

70 倍高增益激光二极管阵列侧面抽运钕玻璃放大器

邱基斯^{1,2,3} 樊仲维^{1,3} 唐熊忻^{1,2,3} 侯立群³ 张晶³ 赵天卓^{1,3} 麻云凤^{1,2,3}

(¹中国科学院光电研究院, 北京 100190; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)
³北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

摘要 对侧面抽运模块的抽运结构进行了优化,采用漫反射腔设计,利用3个激光二极管阵列(LDA)旋转对称抽运尺寸为 $\phi 2\text{ mm} \times 75\text{ mm}$,掺杂原子数分数为4%的钕玻璃棒。钕玻璃棒两端面镀有在1053 nm高透率为99.8%的增透膜,为消除放大的自发辐射(ASE)光振荡,钕玻璃两端面采用 1.5° 倾角设计。放大器采用集体制冷,产生的热量由在热沉中流动的去离子水带走。能量 $10\text{ }\mu\text{J}$,工作频率1 Hz,脉冲宽度3 ns,输出波长1053 nm的种子激光经过钕玻璃放大器后,在抽运功率为8.2 kW,抽运脉冲宽度为 $400\text{ }\mu\text{s}$ 时达到了70倍的稳定高增益,放大器的荧光分布均匀,脉冲波形图放大后无畸变。

关键词 激光器; 激光二极管阵列; 侧面抽运; 钕玻璃放大器

中图分类号 TN248.1

OCIS 140.4480 140.2010

文献标识码 A

70 Times High-Gain Nd:Glass Rod Amplifier Sidely Pumped by Laser Diode Array

Qiu Jisi^{1,2,3} Fan Zhongwei^{1,3} Tang Xiongxin^{1,2,3} Hou Liqun³ Zhang Jing³
Zhao Tianzhuo^{1,3} Ma Yunfeng^{1,2,3}

[¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China]
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China]

Abstract With the optimized sidely pumped module structure, three laser diode arrays rotating symmetrically pump the Nd:glass rod. The size of the Nd:glass rod is $\phi 2\text{ mm} \times 75\text{ mm}$, with the doping concentration of 4% atom fraction. The end surfaces of the rod are coated with antireflection film with high of 99.8% at 1053 nm, and the rod is tilted 1.5° in order to eliminate the oscillation of amplified spontaneous emission (ASE). With collective cooling, generated heat is cleaned away by deionized water flowing in the heat-sink. The seed, with energy of $10\text{ }\mu\text{J}$, operating frequency of 1 Hz, pulse width of 3 ns, output wavelength of 1053 nm, through the Nd:glass amplifiers reaches 70 times stable high-gain when the pump power is 8.2 kW and the pulse width is $400\text{ }\mu\text{s}$. Meanwhile, the fluorescence distribution of the amplifier is homogeneous. Comparing the pulse oscillogram before and after amplification, there was no distortion in the amplified waveform.

Key words lasers; laser diode array; side pumping; Nd:glass amplifier

1 引言

惯性约束聚变(ICF)激光驱动器在很大程度上代表了目前高功率固体激光技术发展的最高成就^[1]。惯性约束聚变的研究和发展对激光驱动器的精密程度要求越来越高,要求激光系统具有高度的稳定性、可重复性和多路光束性能的一致性,从而对激光系统的设计提出了十分严格的要求^[2,3]。预放系统是大型高功率激光系统中的重要组成部分,不仅占总造价的很大比例,而且对系统的总体性能有重要影响,其功能之一就

收稿日期: 2009-12-15; 收到修改稿日期: 2010-01-11

基金项目: 国家 863 计划(2009AA03ZX1486490)和国家自然科学基金(60927010)资助课题。

作者简介: 邱基斯(1982—),男,博士研究生,主要从事大型复杂全固态激光器和激光放大器等方面的研究。

E-mail: keith0311@163.com

导师简介: 樊仲维(1965—),男,研究员,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: fanzw@gklaser.com

是对前端注入种子脉冲进行预放大。由于光纤激光器具有灵活方便的优点而逐渐被新一代高功率固体激光驱动器采用作为前端系统。但光纤前端受输出峰值功率的限制,输出的种子光单脉冲能量较低,大约为纳焦到微焦量级。此时,预放系统必须提供更高的净增益约 $10^6 \sim 10^9$ 才能使注入主放大器的激光脉冲达到焦耳级,从而被主放系统有效放大。

