

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0045-04

用于 ICF 驱动器的全 LD 泵浦高增益放大系统研究*

罗亦鸣¹, 李明中¹, 唐 军¹, 王建军¹, 傅学军¹, 贾 伟^{1,2}, 邓青华¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 四个 LDA 侧面泵浦的 Nd³⁺:YLF 激光放大器构成的高增益放大系统, 采用双通放大结构, 有效抑制了自激辐射, 具有较高的信噪比和能量转化效率, 实现了对 nJ 量级注入脉冲的 10⁶ 以上的高增益放大, 具有良好的近场分布与能量稳定性。对系统的工作特性进行了研究, 实现了工程化设计, 已成功应用于大型 ICF 驱动器的能量预放大级。

关键词: LDA; 侧面泵浦; 高增益放大

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

LDA 侧面泵浦具有高泵浦效率, 高稳定性, 结构紧凑, 性能可靠等优点^[1]。Nd³⁺:YLF 晶体具有较宽的带宽, 长的荧光寿命, 较强的自然双折射和弱的热透镜效应, 适于长脉宽 LDA 泵浦与实现较高的能量转化效率^[2]。在大型 ICF 激光驱动器中, 为满足后级对注入脉冲的能量要求, 需要对前级弱光信号进行高增益放大。使用全 LD 侧面泵浦的高增益放大系统对前端系统输出的 nJ 量级整形脉冲进行重复频率的高增益放大, 增益高达 10⁶ 以上, 光束质量优良, 性能可靠, 结构紧凑, 多套高增益放大系统的输出易于同步, 目前已实现工程化建造并稳定运行长达一年。

1 系统简介

1.1 系统结构概述

高增益放大系统采用激光脉冲在系统内往返一次的双通放大构型, 光路布局如图 1 所示。

前端光纤系统产生的 1 053 nm 的 nJ 级整形激光脉冲, 经准直成为 $\phi 2$ mm 的准平行光, 注入高增益放大系统。在准直器后由格兰棱镜与法拉第旋光器组成隔离系统, 以隔离反激光。其后由薄膜偏振片、法拉第旋光器、45° 转子、格兰棱镜组成双通光路的导入与导出系统, 45° 转子是为避免出现 45° 偏振态, 方便系统调试。然后是四个激光放大器组成的放大链, 每台放大器峰值泵浦功率最大为 2.5 kW, 行波法实测单程小信号增益超过 10, 增益介质是 $\phi 3$ mm 的 c 轴切割 Nd³⁺:YLF 棒。在放大链的中间和末尾加入两个 KTP 电光隔离器^[3], 消光比大于 100:1, 有效抑制了级间自激振荡。最后是 0° 全反射镜, 实现双通放大。放大的激光脉冲从薄膜偏振片反射输出。所有元器件采用紧密排列的形式, 光束按照自身发散角在其中自由传输, 在末端输出直径略大于 $\phi 2$ mm 光束。

1.2 激光放大器简介

激光放大器采用环形 LDA 侧面泵浦耦合结构^[4]。环形 LDA 是将激光 bar 封装在半环形的铜热沉上构成的, 一个放大器中有两个这样的 LDA, 每个 LDA 的最大峰值功率 1.25 kW, 工作时 LDA 发光面相对, 形成一个圆环, 对放置在中心的 Nd³⁺:YLF 棒进行侧面泵浦。这种泵浦结构和激光放大器的结构见图 2。工作时半导体致冷器调控 LDA 铜热沉的温度, 调节泵浦波长对准介质吸收峰, 废热由循环冷却水带走。

2 理论分析与实验结果

2.1 放大器性能分析与实验结果

LDA 侧面泵浦的 Nd³⁺:YLF 放大器是高增益系统的核心器件, 其工作特性直接决定了整个系统的性能,

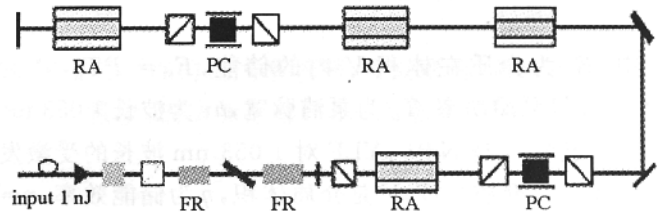


Fig. 1 Schematic of high-gain amplifier system

图 1 高增益放大系统光路布局图

* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-04-07

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 罗亦鸣 (1977—), 男, 主要从事二极管泵浦固体激光技术研究; 绵阳 919-988 信箱; E-mail: lym1116@tom.com.

