

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0068-05

高功率连续激光二极管阵列侧面抽运 Nd:YAP/LBO 红光激光器

于永吉 金光勇 王 超 陈薪羽 郭家喜 郝大伟
(长春理工大学理学院激光技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 报道了一台采用高功率连续激光二极管阵列(LDA)侧面抽运 Nd:YAP 晶体,通过腔内 LBO 晶体的 I 类临界相位匹配倍频获得 670.7 nm 波长输出的全固态红光激光器。实验中抽运源采用离轴交错式抽运,这种抽运结构可以使晶体内的增益场与谐振腔基模实现良好的匹配,易于得到较好的光束质量和大功率的激光输出。谐振腔采用短三镜折叠腔结构,通过对激光晶体热透镜焦距的测量,利用高斯光束 ABCD 传输矩阵理论优化设计了谐振腔各参量。当激光二极管(LD)注入功率为 800 W 时,获得 8.3 W 的连续波 670.7 nm 红光输出,水平和垂直方向的光束质量 M^2 因子约为 5.6,30 min 内的输出功率稳定性优于 3%。实验结果表明,采用这种抽运及腔型结构是获取高功率红色激光输出的有效方法。

关键词 激光器;红光激光器;倍频;离轴交错抽运;折叠腔

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0068

High-Power Continuous-Wave Laser Diode Array Side-Pumped Nd:YAP/LBO Red Laser

Yu Yongji Jin Guangyong Wang Chao Chen Xinyu Guo Jiaxi Hao Dawei
(Institute of Laser Technology, School of Science, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A red laser at 670.7 nm is obtained with high-power continuous-wave laser diode array (LDA) off-axis stagger side-pumped Nd:YAP laser crystal and type-I critical phase matching of LBO crystal. The perfect matching of gain field inside the crystal and fundamental mode of cavity can be made by this structure, then high beam quality, high power output can be easily obtained. By using a short folded-cavity resonator, the thermal focal length of Nd:YAP crystal is measured, and the parameters of laser cavity are selected by computer optimum design. With incident pump power of 800 W for the Nd:YAP crystal, the red laser output of 8.3 W at 670.7 nm is obtained, the beam quality M^2 value equals 5.6 in both horizontal and vertical directions at the maximum output power, and the power stability is better than 3% at the maximum output power during 30 min. The experimental results show that the intracavity frequency-doubled by the pump structure is an effective method for high power red laser.

Key words lasers; red laser; frequency-doubled; off-axis stagger pumped; folded-cavity

1 引 言

高功率连续波红光激光器在激光医疗、彩色显示等领域具有广阔的应用前景,在这些应用领域中

所需要的高功率红色相干光源必须具备较高的光-光转换效率,小型化的腔型结构,长时间且稳定的工作寿命,而采用激光二极管(LD)抽运掺 Nd³⁺ 离子

收稿日期: 2010-02-20; **收到修改稿日期**: 2010-04-03

基金项目: 吉林省教育厅基金(2009JYT08)资助课题。

作者简介: 于永吉(1983—),男,硕士研究生,主要从事激光物理与新型激光器、全固态激光器及非线性频率变换技术等方面的研究。E-mail: yuyongjiyuyongji@163.com

导师简介: 金光勇(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光物理与新型激光器、激光毁伤机制及非线性光学频率变换技术等方面的研究。E-mail: jgycion@163.com(通信联系人)

的激光晶体发射 $1.3 \mu\text{m}$ 波段激光经非线性光学晶体倍频是获得这种光源的有效途径^[1~7]。在众多的掺 Nd^{3+} 激光晶体中, Nd:YAP 晶体不但具有较高的热导率, 而且其 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ 跃迁的受激发射截面 σ 为 $2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 是 Nd:YAG , Nd:YLF 等晶体同一跃迁受激发射截面的 2.4 倍以上, 并且它的天然双折射特性可以克服高平均功率下热致双折射引起的退偏损耗^[8], 是目前已知最适用于 $1.3 \mu\text{m}$ 波段高功率运转的激光晶体之一。

