

文章编号: 0258-7025(2007)09-1178-04

# 83 W 659.5 nm 全固态红光激光器

杨 涛, 王建军, 姜东升, 赵 鸿, 梁兴波, 赵书云, 苑利钢

(华北光电研究所固体激光技术国家重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 报道了采用双抽运头串联的对称直通腔结构及 KTP 晶体腔内倍频实现高功率红光激光输出的实验结果。在激光二极管(LD)抽运功率为1250 W, 声光 Q 开关工作重复频率为10 kHz条件下, 获得平均功率为83 W, 波长为659.5 nm 的红光激光输出, 光-光转换效率为6.7%, 斜率效率为17%。激光器采用平-平腔结构, 每个抽运头使用了一个连续运转的高功率激光二极管侧面抽运组件, 组件内由35只20 W的激光二极管呈五边形阵列分布抽运一根 Nd:YAG 圆棒。采用镜片镀膜的方法使 Nd:YAG 工作在1319 nm 波长, 经腔内倍频得到单一波长659.5 nm 红光输出, 并对该激光器的基频及倍频输出特性进行了实验研究。

**关键词** 激光器; 全固态激光器; 659.5 nm 红光激光器; 双抽运头; 对称直通腔; 腔内倍频

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## All-Solid-State Red Laser with 83 W Output Power at 659.5 nm

YANG Tao, WANG Jian-jun, JIANG Dong-sheng, ZHAO Hong,

LIANG Xing-bo, ZHAO Shu-yun, YUAN Li-gang

(State Key Laboratory of Solid-State Laser Technology,

North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** The experimental results of high-power red laser constituted of a symmetrical linear resonator with two pumping modules, and intracavity frequency-doubling with a KTP crystal are reported. The average output power of 83 W at 659.5 nm was obtained in the condition of 1250 W pump power and the acoustic-optical Q-switching repetition rate of 10 kHz. The optical-optical efficiency was 6.5% and the optical slope efficiency was 17%. The laser adopted a plane-plane cavity structure. Every pumping head was equipped with a high power continuous wave (CW) side-pump module comprising of a Nd:YAG rod side-pumped by thirty-five 20 W laser diode arrays (LSAs) with pentagon geometry. To realize the oscillation of single wavelength of 1319 nm in Nd:YAG, the reflectivities of the resonator mirror are designed, which also leads to the single wavelength output of second-order harmonic (659.5 nm). The laser output characteristics of fundamental and frequency-doubled wavelengths have been studied.

**Key words** lasers; all-solid-state laser; 659.5 nm red laser; double pumping modules; symmetrical linear resonator; intracavity frequency-doubling

## 1 引 言

红光激光器在激光显示领域具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。激光显示技术不仅能达到传统显示的所有技术指标, 而且拥有更宽的色域和更高的色饱和度, 能显示自然界最真实、最丰富的色彩, 已成为目前国际显示领域的研究热点之一。近年来, 我国的激光显示技术发展非常迅速。2002年, 中国科学院所属五

家研究单位联合攻关, 在国内首次实现了全固态激光(DPL)全色显示; 2005年, 又成功研制出60寸激光家庭影院样机, 84寸及140寸大屏幕激光显示(背投)样机<sup>[2]</sup>, 使我国的激光显示技术与国际同步, 多项成果达到世界先进水平。早期的激光显示主要采用气体激光器作为激光光源, 但气体激光器效率低、寿命短、体积庞大, 难以实用化。20世纪80年

收稿日期: 2007-04-27; 收到修改稿日期: 2007-07-02

作者简介: 杨 涛(1980—), 男, 贵州人, 工程师, 主要从事高功率激光二极管抽运的全固态激光器的研究。

E-mail: yt\_tom\_topgun@sohu.com

导师简介: 姜东升(1968—), 男, 河南人, 研究员, 目前研究方向为高功率固体激光器技术。E-mail: jiangds@263.net

代末,全固态激光技术获得快速发展,并逐步取代气体激光,成为新一代激光显示技术的首选。目前,在激光显示所需的三基色中,绿光激光器技术已经相当成熟<sup>[3]</sup>,但要获得高功率、高质量和高稳定性的红光和蓝光光源技术难度依然很大。采用光纤耦合输出的红光激光二极管(LD)及采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体倍频产生的 671 nm 激光技术近几年来得到迅速发展<sup>[4,5]</sup>。红光激光二极管通过阵列组合方式可以得到较高的功率输出,但光束质量很不理想;而 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体热导率低,机械性能较差,无法承受大功率抽运,难以获得高功率激光输出。这些缺点都使其难以满足激光显示对激光光源的要求。Nd:YAG 晶体是目前技术最成熟、应用最广泛的激光晶体,它能够通过侧面抽运获得上千瓦的抽运功率,再对其 1319 nm 波长倍频就可获得 659.5 nm 波长的高功率红光输出。2005 年天津大学温午麟等采用激光二极管连续抽运 Nd:YAG/KTP 倍频在 L 型腔上实现了 12 W 红光输出<sup>[6]</sup>;2006 年中国科学院物理所彭海波等利用激光二极管连续抽运 Nd:YAG/LBO 倍频在 Z 型腔上实现了 28 W 红光输出<sup>[7]</sup>。

