

大能量窄脉宽高平均功率绿光激光器

李欣荣 孙琦

(北方激光科技集团有限公司, 江苏 扬州 225009)

摘要 研制了在大能量窄脉宽情况下实现高平均功率输出的绿光激光系统。利用激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体,采用 RTP 晶体电光调 Q 和主振荡功率放大的功率分摊技术,实现大能量窄脉宽高重复频率 532 nm 绿光激光输出。输出基频光波长 1064 nm,脉冲平均能量 213 mJ,工作频率 100 Hz,光-光转换效率 12%。采用 II 类相位匹配高抗灰迹 KTP 晶体腔外倍频,输出绿光波长 532 nm,脉冲平均能量 127 mJ,工作频率 100 Hz,脉冲宽度 7.2 ns,光束质量 $20\text{mm} \cdot \text{mrad}$,532 nm 插头效率 2.1%。

关键词 激光器;532 nm 绿光;功率分摊;大能量;高平均功率;高抗灰迹 KTP 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.111403

Green Laser with High Energy, Narrow Pulse Width and High Average Power

Li Xinrong Sun Qi

(North Laser Technology Group Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract A green laser system with high average power output is developed with high energy and narrow pulse width. With diode laser pumped Nd:YAG crystal, RTP electro-optic Q-switching and power dividing by master oscillator power amplifying (MOPA), the 532 nm green laser output with high energy, narrow pulse width and high repetition rate is realized. For the fundamental frequency output at 1064 nm, the average pulse energy is 213 mJ, the operating frequency is 100 Hz and the optical-optical conversion efficiency is 12%. While a type II phase matching high gray track resistance KTP crystal is used for extra cavity frequency doubling, an green light output at 532 nm can be obtained, with the average pulse energy of 127 mJ, the operating frequency of 100 Hz, the pulse width of 7.2 ns, the beam quality of $20\text{mm} \cdot \text{mrad}$ and the total wall plug efficiency of 2.1%.

Key words lasers; green beam at 532 nm; power dividing; high energy; high average power; high gray track resistance KTP crystal

OCIS codes 140.3280; 140.3460; 140.3480; 140.3515; 140.3538

1 引言

大能量高平均功率绿光激光器在科学研究、工业加工和军事上,特别是海洋探测方面,都有着广泛的应用。国外在该领域已经有成熟的产品应用报道。2003 年 Kushina 等^[1]报道采用一级振荡、三级放大实现了波长 532 nm,脉冲宽度 10~11 ns,重复频率 350 Hz,输出能量 131 mJ,光束质量因子 $M^2 < 8$,适合于机载环境的绿光激光系统。天津大学、华北光电技术研究所、北京理工大学、西北大学等单位的研究主要集中在准连续输出、腔内倍频、声-光调 Q 高平均功率绿光激光系统,平均输出功率达到百瓦以上^[2~6]。中国工程物理研究院唐淳等^[7]报道了采用一级振荡、一级双通放大和一级单通放大实现单脉冲能量 405 mJ、重复频率 400 Hz 输出的绿光激光装置。

本文介绍一种适合机载使用环境的大能量窄脉冲高平均功率输出绿光激光系统。该系统可实现脉冲平均能量 127 mJ,工作频率 100 Hz,脉冲宽度 7.2 ns 的 532 nm 绿光输出。

收稿日期: 2011-04-22; 收到修改稿日期: 2011-06-17; 网络出版日期: 2011-09-03

作者简介: 李欣荣(1972—),男,高级工程师,主要从事固体激光器件方面的研究。E-mail: li_xinrong@263.net.cn

2 激光器结构

激光器采用激光二极管抽运、RTP 晶体电光调 Q,通过一级振荡,三级功率放大,高抗灰迹(HGTR) KTP 晶体腔外倍频,获得大能量窄脉冲高平均功率绿光输出。其结构如图 1 所示。