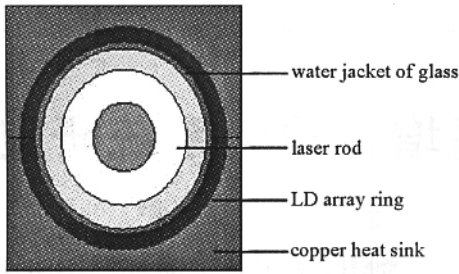


Fig. 2 Structure schematic diagram

图 2 环形泵浦结构示意图

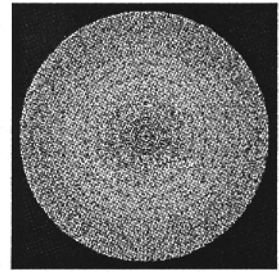


Fig. 3 Schematic diagram of energy deposit on a cross section of Nd:YLF rod

图 3 Nd:YLF 棒横截面上的能量沉积示意图

从理论和实验等方面对放大器的工作特性进行分析。

2.1.1 放大器的泵浦耦合效率

受放大器结构限制,难以对泵浦光的损耗与吸收进行直接测量,因此利用光线追迹的数值模拟方法和定性的判断实验对泵浦耦合效率进行了研究。利用模拟程序计算了泵浦耦合效率以及能量沉积的均匀性,结果如图 3 所示计算表明,这种泵浦结构的耦合效率一般可以达到 90% 以上,泵浦光的能量有向介质棒中央集中的倾向。采用一种半定量的实验方法对计算结果进行了定性判断。在介质两端放置滤波片,滤除荧光成分,探测逸出的泵浦光能量,结果如表 1 所示。可见,逸出腔外的泵浦能量确实很小,大部分的能量被约束在腔内进行泵浦。

表 1 泵浦电流与逸出能量

Table 1 Pump power and escaped energy

LDA current/A	pump power/mJ	escaped energy/ μ J
30	260	42.3
60	936	150.9
80	1 196	201.8

2.1.2 放大器的小信号增益

从理论计算,数值模拟和实验测量等方面对放大器的小信号增益进行了研究。

放大器的小信号增益公式为^[1]

$$G = \exp\left(\frac{E_{st}\eta}{h\nu V}\sigma l\right) \quad (1)$$

式中: E_{st} 为介质在体积 V 内的储能, $E_{st} = PT_p$, P 为 LDA 峰值泵浦功率, T_p 为泵浦脉宽, $h\nu$ 为波长 1 053 nm 的光子能量, σ 是 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 对 1 053 nm 波长的受激发射截面, l 是介质长度, V 是介质体积, η 为储能效率, $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 f_a$, 其中 η_1 为泵浦耦合效率, η_2 为介质对泵浦光的吸收效率, η_3 为量子效率, η_4 为泵浦效率, f_a 为上激光能级玻尔兹曼热分布系数。将各项数值代入公式(1),求得放大器的小信号增益与泵浦功率的关系如图 4 所示。

采用行波放大法实测了放大器的单程小信号增益,注入激光的脉宽为 26 ns,能量约为 30 μ J。小信号增益(净增益)定义为放大器输出能量与注入能量之比。实验测得了增益系数与泵浦功率的关系,如图 5 所示。可以看

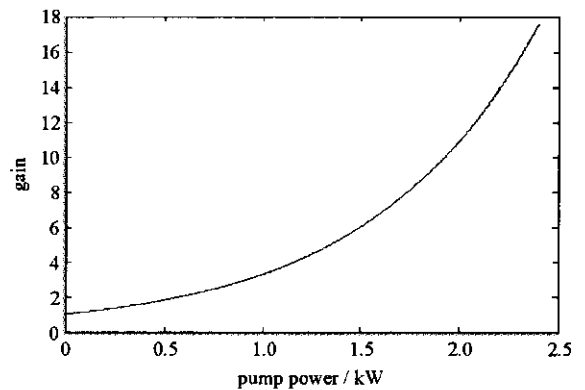


Fig. 4 Curve of pump power and small signal gain

图 4 泵浦功率与小信号增益曲线

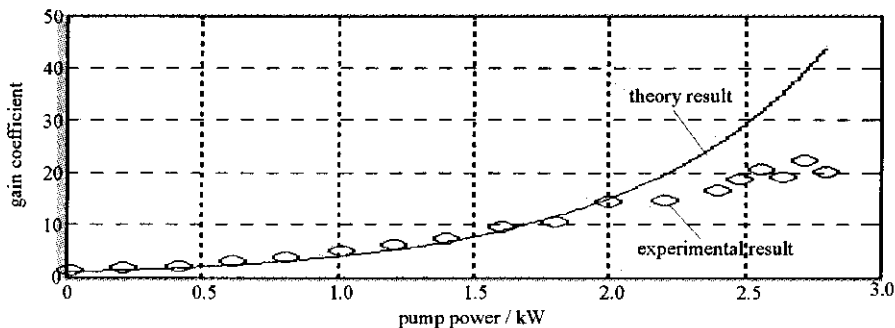


Fig. 5 Pump power and small signal gain by experiment

图 5 实测小信号增益与泵浦功率关系

出,放大器小信号增益(净增益)最大为约 20。

比较理论计算及实验结果可以看出,当泵浦功率比较低时,二者吻合很好,当泵浦功率高于 2 kW 后,实测增益比理论计算要低。主要原因在于,当泵浦电流加大时,LD 瞬间发热不能及时被导走,导致结温升高,发射光谱漂移,从而降低了晶体的吸收效率,导致增益下降,泵浦电流越大,此种现象越明显。