本文介绍了采用双抽运头串联对称直通腔结构及 KTP 晶体腔内倍频实现高功率红光激光输出的实验装置及结果。实验中,通过采用双抽运头串联方式,总的抽运功率达到上千瓦;采用对称直通腔结构,并对激光晶体热效应进行有效补偿,优化了谐振腔性能;通过对谐振腔腔镜膜系参数的选择,有效地抑制了 1064 nm 及 1338 nm 波长激光振荡,使激光器只在 1319 nm 单一波长条件下工作。实验表明,在总抽运功率 1250 W,声光 Q 开关工作重复频率 10 kHz 条件下,最终获得了输出功率达 83 W 的 659.5 nm 单一波长红光激光输出。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,激光谐振腔采用双抽运头直通腔结构,总长 700 mm。其中 M<sub>1</sub> 为全反镜, M<sub>2</sub> 为红光输出镜, M<sub>3</sub> 为谐波反射镜(用来反射基频光反向通过 KTP 晶体产生的倍频光)。声光 Q 开关置于两抽运头之间,以获得最佳的关断效果。倍频晶体 KTP 采用 II 类相位匹配(相位匹配角选为  $\theta = 59.9^\circ, \varphi = 0^\circ$ ),两通光面镀 659.5 nm 和 1319 nm 增透膜,并装配在特殊设计的温控装置中,以保证晶体在高功率条件下温度恒定。

每个激光抽运头由 35 只功率为 20 W 的激光二

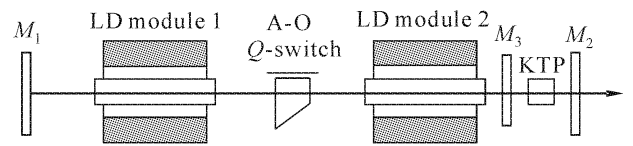


图 1 83 W 红光激光器实验装置示意图  
Fig. 1 Experimental setup of 83 W red laser

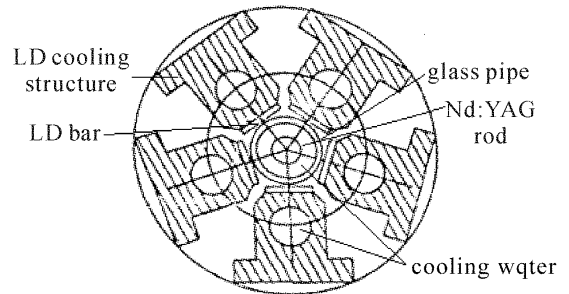


图 2 700 W 抽运头结构示意图  
Fig. 2 Structure of 700 W pumping module

极管组成,抽运功率最大可达 700 W。这些激光二极管按照五边形等间距排列,侧面抽运 Nd:YAG 晶体(截面结构如图 2 所示),以获得均匀的抽运效果。Nd:YAG 晶体尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ ,两端磨成凹面,用以补偿激光晶体的热透镜效应。由于单个抽运头的抽运功率受到限制,为了获得尽可能高的抽运功率,激光器谐振腔采用双抽运头串联结构,使总抽运功率可以达到 1400 W,基本满足实验需要。

谐振腔中两抽运头对称放置,以获得最大的稳态区域<sup>[8]</sup>。全反镜和输出镜都采用平面镜,以获得最大的模体积<sup>[9]</sup>。谐振腔总的模体积为图 3 中阴影部分。模体积的计算公式为<sup>[10]</sup>

$$V = 2[\pi h(\omega_{0L}^2 + \omega_d^2) + \pi \omega_{0L}^2 \times (l - 2h)], \quad (1)$$

式中  $h = \frac{l}{2n}$ ,  $l$  为棒长,  $n$  为激光晶体的折射率,  $\omega_{0L}$  为棒主平面上的光斑半径,  $\omega_d$  为棒端面上的光斑半径。由文献[10]可知,腔内模体积  $V$  与棒主平面到腔镜的距离  $L$  成正比关系,所以为了获得尽可能高的输出功率,在谐振腔稳态区域内应选取尽可能大的  $L$  值。