本文通过高功率连续激光二极管阵列(LDA)侧面抽运 Nd:YAP 获得 $1.34 \mu\text{m}$ 基频光, 采用短三镜折叠腔结构, 利用非线性晶体 LBO 的 I 类临界相位匹配倍频实现了 8.3 W 的连续波 670.7 nm 红光输出。

2 理论分析

2.1 侧面抽运结构设计

图 1 为 LDA 侧面抽运 Nd:YAP 模块结构示意图。尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 106 \text{ mm}$ 的 Nd:YAP 晶体棒位于石英冷却水管中心, 晶体棒的 Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 0.9%, 石英管内径为 7 mm, 管壁厚度为 2 mm, 为了抑制晶体内自发辐射效应的产生, 将晶体的表

面进行了打毛处理。抽运源采用 3 个连续 LD bar 条阵列互成 120° 对称环绕在 Nd:YAP 晶体棒周围, 每个 LD bar 条阵列封装 7 个长度为 10 mm 的连续 LD bar 条(北京吉泰基业科技有限公司提供), 单条的发光功率为 40 W。这 7 个 LD bar 条在水冷无氧铜热沉表面沿慢轴方向离轴交错排列为 7 行, bars 的慢轴方向与 Nd:YAP 棒的中心轴平行, 如图 2 所示。这种抽运方式间接地将传统抽运方式下中心轴密度过高的光场分布进行了横向展宽, 使其更趋于均匀化。从 LD 发射的中心波长为 803 nm 的抽运光通过石英冷却水管和冷却水直接进入 Nd:YAP 晶体棒。在这种直接耦合结构中, LD 与 Nd:YAP 晶体棒之间没有使用微柱透镜等光学组件对激光二极管快轴方向的发散光进行压缩, 从而减少了抽运光在上述光学变换器件表面的菲涅耳反射损耗, 有利于提高模块的抽运耦合效率, 同时也使装置更为简单稳定。为了进一步提高模块的抽运耦合效率, 把 3 个 LD bar 条阵列的对面进行镀金处理, 以将透过 Nd:YAP 棒的抽运光重新反射回晶体棒。这些镀金的反光面还作为模块机械支撑架, 精确固定 LD bar 条阵列的位置, 以保证棒内抽运光分布的对称性。

