于非寻常光(e光)存在走离效应,使得3个光波的能流方向在空间中相互分开,因此观察到的倍频光输出光斑呈现长条状。

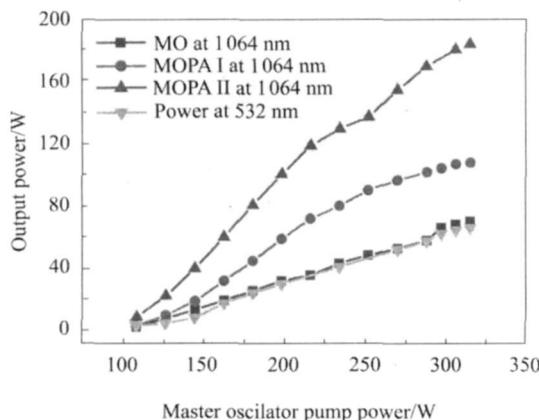


图2 MOPA系统 KTP腔外倍频输出功率曲线

Fig. 2 Output power versus pump power of
MOPA+ KTP extracavity double frequency system

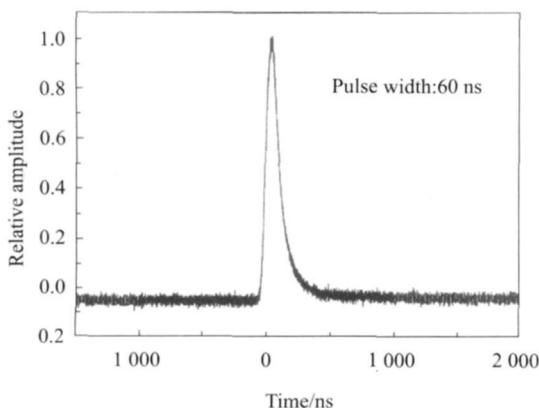
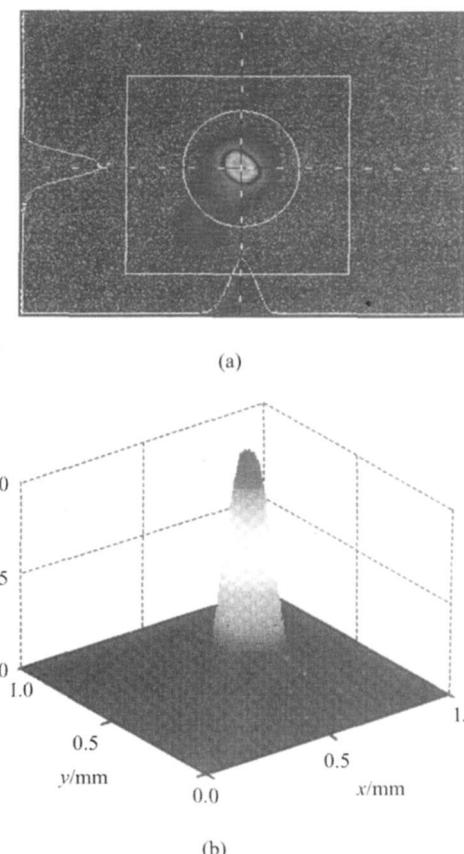


图3 输出功率为 65.7 W 时
准连续 532 nm 绿光脉冲波形

Fig. 3 Oscilloscope pulse shape for
532 nm laser at 65.7 W output power

与文献[5]中17.7 W的紫外光源应用的48 W泵浦绿激光对比,本文得到的绿激光输出功率提高了1.3倍,预期可获得

高于23 W的355 nm紫外光。但同时也必须注意到,根据 $h\nu_{1064\text{ nm}} + h\nu_{532\text{ nm}} = h\nu_{355\text{ nm}}$,其中 h 为普朗克常量,波长为1064 nm的光子和波长为532 nm的光子生成波长为355 nm的光子,为了提高三倍频效率,要求1064 nm激光与532 nm激光的功率最佳比值为1:2。所以,该激光器还需通过恰当手段进一步提高倍频效率,例如借助聚焦透镜的合理设计、产生最佳聚焦光束,使得该系统更加适合开展三倍频实验研究,这是下一步需要开展的工作。



4 输出功率为 65.7 W 时绿光的(a)二维和(b)三维远场光斑

Fig. 4 (a) 2 D and (b) 3 D laser beam
profiles at 65.7 W green output power

4 结论

结合MOPA系统和腔外倍频技术,有效地控制了倍频绿光的光束质量,并保证了激光输出功率。利用尺寸为8 mm×8 mm×15 mm的KTP晶体腔外倍频,最终获得1064和532 nm激光的同时、共向输出,其中基频激光平均功率为117.2 W,倍频绿光平均功率为65.7 W。由于采用腔外倍频,绿光光束质量好, M^2 值约为6,应用此光源可期望获得输出功率比17.7 W更高的355 nm紫外激光光源。

参考文献

- [1] Hodgson N, Dudley D, Gruber L, et al. Diode end-pumped, TEM_{00} Nd: YVO₄ laser with output power greater than 12 W at 355 nm [A]. CLEO'2001[C], 2001, 389-390.