高功率激光二极管阵列(LDA)具有高光电转换效率、高可靠性、结构简单以及LD抽运源的长寿命等优点,被新一代固体激光器广泛采用^[4]。同时,钕玻璃介质具有较宽和较强的光谱吸收带,使其对抽运源的波长选择和控制要求都不必太高,其激光阈值振荡抽运能量比较低,容易实现激光振荡,且激光跃迁的温度猝灭效应不明显,能够在室温条件下获得高功率的激光输出,成为用于惯性约束核聚变激光驱动器研究中的最佳介质^[5,6]。美国国家点火装置(NIF)计划的实施更是标志着高功率固体激光驱动器进入一个新的研究时代,激光器输出能量和功率大幅度提高。激光二极管阵列侧面抽运放大器具有结构简单、耦合效率高等优点,是解决预放系统高增益放大问题的最佳方案。目前,激光二极管阵列侧面抽运钕玻璃棒状放大器一般可以实现40~60倍的增益,但很难实现高于60倍以上的稳定增益^[3,4]。本文采用优化后的漫反射腔结构,利用3个激光二极管阵列旋转对称侧面抽运钕玻璃棒,达到了70倍的稳定高增益。

2 器件结构及原理

激光二极管阵列抽运放大器的小信号单程增益

$$G_0 = \exp(g_0 l) = \exp(KP_{\text{pump}}), \quad (1)$$

式中 g_0 为小信号增益系数, P_{pump} 为激光二极管阵列的抽运功率, K 为由放大器抽运结构、增益介质吸收特性、抽运光与主激光波长比等确定的效率参量

$$K = \eta_B \eta_T \eta_a \eta_p / (AI_s), \quad (2)$$

式中 η 为各种效率, A 为增益介质的横截面积, I_s 为增益介质的饱和光强^[7]。由(1)式和(2)式可发现,增益只和抽运截面积有关,和抽运长度无关,钕玻璃棒的横截面积越小能得到的单程增益更高。由于激光二极管的价格比较昂贵,不能一味地靠增大抽运功率来提高放大器的增益,也应充分地优化钕玻璃的横截面积,所以本文选用的钕玻璃晶体棒尺寸为 $\phi 2 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 。

端面抽运虽然能够获得高效率、高光束质量的激光输出,但由于受到抽运区域尺寸以及热效应等限制,导致抽运功率较小。为了追求更高的输出功率,选用侧面抽运模块进行抽运。对于高指标要求的激光器,抽运的均匀性非常重要。如果要尽可能地实现均匀抽运,高增益放大侧面抽运模块的抽运腔常选用漫反腔结构,这是由于陶瓷能在很宽的谱线范围内实现97%以上的反射率。光的漫反射使抽运均匀性极大增强,因此可以实现高增益和增益均匀性。相比之下,传统的镀金腔和玻璃腔的全反式抽运结构很难实现较高的抽运均匀性,加之其激光二极管阵列排布密度低,一次传输耦合效率低,很难实现高功率抽运。为了克服激光二极管阵列排布密度低的缺点,采用多维多线巴条(Bar)抽运的结构。此时,巴条排布密度相对较高,容易实现高功率抽运且抽运光分布相对均匀,使传输耦合效率提高。同时,使玻璃管的外壁与陶瓷之间紧密结合,并填充折射率匹配液。由于缩小了间距,巴条到晶体棒中心的距离相应减小,进一步提高了传输耦合效率。所用漫反腔结构如图1所示。采用3个激光二极管阵列侧面抽运的漫反腔结构,即3个激光二极管阵列组成一个激光二极管面阵,4个激光二极管面阵又组成一个激光二极管阵列,3个激光二极管阵列安装在3个热沉上,并从侧面3向呈 120° 旋转对称抽运钕玻璃棒,其结构示意图如图2所示。

单激光二极管面阵的最大输出功率为250 W,水温 20°C 时输出波长为802 nm。进行抽运所选用的钕玻璃晶体棒尺寸为 $\phi 2 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为4%,为了减少损耗,晶体两端面镀有在1053 nm高透率为99.8%的增透膜,为消除放大的自发辐射(ASE)光振荡,钕玻璃两端面采用 1.5° 倾角设计。放大器采用集体制

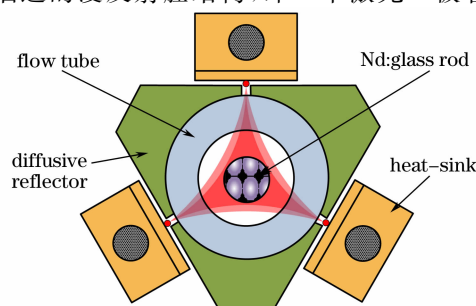


图1 漫反腔结构

Fig. 1 Structure of diffusive cavity

冷,产生的热量由在热沉中流动的去离子水带走。由于半导体激光器的输出波长随着温度的升高将出现红移,所以通过控制冷却水的温度,使其输出波长中心与钕玻璃晶体的最强吸收峰 802 nm 相匹配。