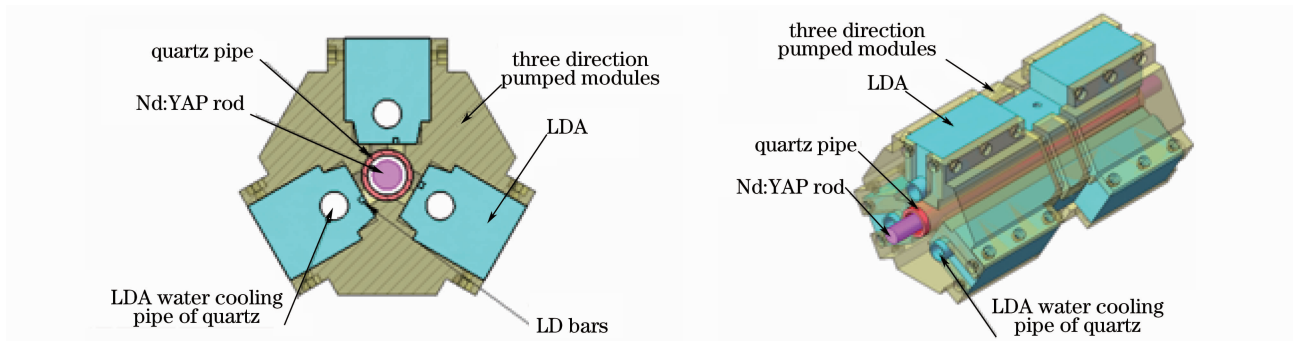


图 1 LDA 侧面抽运 Nd:YAP 模块结构示意图

Fig. 1 Schematic of LDA side-pumped Nd:YAP modules structure

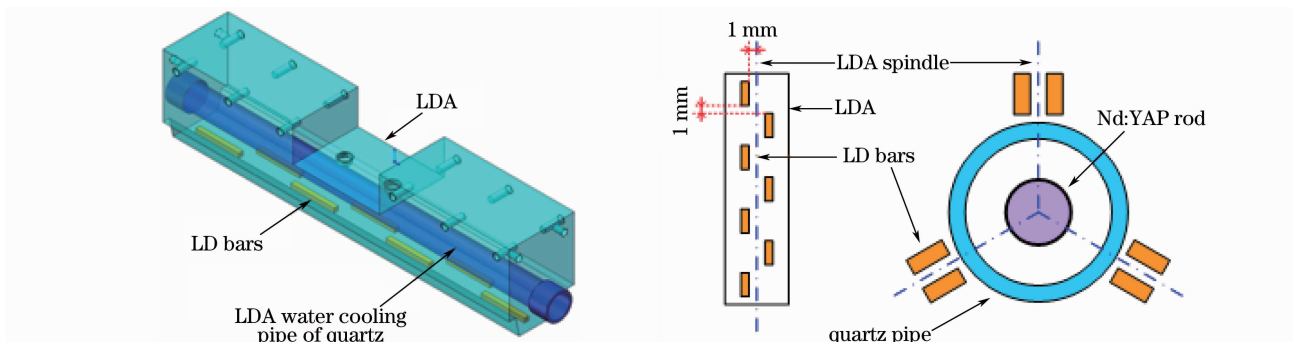


图 2 LD bar 条离轴交错抽运结构示意图

Fig. 2 Schematic of LD bar off-axis stagger pumped modules structure

2.2 倍频晶体的选择

在激光非线性频率变换过程中,非线性晶体的匹配类型、匹配角度、有效非线性系数、走离角、接收角和温度带宽等参数均是影响频率变换优劣的关键因素,同时也左右着对应不同频率变换下非线性晶

体的选取,因此,在进行 1341.4 nm 到 670.7 nm 的非线性频率变换前,应根据晶体的相关参数选取合适的倍频晶体。应用 SNLO 非线性晶体计算软件^[9],分别计算了 KTP,LBO,BIBO,BBO 4 种常用晶体对 1341.4 nm 倍频的匹配参数,如表 1 所示。

表 1 KTP,LBO,BIBO,BBO 对 1341.4 nm 倍频的匹配参数

Table 1 Phase matching parameters of KTP, LBO, BIBO and BBO for frequency doubling

Crystal	KTP	LBO	BIBO	BBO
Phase matching type	1341.4(o)+	1341.4(e)+	1341.4(e)+	1341.4(o)+
	1341.4(e)→	1341.4(e)→	1341.4(e)→	1341.4(o)→
Phase matching directions(θ, φ)	670.7(o) (II)	670.7(o) (I)	670.7(o) (I)	670.7(e) (I)
	58.9°, 0°	86.1°, 0°	8.7°, 0°	20.3°
$d_{\text{eff}} / (\text{pm}/\text{V})$	3.07	0.817	2.18	1.98
Walk-off angle / mrad	44.29	3.46	24.93	50.18
Acceptance angle / (mrad·cm)	1.69	24.23	3.03	1.62
Temperature range / (K·cm)	32.57	8.6	4.87	64.11

由表 1 可以看出,对 1341.4 nm 倍频时,KTP 晶体的有效非线性系数 d_{eff} 最大,LBO 晶体的有效非线性系数 d_{eff} 最小,但是相比 KTP,BIBO,BBO 3 种晶体,LBO 晶体的走离角远远小于这 3 种晶体,而接收角又远远大于这 3 种晶体,因此 LBO 晶体的有效作用长度变得很长,这样就意味着可以通过增加 LBO 晶体的长度来提高倍频转换效率,而且 LBO 晶体的高损伤阈值也有利于通过提高基频光功率密度来使倍频转换效率得到进一步提高。所以实验中采用 I 类临界相位匹配的 LBO 晶体作为 1341.4 nm 基频光到 670.7 nm 红光频率变换的倍频晶体。