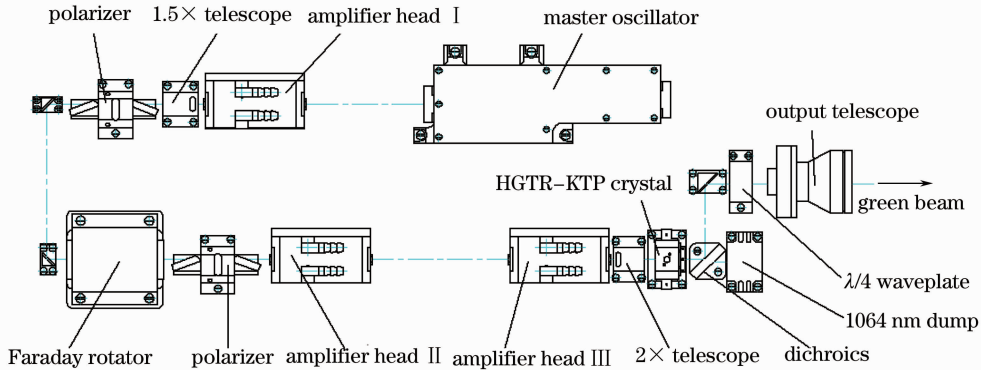


图 1 激光器结构图

Fig. 1 Diagram of the laser structure

振荡级采用两个 15bar 半圆形封装的激光二极管阵列侧面对称抽运 Nd:YAG 棒,激光二极管输出波长为 808 nm,棒尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$,调 Q 开关选用成对安装的热补偿 RTP 晶体开关,采用凹-凸热稳定谐振腔。放大级 I 设计参数同振荡级。放大级 II 和 III 分别采用两个 30bar 半圆形封装的激光二极管阵列侧面抽运 Nd:YAG 棒,棒尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 。放大级 I 和放大级 II 之间放置 1.5 倍扩束望远镜进行口径匹配,同时放置 45° 法拉第旋光隔离器进行激光单通隔离。

为减小入射到倍频晶体的功率密度,1064 nm 激光经过 2 倍扩束望远镜后入射到 II 类相位匹配 HGTR-KTP 晶体,晶体尺寸为 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 。倍频输出的混光通过分光镜把 532 nm 激光分光入射到最终的 3 倍发射望远镜,以保证最终需要的激光发散角输出。剩余的 1064 nm 激光进入吸收池吸收转化成热量散发掉。倍频晶体 HGTR-KTP 被控温到 60°C ,以保证全温度范围可靠工作。在 532 nm 光路中设置 $\lambda/4$ 波片,调节波片可以控制输出绿光的偏振态。

bar 条热沉设计有液体温控通道,所有的 bar 条热沉液体温控通道串联,并通过外部提供的温控液体流动来进行温度控制,以保证激光二极管发射光谱准确对准 Nd:YAG 吸收光谱。激光棒被密封在冷却石英玻璃管道中,通过专门设计的带散热器的小型液体循环冷却系统进行冷却。

整机设计分主机和电器箱两个部件。主机除安装有各种光学元件和小型液体循环冷却系统外,还安装有激光二极管放电电路、调 Q 电路板、取样电路、KTP 温控电路等。电器箱安装有低压电源板、控制板、充电电源等。整机供电电压为 $22 \sim 30 \text{ V}$,消耗电功率 614 W。整机外形尺寸为 $310 \text{ mm} \times 310 \text{ mm} \times 670 \text{ mm}$,重量 43.7 kg。样机如图 2 所示。

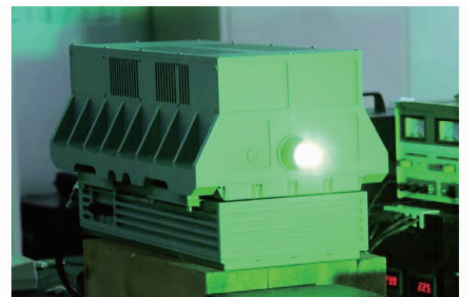


图 2 激光器样机照片

Fig. 2 Picture of laser prototype

3 实验结果

设置工作频率为 100 Hz,调节振荡级和放大级 I bar 条脉冲工作峰值电流至 70 A,振荡级输出 1064 nm 窄脉冲调 Q 激光,平均脉冲能量为 36 mJ。经过放大级 I 以后,输出激光平均脉冲能量为 71 mJ。调节放大级 II 和 III bar 条脉冲工作峰值电流至 70 A,激光经过三级放大以后输出激光脉冲平均能量为 213 mJ,光-光转换效率 12%。通过 HGTR-KTP 晶体腔外倍频,输出绿光波长 532 nm,脉冲平均能量 127 mJ,脉冲宽度 7.2 ns,光束质量 $20 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,532 nm 插头效率 2.1%。测量 532 nm 激光典型脉冲宽度和能量输出曲线分别如图 3 和图 4 所示。