- [2] Konno S, Kojima T, Fujikawa S, et al. High average-power, high repetition, diode-pumped third harmonic Nd: YAG laser [A]. Technical Digest of CLEO' 2001[C]. 2001, 391.
- [3] FENG Yan, BI Yong, ZHANG Hong-bo, et al. 3 W diode pumped Nd: YAG 355 nm laser[J]. Chinese Journal of Laser, 2002, 29(8): 766-766.
冯衍, 毕勇, 张鸿博, 等. 3 W 全固态 355 nm 激光器[J]. 中国激光, 2002, 29(8): 766-766.
- [4] XU Zuyan, High average power up to 17.7 W third harmonic generation at 355 nm with CsB₃O₅ crystal[J]. China Basic Science, 2005, 3: 6-6.
许祖彦. CBO晶体三倍频紫外激光(355 nm)输出功率达到 17.7 W[J]. 中国基础科学, 2005, 3: 6-6.
- [5] WU Yi-cheng, CHANG Feng, FU Pei-zhen, et al. High-average-power third harmonic generation at 355 nm with CsB₃O₅ crystal[J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(6): 1426-1428.
- [6] LI Bin, CUI Hai-xia, DING Xin, et al. High efficiency, compact UV 355 nm laser[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(9): 1283-1286.
李斌, 崔海霞, 丁欣, 等. 高效率紧凑紫外 355 nm 激光器[J]. 光电子·激光, 2010, 21(9): 1283-1286.
- [7] GAO Li-yan, XU Zheng, SUN Qin-jun. Study on diode-pumped Nd:GdVO₄/KTP doubly Q-switched green laser[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009, 20(7): 874-876.
高利岩, 徐征, 孙钦军. LD泵浦 Nd:GdVO₄/KTP 双调 Q 绿光激光器实验研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(7): 874-876.
- [8] Chang J J, Dragon E P, Bass I L. 315W pulsed green generation with a diode-pumped Nd: YAG laser[A]. In: Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics[C]. 1998, CPD2: 2-4.
- [9] GENG Ai-cong, BO Yong, BI Yong, et al. High beam quality green generation with output 140 W based on a thermally near-unstable flat flat resonator[J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(1): 125-127.
耿爱丛, 薄勇, 毕勇, 等. 基于热近非稳平平谐振腔的 140 W 高光束质量绿光激光器[J]. 中国物理快报, 2005, 22(1): 125-127.
- [10] GENG Ai-cong, BO Yong, BI Yong, et al. One hundred and twenty one W green laser generation from a diode side-pumped Nd: YAG laser by use of a dual-V-shaped configuration [J]. Optics and Laser in Engineering, 2006, 44(6): 589-596.
- [11] GENG Ai-cong, ZHANG Hong-bo, WANG Gui-ling, et al. Practical all-solid-state 266 nm laser[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(7): 767-769.
耿爱丛, 张鸿博, 王桂玲, 等. 实用化全固态 266 nm 激光器的研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(7): 767-769.
- [12] YUAN Li-gang, JIANG Dong-sheng, WANG Jian-jun, et al. Green solid-state laser with 230 W output power[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 980-983.
苑利钢, 姜东升, 王建军, 等. 输出功率达 230W 的绿光固体激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 980-983.
- [13] Chen H W, Chen X Y, Li X, et al. High average power Q switched green beam generation by intracavity frequency doubling of diode side-pumped Nd: YAG/HGTR KTP laser[J]. Optics and Laser Technology, 2009, 41(1): 1-4.
- [14] Zhuang F J, Zheng Y Q, Huang C H, et al. Efficient and compact intracavity-frequency-doubled YVO₄/Nd: YVO₄/KTP laser through analysis of the interaction length[J]. Optics Communications, 2010, 283(17): 3324-3327.
- [15] Qiu G, Huang H T, Zhang B T, et al. Highly efficient intracavity frequency doubling 532-nm laser based on the gray tracking resistance KTP crystal[J]. Laser Physics, 2010, 20(4): 777-780.
- [16] Pierre R J, Mordant D W, Injeyan H, et al. Diode array pumped kilowatt laser[J]. IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., 1997, 3(1): 53-58.
- [17] FENG Yan, BI Yong, ZHANG Hong-bo, et al. 20 W diode pumped external frequency-doubled Nd: YAG green laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 23(4): 469-471.
冯衍, 毕勇, 张鸿博, 等. 20 W 腔外倍频全固态 Nd: YAG 绿光激光器[J]. 光学学报, 2003, 23(4): 469-471.
- [18] Dmitriev V G, Gurzadyan G G, Nikogosyan D N, Handbook of Nonlinear Optical Crystals[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1997. 103-114.
- [19] YAO Jian-quan. Nonlinear Optical frequency conversion technology and laser tunable technology [M]. Beijing: Scientific Press, 1995.
- [20] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. 5th edition. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 28-87, 150-192.

作者简介:

耿爱丛 (1977-), 女, 博士, 主要从事非线性频率变换技术、大功率全固态激光器的研究.