2.1.3 放大器增益均匀性

由于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 棒太细,并且放大器结构特殊,所以使用了较粗略的阈值法大致说明了放大器的增益分布。具体做法是,在放大器两端分别放置有一定反射率的腔镜和全反射镜组成谐振腔,在棒的一端放置遮光板,依次在离端面中心 1.5 mm 处,1 mm 处和 0 mm 处开一个小孔,更换腔镜反射率,调节泵浦电流,观察起振的阈值条件。结果发现,在实验的精度范围内,三种情况起振的条件没有明显差别,起振的阈值反射率为 40%,阈值电流为 28 A。因此可以认为,放大器横截面内的增益分布是比较均匀的。

2.1.4 放大器的热效应

由于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 的自然双折射以及环形 LDA 泵浦的高效性,放大器的热效应并不明显^[1]。通过实验验证了这一结论。在重复频率为 1 Hz, LDA 驱动电流为 90 A(泵浦功率约为 2.5 kW)时,测量了放大器的热透镜有效焦距,结果没有发现明显的热透镜效应。此外还对热致双折射进行了研究。图 6 为实验测得的退偏损耗与泵浦功率的关系。可以看出,退偏损耗很小,仅为 1.3%左右。

2.2 高增益放大系统的性能

按前面的设计建立了高增益放大系统,并对其性能进行了理论和实验的研究。

2.2.1 系统总增益能力计算与测量

取每个激光放大器的小信号增益为 10,依次代入光路中各元件的透过率数据,可以求得,系统小信号总增益达到 4.41×10^7 ,达到设计要求。因为系统注入能量为 nJ 量级,输出能量也只是 mJ 量级,根据 F-N 方程

$$G = \exp\left(\frac{E_s}{E_{in}}\right) \ln\{1 + [\exp\left(\frac{E_{in}}{E_s}\right) - 1]G_0\} \quad (2)$$

在系统最后一级放大器注入处,依然满足 $E_{in}/E_s \ll 1$ 的条件,因此 $G \approx G_0$,依然是小信号增益,因此信号在经历了双程放大以后,不会因为饱和效应而发生明显的畸变。

对系统增益特性进行测量,系统的注入条件:脉冲宽度为 3.14 ns;脉冲波形为梯形脉冲;脉冲能量约 2 nJ;注入损耗约 50%;注入能量约 1 nJ。实验测得,高增益放大系统的总增益与泵浦电流有如表 2 所示关系。

表 2 泵浦电流与系统增益

Table 2 Gain of the high gain system and pump power

pump current / A	output energy / mJ	gain/ 10^6
40	0.013	0.01
45	0.133	0.04
50	0.426	0.14
55	1.211	0.4
60	2.94	0.98
65	7.07	2.36

2.2.2 系统输出脉冲波形与近场分布

由于系统工作在未饱和放大状态,注入脉冲的波形可

以得到很好的保持,由 TEK TDS6604 高速数字示波器采集的系统输出脉冲波形与注入波形的对比如图 7 所示。可见,双程高增益放大确实没有带来明显的信号畸变。系统的输出具有较好的近场分布,CCD 如图 8 所示。