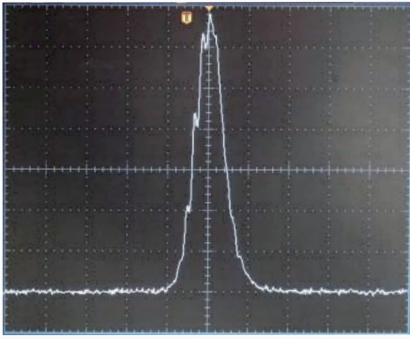


图3 波长 532 nm 典型脉冲宽度
Fig. 3 Typical pulse width at 532 nm

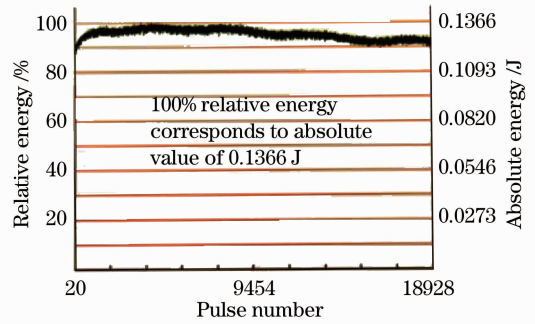


图4 100 Hz 工作激光输出能量测量曲线
Fig. 4 Laser output energy curve at operation frequency of 100 Hz

4 讨 论

4.1 采用功率分摊的设计思想实现高平均功率激光运转

随着激光输出平均功率的提高,如何高效率地散热和降低激光介质激活区内温度差造成的热效应成为激光系统设计主要考虑的因素。特别是对于腔外倍频激光系统,激光输出光束的退偏直接影响到倍频效率。根据激光工作物质的形状、抽运方式、散热条件、注入能量的不同,热效应通常表现为热透镜效应、应力双折射等^[8]。要避免热效应,就要限制激光输出平均功率的增加。如果通过一级振荡、多级放大的形式,使每一级承担合适的激光输出平均功率,多级累加起来就能达到需要的激光输出平均功率,通过功率分摊的设计思想来实现高平均功率激光运转。由于每一级输出平均功率有限,热效应不显著,这样激光系统总的热效应也就不明显,从而保证最终输出激光的光束质量。如本文介绍的激光系统,振荡级输出 3.6 W,放大级 I 输出 3.5 W,放大级 II 和 III 分别输出 7.1 W,最终激光输出平均功率达到 21.3 W。样机仅出现了轻度的热透镜效应,没有发现热退偏。在几乎不需要采用热效应补偿的情况下,可实现高平均功率激光系统稳定运转。

4.2 倍频功率密度的估算

分别按光斑直径 5 mm 和 10 mm 计算入射到 KTP 倍频晶体上的功率密度。考虑最大输入激光脉冲能量 260 mJ、光斑直径 5 mm、激光脉冲宽度 7 ns、峰值与平均值的相对值 2:1,则入射功率密度为 379 MW/cm²;光斑直径为 10 mm 时,如其他参数不变,则入射功率密度为 95 MW/cm²。