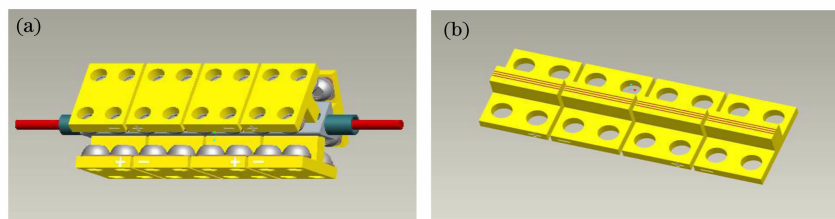


图 2 (a) 侧面抽运模块立体结构示意图, (b) 激光二极管阵列示意图

Fig. 2 (a) Three-dimensional structure of side-pumping module, (b) schematic diagram of LDA

3 实验结果及讨论

实验装置如图 3 所示。种子光源为北京国科世纪激光技术有限公司生产的高光束质量短脉宽电光腔倒空 Nd:YLF 激光器 AmberIR-1053-TEM₀₀-EQ,工作频率 1~100 Hz(在实验中取其工作频率 1 Hz),输出能量 1 mJ,脉冲宽度 3 ns,输出波长 1053 nm,模式 TEM₀₀。通过可变衰减器将注入到钕玻璃放大器中的能量调节到 10 μJ。能量计采用 Coherent 公司的 J25LP-2A 能量计,测量范围为 1 μJ~4 mJ,为了避免放大自发辐射和抽运杂光的影响,将能量卡计放置在距离放大器后端 1 m 处。

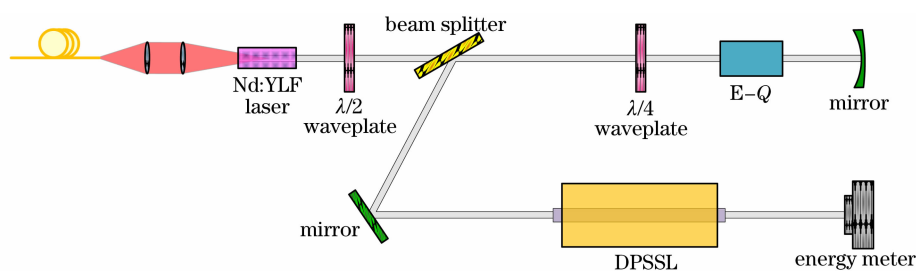


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Diagram of experimental device

图 4 为用 CCD 拍摄的钕玻璃放大器抽运场的荧光分布,由图可知,经过优化设计的侧面抽运模块抽运光强分布均匀。钕玻璃放大器的单程行波增益倍数随抽运功率的变化如图 5 所示,由图可知在总的注入峰值功率为 8.2 kW,抽运脉冲宽度为 400 μs 时,放大后的激光能量为 716 μJ,实现了 70 倍左右的增益,并且未出现增益饱和现象。

放大前后的激光脉冲波形如图 6 所示。从放大前后的脉冲波形来看,放大后的波形没有畸变,只是脉冲宽度略有变窄,同时放大后的波形图除了主脉冲外没有副脉冲,利于实际应用。代表脉冲稳定性参量的均方

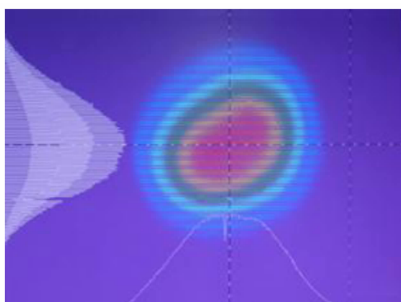


图 4 高增益放大模块的荧光光场分布
Fig. 4 Fluorescence distribution of the high-gain amplifier module

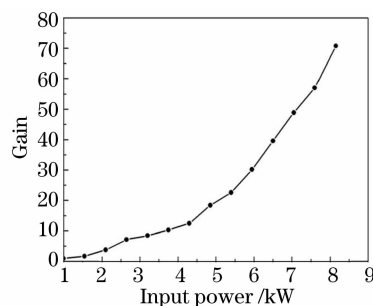


图 5 钕玻璃放大器的单程行波增益倍数随抽运功率曲线
Fig. 5 Relationship between single-pass gain multiple of the Nd:glass amplifier with pumped power