为了获得 659.5 nm 单一波长红光激光输出,

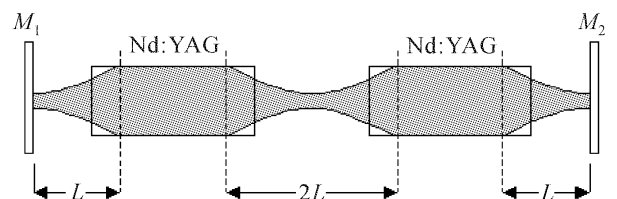


图 3 对称谐振腔模体积示意图  
Fig. 3 Diagram of the mode volume for the symmetrical resonator

要求谐振腔应有效抑制1064 nm和1338 nm激光振荡。目前,采用对腔镜镀1064 nm增透膜来抑制其波长振荡的方法已相当成熟,但对于1338 nm波长,由于它与1319 nm波长非常接近,采用同样的方法对其进行抑制难度较大,文献中也很少见到相关的报道。

采用镀膜方式抑制1338 nm激光振荡对膜系设计的要求很高。激光器阈值功率的计算公式为<sup>[11]</sup>

$$P_{th} = \frac{\delta_0 \hbar \nu_p}{2Z\sigma_e \tau_f \eta_f} J^{-1}, \quad (2)$$

式中  $\delta_0 = T + \gamma_i$ , 其中  $\gamma_i$  为谐振腔单程损耗,  $T$  为谐振腔腔镜总透射率;  $\nu_p$  为抽运光频率,  $Z$  为激光工作物质长度,  $\sigma_e$  为受激辐射截面,  $\tau_f$  为能级的自发辐射寿命,  $\eta_f$  为量子效率,  $J$  为交叠积分。由于在同一谐振腔中, 1319 nm 和 1338 nm 波长抽运条件相同, 而且具有同一上能级, 所以它们对应的  $\hbar \nu_p$ ,  $\tau_f$ ,  $\eta_f$  和  $J$  值都相同, 两个波长的受激辐射截面之比为  $\sigma_{e1319} : \sigma_{e1338} = 0.95 : 1$ <sup>[12]</sup>, (2) 式可简化为

$$P_{th} = \frac{T_0 + \gamma_i}{\sigma_e} K, \quad (3)$$

式中  $K = \frac{\hbar \nu_p}{2Z\tau_f \eta_f} J^{-1}$ 。为了确保1338 nm激光不能在谐振腔内产生振荡, 需要满足  $P_{th1338} > P_{max}$  ( $P_{th1338}$  为1338 nm波长激光在谐振腔内产生振荡的阈值抽运功率,  $P_{max}$  为激光器可获得的最大抽运功率)。

为了确保激光器只在1319 nm及其倍频659.5 nm波长条件下工作, 对腔镜镀膜参数的要求为: 全反镜  $M_1: R_{1319 \text{ nm}} > 99.8\%$ ,  $T_{1064 \text{ nm}} > 80\%$ ,  $T_{1338 \text{ nm}} > 10\%$ ; 红光输出镜  $M_2: T_{659.5 \text{ nm}} > 99\%$ ,  $R_{1319 \text{ nm}} > 99.8\%$ ,  $T_{1064 \text{ nm}} > 80\%$ ,  $T_{1338 \text{ nm}} > 10\%$ ; 谐波反射镜  $M_3: R_{659.5 \text{ nm}} > 97\%$ ,  $T_{1319 \text{ nm}} > 99\%$ ,  $T_{1064 \text{ nm}} > 80\%$ ,  $T_{1338 \text{ nm}} > 60\%$ 。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 1319 nm 基频激光输出特性

为便于性能比较, 首先进行了1319 nm激光输出特性的实验研究。在图1所示谐振腔中去掉KTP晶体及谐波反射镜  $M_3$ , 并把红光输出镜  $M_2$  换为基频光输出镜 ( $T_{1319 \text{ nm}} = 8\%$ ,  $T_{1064 \text{ nm}} > 80\%$ ,  $T_{1338 \text{ nm}} > 10\%$ ), 便可获得1319 nm激光输出。

输出功率特性曲线如图4所示。阈值抽运功率约为700 W, 当抽运功率为1250 W, 声光Q开关工作重复频率10 kHz时, 1319 nm激光输出功率达155 W, 脉宽为350 ns, 光-光转换效率为12%, 斜率