从以上计算可知,当光斑直径为 5 mm 时,入射到 KTP 晶体处的功率密度大于 300 MW/cm²,增大了膜层和 KTP 晶体的损伤几率。样机设计时在倍频晶体前面增加 2 倍扩束望远镜,在压缩激光发散角的同时降低入射到倍频晶体的功率密度,实验结果显示 KTP 晶体和膜层没有发现损伤。实验测得倍频效率为 59%。选用以色列 Raicol 公司生产的尺寸为 12 mm×12 mm×7 mm 的 HGTR-KTP 晶体,并且控温在 60 °C,避免了 KTP 倍频晶体红外吸收导致的灰迹效应,减小了相位匹配角的偏离。在样机连续工作 5 min 的情况下,532 nm 激光能量下降小于 10%。图 5 是以色列 Raicol 公司对 HGTR-KTP 晶体测试的结果,显示晶体本身的红外吸收及其在绿光照射下所导致的红外吸收增长即所谓的灰迹效应都大大地低于普通溶盐法和水热法生长的 KTP 晶体。

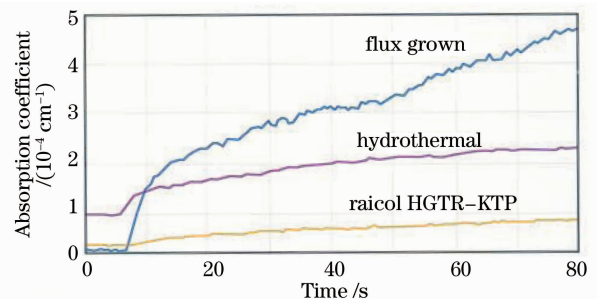


图5 以色列 Raicol 公司对 HGTR-KTP 晶体测试结果
Fig. 5 Testing result by Raicol Ltd. (Israel) for HGTR-KTP crystal

5 结 论

通过功率分摊的技术途径研制了适合机载环境的大能量窄脉冲高平均功率绿光激光器。采用一级振

荡、三级放大实现了激光脉宽 7.2 ns,单脉冲能量大于 100 mJ 情况下平均输出功率为 21.3 W 的绿光输出。下一步将采取热补偿措施进一步提高工作频率,同时开展长时间工作情况下保证激光输出能量稳定性的研究工作。

参 考 文 献

- 1 Mark Kushina, Geoff Heberle, Mike Hope *et al.*. ALMDS laser system[C]. *SPIE*, 2003, **4968**: 163~168
- 2 Jiang Dongsheng, Zhou Shouhuan, Zhao Hong *et al.*. High average power double frequency operation of Nd:YAG rod lasers side pumped by diode arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4): 301~303
姜东升,周寿桓,赵 鸿等. 二极管侧面抽运的高平均功率倍频 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2001, **A28**(4): 301~303
- 3 Xu Degang, Yao Jianquan, Guo Li *et al.*. 104 W laser diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG green light laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 925~928
徐德刚,姚建铨,郭 丽等. 104 W 内腔倍频全固态 Nd:YAG 绿光激光器[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 925~928
- 4 Wang Nuanrang, Wang Canzhao, Yuan Ligang *et al.*. 138 W narrow pulse-width solid-state green laser operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1017~1020
王暖让,王灿召,苑利钢等. 138 W 窄脉冲全固态绿光激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1017~1020
- 5 Wang Nuanrang, Wang Canzhao, Yuan Ligang *et al.*. Study on the narrow pulse-width diode-pumped solid-state green laser operation[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 83~85
王暖让,王灿召,苑利钢等. 窄脉宽 LD 泵浦全固态绿光激光器的实验研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(1): 83~85
- 6 Li Chengrong, Chen Xiuyan, Li Xiu *et al.*. 164 W LD side-pumped quasi-continuous-wave Nd:YAG/HGTR-KTP green laser[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(3): 291~293
李成荣,陈秀艳,李 修等. 164 W LD 侧抽运准连续 Nd:YAG/HGTR-KTP 高功率绿光激光器[J]. 激光技术, 2009, **33**(3): 291~293
- 7 Tang Chun, Gao Qingsong, Tong Lixin *et al.*. 160 W diode-pumped E-O Q-switched master oscillator power amplifier green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1455~1458
唐 淳,高清松,童立新等. 160 W 激光二极管抽运电光调 Q 主振荡功率放大器绿光激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1455~1458
- 8 W. Koehler. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl. Beijing: Science Press, 2002. 356~370
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文,江泽文,程国祥译. 北京:科学出版社, 2002. 356~370