2.2.3 系统输出稳定性

在系统设置工作点处进行了连续 100 发考核,输出能量的稳定性为(RMS)4.9%(含光纤系统输出起伏),系统连续 20 发输出的增益数据如图 9 所示。

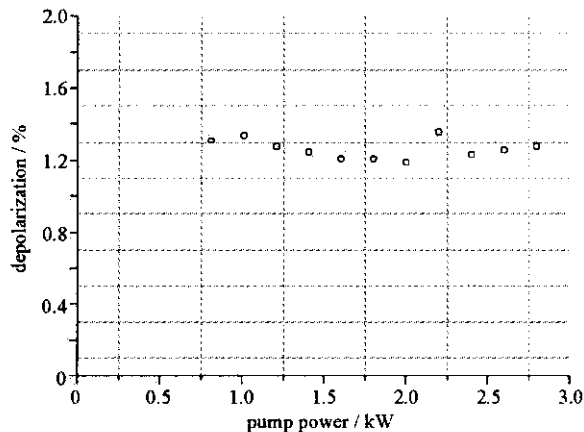


Fig. 6 Relation between pump-power and depolarization

图 6 泵浦功率与退偏损耗

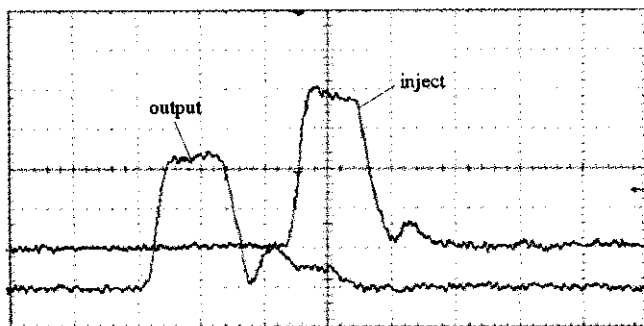


Fig. 7 Time shape of inject and out put

图 7 注入与输出波形对比

2.2.4 系统自激振荡的抑制

在高增益放大系统中,因为激光往返通过四个激光放大器,增益介质总长度达到 80 mm,反射面数量较多,由全反射镜与增益介质之间以及介质界面的剩余反射较易引起自激振荡。采用如下手段抑制自激振荡的发生:YLF 棒端面镀 1 053 nm 增透膜,以使剩余反射减小到最低;在激光放大链的中间和末尾各增加一个 KTP 电光隔离开关,通过精确调节开关的延时,可以将系统自激的风险减到最低。采取以上措施后,系统自激的阈值条件明显提高,只在泵浦电流达到 90 A 以上时偶尔会产生较弱的自激振荡。

3 结 论

通过理论分析,实验研究以及长时间的运行考核,证明了采用环形 LD 侧面泵浦方式的全 LD 高增益放大系统的设计是成功的。经工程化设计后,高增益放大系统已应用于神光 III 原型装置的前端系统。经过数个月的研制与数周的连续运行考核,性能达到设计要求;历经一年多的日常运行,性能稳定,运行良好,满足了原型装置的需求,且具有很大潜力。在进行性能和结构的优化设计后,高增益放大器有望在科研和商用领域得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] Koechner W. Solid-state laser engineering. Berlin:Springer-Verlag, 1996.
- [2] Jones C R, Avizonis P V, Sivgal P. Experimental investigation of the behavior of neodymium-glass laser amplifiers[J]. *NBS Spec, Pub*, 1970, **28**:341.
- [3] 卢秀全, 陈绍和. KTP 电光开关[J]. *中国激光*, 1999, **26**(4):321—324. (Lu X Q, Chen S H. KTP electro-optic switch. *Chinese Journal of Laser*, 1999, **26**(4):321—321)
- [4] 罗亦鸣, 李明中, 秦兴武, 等. 大功率环形 LD 侧面泵浦 Nd³⁺:YLF 激光器的特性[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3):331—333. (Luo Y M, Li M Z, Qin X W, et al. Study on ring-LD side-pumping solid laser. *High Power Laser And Particle Beams*, 2002, **14**(3):331—333)

Diode-pumped high-gain amplifier system

LUO Yi-ming¹, LI Ming-zhong¹, TANG Jun¹, WANG Jian-jun¹, FU Xue-jun¹, JIA Wei^{1,2}, DENG Qing-hua¹

(1. Research Center of Laser Fusion, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China;

2. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A LDA side-pumped high-gain amplifier system with a dual-pass geometry is reported in this paper. According to the requirement of ICF driver, four ring-LD side-pumping Nd³⁺:YLF amplifiers are used in this system. More than 10⁶ gain are achieved when input pulse energy is several nJ at 1 053 nm, the output pulse has good energy stability and perfect near-field distribution.

Key words: Diode-pumped; High-gain amplifier; Nd³⁺:YLF; Dual-pass

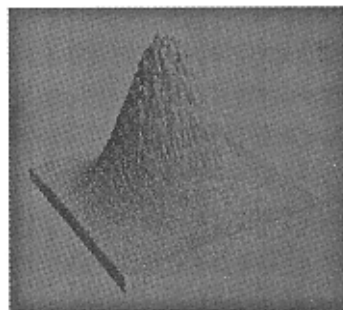


Fig. 8 Near field of output by CCD

图 8 CCD 采集的系统输出近场

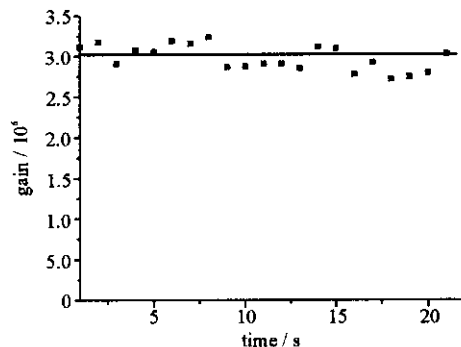


Fig. 9 Stability of output

图 9 系统输出稳定性