2.3 谐振腔设计

由于在高功率 LDA 侧面抽运增益介质时,增益介质的热透镜效应是不能获得高效率、高功率输出的一个重要因素,因此在较大抽运功率变化范围内,通过合理地选择腔长以得到热不灵敏腔,是获得稳定高功率激光输出的必要条件,而在设计腔型前,对增益介质的热焦距进行测量是十分必要的。实验中采用精度较高的界稳腔法测量 Nd:YAP 的热焦距^[10,11],选用非对称平-平腔,如图 3 所示,将腔镜

M_1 与 Nd:YAP 棒端面的距离 x_1 固定在 40 mm(远远小于最小热焦距),只精确测量腔镜 M_2 与 Nd:YAP 棒端面之间的距离 x_2 ,由

$$f = x_2 + h \quad (1)$$

得主平面位置

$$h = l/2n_0, \quad (2)$$

式中 l 为 Nd:YAP 棒的长度。通过实验测量该焦距对应的 803 nm 抽运功率:逐渐增大 LD 抽运功率,晶体棒产生的热透镜效应越来越强,在这一过程中,1341.4 nm 红外激光输出功率逐渐增大,当 LD 抽运功率增加至某一值时,激光输出突然降至零,则该抽运功率对应的晶体棒热焦距就等于理论计算得到的 f 。经实验测量得到,在 800 W 抽运功率下,Nd:YAP 热焦距 f 约为 145 mm。

为了充分利用抽运能量和提高 LBO 的倍频效率,采用图 4 所示的短三镜折叠腔结构。其中 M_1, M_2 分别为分臂 1,分臂 2 的端镜,曲率半径分别为 $\infty, 150$ mm,折叠输出镜 M 的曲率半径为 300 mm, Nd:YAP 的等效热焦距为 f 。根据所用实验器件的具体参数,利用高斯光束 ABCD 传输矩阵模拟光束在晶体棒主平面和倍频晶体上的基模光斑半径变化,通过 Matlab 软件辅助优化设计,选取两条分臂的腔长分别为 560 mm 和 300 mm,计算机模拟得到如图 5 所示的光斑半径随热焦距变化示意图。在 800 W 抽运功率下 Nd:YAP 晶体的热透镜焦距为 145 mm,由图 5 可知,光束在晶体棒主平面和倍频晶体上的基模光斑半径在这个范围内均处于谐振腔稳定区,所以该腔型结构为热稳定腔。