效率为28%。当激光输出功率为155 W时, 采用日本YOKOGAWA公司AQ6317C型光谱分析仪测量的激光光谱如图5所示。可以看出, 此时激光器只在1319 nm单一波长条件下运转, 证明1064 nm及1338 nm波长被有效抑制。此外, 实验中没有发现文献[13]中提到的声光Q开关关断不彻底的现象。

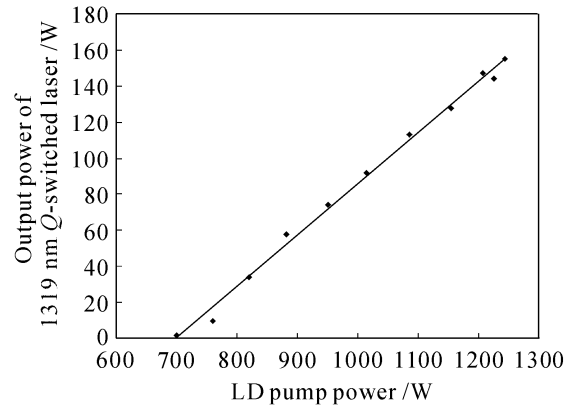


图4 1319 nm激光输出功率随抽运功率的变化曲线  
Fig. 4 Output power of 1319 nm laser as a function of pump power

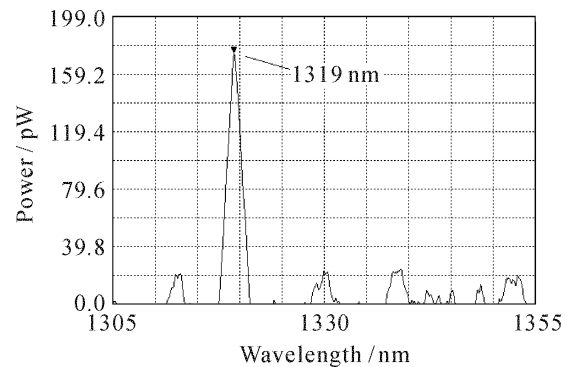


图5 1319 nm激光光谱图  
Fig. 5 Spectrum of 1319 nm laser

#### 3.2 659.5 nm 红光激光输出特性

659.5 nm红光激光输出特性曲线如图6所示。阈值抽运功率约为750 W, 当抽运功率为1250 W时, 红光激光输出功率达到83 W, 脉冲宽度210 ns, 光-光转换效率6.7%, 斜率效率17%。由图6所示的曲线还可看出, 即使输出功率达到最高点, 仍没有趋向饱和的迹象, 说明如果进一步增大抽运功率, 红光激光的输出功率还可以提高。在红光激光输出83 W条件下测得的激光光谱如图7所示, 表明此时激光器只在659.5 nm单一波长条件下运转, 并未出现664 nm和669 nm波长激光<sup>[7]</sup>。

在659.5 nm激光输出功率为83 W条件下, 使用Spiricon公司的LA100-PC型光束质量分析仪对输出激光空间分布特性进行了测量, 如图8所示。

实验测得的水平方向光束发散角为6.6 mrad,垂直方向光束发散角为6.5 mrad。

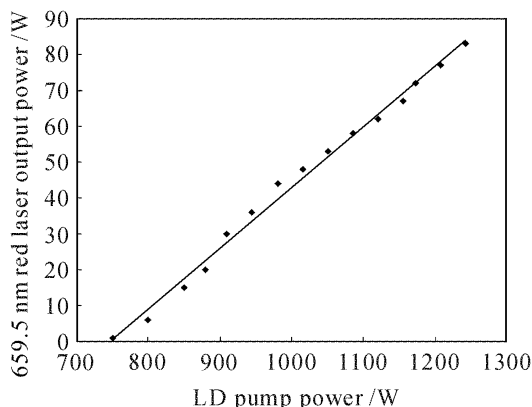


图6 红光激光输出功率随抽运功率的变化曲线  
Fig. 6 Output power of red laser as a function of pump power

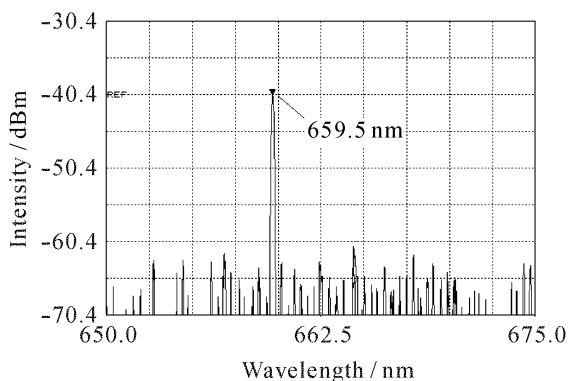


图7 红光激光器光谱图  
Fig. 7 Spectrum of red laser

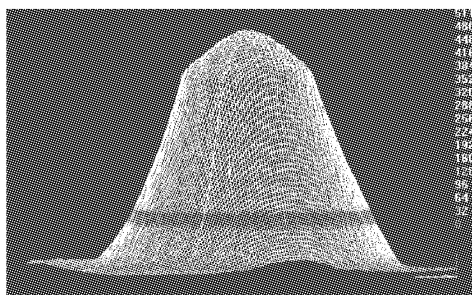


图8 红光输出功率为83 W时的光斑强度分布  
Fig. 8 Intensity distribution of red laser at 83 W output power