根(RMS)值 $n_{\text{RMS}} = n_{\text{STD}}/E_{\text{avg}}$, 式中 $n_{\text{STD}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - E_{\text{avg}})^2 / (n-1)}$, 为统计测量的标准差。 n 为统计测量的次数, E_i 为统计测量时的单发能量, E_{avg} 为统计测量的 n 发能量平均值。种子光的均方根不稳定性为 2.6%, 经钕玻璃放大器后光的均方根不稳定性为 2.9%, 由此表明, 放大后的脉冲光很稳定。同时, 由图 6 中放大前后示波器的幅值分别为 0.0292 V 和 2.1 V, 经钕玻璃放大器后放大了 71.9 倍, 这也从另一个方面说明所用激光二极管阵列侧面抽运钕玻璃放大器能达到 70 倍的高增益。

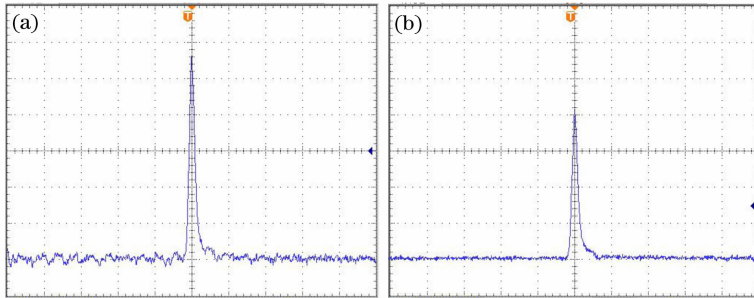


图 6 (a) 种子光脉冲波形, (b) 放大后的脉冲波形

Fig. 6 (a) Pulse oscillogram of the seed, (b) pulse oscillogram after amplification

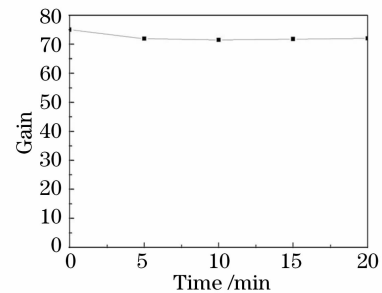


图 7 增益稳定性曲线

Fig. 7 Gain stability curve

图 7 为钕玻璃放大器增益稳定性曲线, 由图可知, 钕玻璃放大器工作 5 min 后进入稳定状态, 此后, 随着工作时间的增长, 增益变化很小。此现象表明, 直径为 2 mm 的钕玻璃棒由于具有较小的增益介质直径, 能充分被冷却, 因热沉积而产生的增益变化可忽略, 能实现稳定的增益。

4 结 论

对高增益钕玻璃放大器进行了优化设计和实验研究。考虑到所追求的高增益倍数和抽运的均匀性, 采用抽运腔为漫反腔的侧面抽运模块。为了克服激光二极管阵列排布密度低的缺点, 选用 3 个激光二极管阵列旋转对称抽运钕玻璃棒。考查抽运场的荧光分布, 发现经过优化设计的侧面抽运模块抽运光强分布均匀。对比放大前后的脉冲波形图, 放大后的波形没有畸变, 只是脉冲宽度略有变窄。从钕玻璃放大器增益稳定性曲线可知, 钕玻璃放大器工作 5 min 后进入稳定状态, 此后随着工作时间的增长增益变化很小, 说明 $\phi 2$ mm 的钕玻璃棒能充分被冷却, 实现稳定的增益。

参 考 文 献

- 1 John Vetrovec. Active mirror amplifier for high-average power [C]. *SPIE*, 2001, **4270**: 45~55
- 2 Tian Yubing, Tan Huiming, Cao Hongzhong *et al.*. Low power laser diode-pumped solid-state Yb:YAG laser at room temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 633~636
田玉冰, 檀慧明, 曹洪忠 等. 低功率激光二极管抽运的室温运转 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 633~636
- 3 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Gao Songxin *et al.*. Laser diode array pumped high-gain Nd:glass rod amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 70~76
邓清华, 彭翰生, 高松信 等. 激光二极管阵列抽运高增益钕玻璃棒状放大器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 70~76
- 4 Bi Jinzi, Xia Wenbing, Yu Ting *et al.*. Study of linear laser diodes side-pumped Nd:YAG laser with diffusive cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 6~8
毕进子, 夏文兵, 余 婷 等. 大功率线阵激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器特性研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 6~8
- 5 Zhang Shenjin, Zhou Shouhuan, Lü Huachang *et al.*. Laser-diode arrays symmetrically side-pumped thin disk laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 168~171
张申金, 周寿桓, 吕华昌 等. 激光二极管阵列侧面抽运薄片激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 168~171
- 6 Jia Wei, Li Mingzhong, Ding Lei *et al.*. Research on the large-aperture high power laser diode arrays end-pumped coupling system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(suppl): 105~107
贾 伟, 李明中, 丁 磊 等. 大口径高功率激光二极管阵列端面泵浦技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(增刊): 105~107
- 7 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2002
W. 克希耐尔. *固体激光工程*[M]. 北京: 科学出版社, 2002