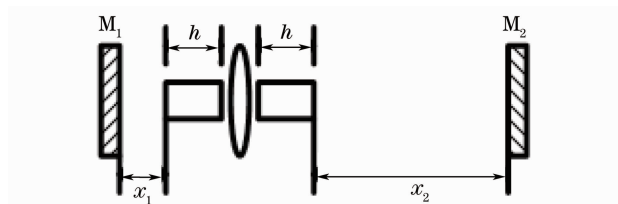


图 3 热焦距测量装置图

Fig. 3 Measure setup of thermal focal length

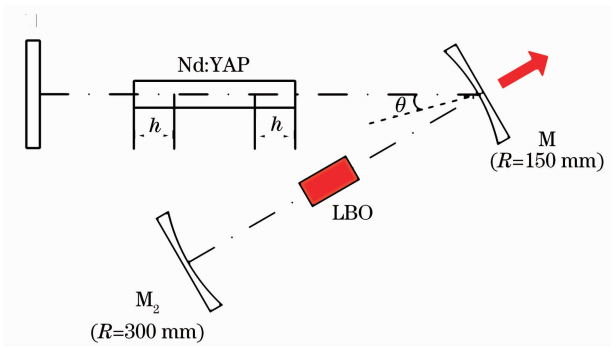


图 4 短三镜折叠腔结构示意图

Fig. 4 Cavity configuration of short three microscope folded-cavity

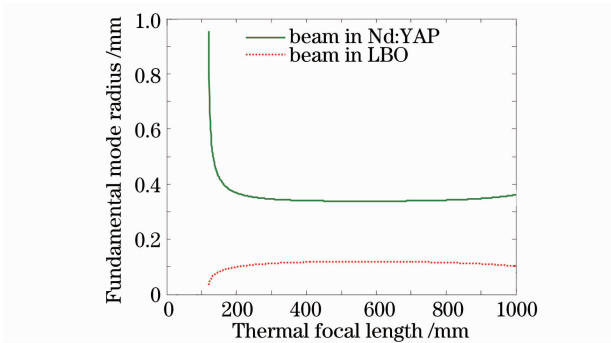


图 5 光束在 Nd:YAP 晶体棒主平面和倍频晶体上的基模光斑半径与热焦距的关系

Fig. 5 Fundamental mode radius in the centers of Nd:YAP rod and frequency-doubled crystal versus thermal focal length

3 实验结果

实验装置采用如图 4 所示的短三镜折叠腔结构。抽运源为 2.1 节所述的离轴交错式侧面抽运模块,放置在折叠臂束腰处的倍频晶体 LBO 尺寸为 5 mm×5 mm×20 mm,两个端面镀 1341.4 nm 和 670.7 nm 双色增透膜,在晶体的侧面裹上一层铝箔安装在紫铜热沉上,通过半导体制冷器(TEC)进行温度控制,控温精度为 0.1 ℃。

实验中,通过精细调节各元件至最佳状态,采用相干公司 PM100-19C 型功率计测试激光输出功率,在 LD 抽运功率为 800 W 时,获得了 8.3 W 的 670.7 nm 红光连续输出,光-光转换效率为 1.04%,图 6 描述了 670.7 nm 红光输出功率随抽运功率的关系曲线。图 7 为 8.3 W 输出功率下数码相机拍摄的 670.7 nm 红光远场光斑,同时采用 Spiricon M²-200 光束质量分析仪对红光输出光束质量进行测试,如图 8 所示,测得水平和垂直方向的光束质量 M² 因子分别为 M_x²=5.47, M_y²=5.73,平均值约为 5.6。为了

研究 670.7 nm 红光激光器的工作稳定性,测试了激光器在 8.3 W 最高输出功率下连续工作 30 min 的功率稳定性。测试时每隔 3 min 记录一次数据,由功率不稳定度公式

$$\frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}} = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n} \right]^{1/2}}{\bar{P}}$$