## 4 结 论

在高功率激光二极管抽运产生1319 nm波长的Nd:YAG激光器中,利用Ⅱ类临界相位匹配的KTP晶体腔内倍频,通过谐振腔腔型优化设计及对腔镜膜系设计,实现了最大功率为83 W的659.5 nm单一波长红光激光输出,脉冲宽度210 ns,光-光转换效率6.7%,斜率效率17%。可以看出,如果增大

抽运功率,红光激光器的输出功率还可进一步提高。

## 参 考 文 献

- Chen Changshui, Li Yunkui, Yin Shaotang *et al.*. 660 nm pumped LiTaO<sub>3</sub>:Cr<sup>3+</sup> laser operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):13~14  
陈长水,李运奎,殷绍唐等. 660 nm 激光抽运 LiTaO<sub>3</sub>:Cr<sup>3+</sup> 晶体的激光运转[J]. 中国激光, 2001, **A28**(1):13~14
- Xu Zuyan. Laser displays—new display technology for next generation [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(Suppl.):737~741  
许祖彦. 激光显示——新一代显示技术[J]. 激光与红外, 2006, **36**(增刊):737~741
- Jiang Dongsheng, Zhao Hong, Wang Jianjun *et al.*. 120 W diode-pumped green Nd:YAG laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(Suppl.):7~10  
姜东升,赵鸿,王建军等. 120 W的二极管泵浦Nd:YAG绿光激光器[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(增刊):7~10
- Tan Huiming, Zheng Quan, Chen Yingxin *et al.*. Double-frequency 671 nm laser with type-I critical phase-matching LBO [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):289~292  
檀慧明,郑权,陈颖新等. LBO I类临界相位匹配倍频671 nm激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(4):289~292
- Zhang Hengli, Zhu Naiyi, Yang Qiansuo *et al.*. Study of an efficient Nd:YVO<sub>4</sub> red laser pumped by laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3):274~277  
张恒利,竺乃宜,杨乾锁等. 激光二极管抽运Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO红光激光器研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(3):274~277
- Wen Wuqi, Yao Jianquan, Wang Tao *et al.*. LD pumper Nd:YAG/KTP Q-CW red laser with 12 W power [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(3):271~273  
温午麒,姚建铨,王涛等. LD泵浦准连续Nd:YAG/KTP 12 W红光激光器[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(3):271~273
- Haibo Peng, Wei Hou, Yahui Chen *et al.*. 28 W red light output at 659.5 nm by intracavity frequency doubling of a Nd:YAG laser using LBO [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9):3961~3967
- Wang Hailin, Zhou Zhuoyou, Cao Hongbing *et al.*. Study on the stable characteristic of two-rod Nd:YAG laser [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(2):149~152  
王海林,周卓尤,曹红兵等. 双棒串接Nd:YAG激光器的稳定特性研究[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(2):149~152
- K. P. Driedger, R. M. Ifflander, H. Weber. Multirod resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(4):665~674
- Yu Benhai. Analyses of symmetrical resonator for two-rod Nd:YAG laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, **24**(6):11~13  
余本海. 双棒串接Nd:YAG激光器对称型谐振腔的分析[J]. 应用光学, 2003, **24**(6):11~13
- Xie Shusen, Lei Shizhan. Photon Technology [M]. Beijing: Science Press, 2004. 440~441  
谢树森,雷仕湛. 光子技术[M]. 北京:科学出版社, 2004. 440~441
- Zhao Xin, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. A 3.11 W-CW LD end-pumped Nd:YAG laser at 1319 nm [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(6):673~677  
赵欣,姚建铨,张百钢等. LD端泵浦1319 nm 3.11 W-CW Nd:YAG激光器[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(6):673~677
- Wen Wuqi, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. LD pumped Nd:YAG/KTP quasi-continuous wave red light laser with 8.1 W output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1281~1284  
温午麒,姚建铨,丁欣等. 8.1 W全固态准连续红光Nd:YAG激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(11):1281~1284