计算得到该激光器 30 min 内的输出功率稳定性优于 3%。

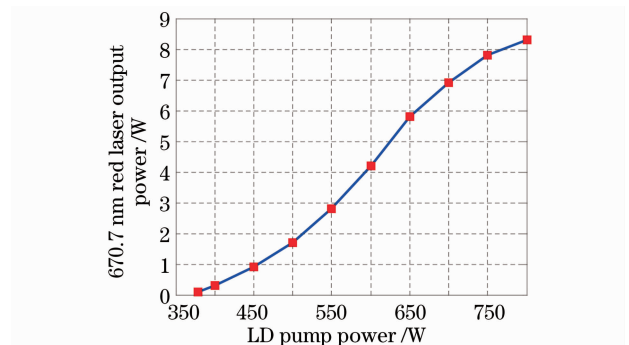


图 6 670.7 nm 红光输出功率随 LD 抽运功率的变化

Fig. 6 Output power at 670.7 nm versus LD input pump power

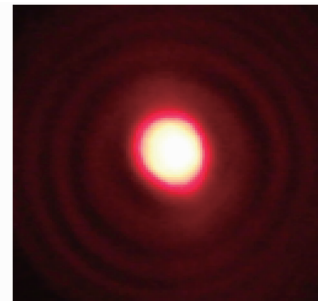


图 7 670.7 nm 红光远场光斑

Fig. 7 Far field 670.7 nm red laser spots

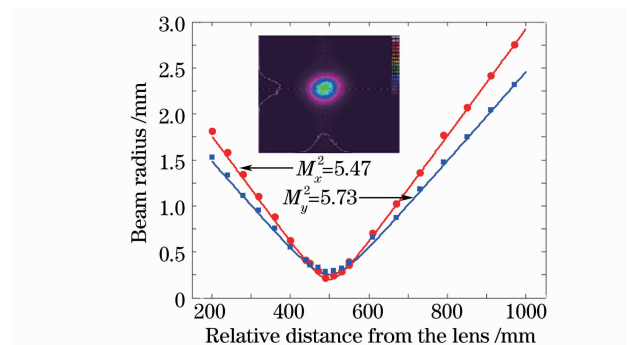


图 8 670.7nm 红光光束质量

Fig. 8 Beam quality of 670.7 nm red laser

4 结 论

报道了一台采用高功率连续 LDA 离轴交错抽运 Nd:YAP 晶体,通过腔内 LBO 的 I 类临界相位匹配倍频获得 670.7 nm 波长输出的全固态红光激光器。在 800 W 抽运功率下,利用优化设计的短三镜折叠腔结构,获得了 8.3 W 的连续波 670.7 nm 红光输出,水平和垂直方向的光束质量 M^2 因子约为 5.6,30 min 内的输出功率稳定性优于 3%。实验结果表明,采用这种抽运及腔型结构是获取高功率红色激光输出的有效方法。

参 考 文 献

- 1 Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO₄/LBO red laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323~327
常东霞,刘侠,王宇等.连续波 Nd:YVO₄/LBO 稳频倍频红光全固态激光器[J].*中国激光*,2008,**35**(3):323~327
- 2 Zheng Quan, Wang Junying, Xue Qinghua. LBO frequency doubled CW red laser at 671 nm up to 1.8 W[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 9~12
郑权,王军营,薛庆华. LBO 倍频 1.8 W 连续 671 nm 红光激光器[J].*中国激光*,2005,**32**(1):9~12
- 3 Chen Zhenqiang, Zhang Ge, Shen Hongyuan *et al.*. High power red laser from intracavity-doubled Nd:YAlO₃/LBO laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 873~876
陈振强,张戈,沈鸿元等. Nd:YAP/LBO 腔内倍频高功率红光激光器[J].*中国激光*,2003,**30**(10):873~876
- 4 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 类临界相位匹配倍频 671 nm 激光器[J].*中国激光*,2002,**A29**(4):289~292
- 5 Qinghua Xue, Quan Zheng, Yikun Bu *et al.*. LD-pumped passively Q-switched red laser at 660 nm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(12): 708~709
- 6 Antonio Agnesi, Annalisa Guandalini, Giancarlo Reali. High-brightness 2.4 W continuous-wave Nd:GdVO₄ laser at 670 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 56~58
- 7 Hamish Ogilvy, Michael J. Withford, Peter Dekker *et al.*. High repetition rate, Q-switched and intracavity frequency doubled Nd:YVO₄ laser at 671 nm[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3543~3547
- 8 H. Y. Shen, R. R. Zeng, Y. P. Zhou *et al.*. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2} and ⁴F_{3/2} → ⁴I_{13/2}[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20): 1937~1938
- 9 SNLO, Free software for modeling nonlinear frequency conversion processes in nonlinear crystals, <http://www.sandia.gov/imrl/X1118/xxtal.htm>
- 10 Feng Song, Chaobo Zhang, Xin Ding *et al.*. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(16): 2145~2147
- 11 Geng Aicong, Zhao Ci, Bo Yong *et al.*. A method for measuring thermal focal length of LD-side-pumped laser crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6987~6991
耿爱丛,赵慈,薄勇等.一种测量二极管侧面抽运固体激光器热焦距的方法[J].*物理学报*,2008,**57**(11):6987~6991