

文章编号: 1001-4322(2004)09-1148-05

高功率 LDA 紧密侧面抽运 Nd:YLF 两级 双程离轴放大系统实验研究*

张申金^{1,2}, 冯国英¹, 李明中², 丁磊², 隋展², 林宏奂²,
王衍勇³, 欧群飞¹, 唐军², 罗亦鸣²

(1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;
3. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 介绍了一台 $\phi 10\text{mm}$ 口径两级双程离轴放大系统, 实现了对 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 口径光束的激光放大, 耦合系统采用高功率 LDA 紧密侧面直接抽运棒状 Nd:YLF 方式。分析并实验研究了在不同抽运电流、放大脉冲与放大器 LDA 抽运时刻的不同延时及不同注入能量条件下, 放大系统及光束每次放大时放大特性的规律。实验得到: 在放大系统 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 软光阑处注入 1.58mJ 能量时, 放大系统可输出 129.2mJ 能量, 能量提取效率达到 19.5% , 满足该系统的设计指标。

关键词: LDA 紧密侧面抽运; Nd:YLF 激光放大器; 两级双程离轴放大; 放大特性

中图分类号: TN248.13

文献标识码: A

随着大功率半导体激光器(LD)的发展, 半导体抽运固体激光器(DPSSL)以其体积小、效率高、长寿命和全固态等优点成为新型激光器的发展热点^[1], 采用 LDA 代替预放大级多程放大器中的闪光灯作为泵浦源, 其突出优点为输出能量的不确定性小、光束质量高及重复频率高等^[2], 可克服闪光灯泵浦时带来的热退偏和其它副作用, 同时也能够大大提高整个驱动器系统的运转效率、稳定性和成功率。Nd:YLF 晶体具有较长的荧光寿命^[3], 比较适合于用功率受限型泵浦源 LD 进行泵浦, 可充分发挥激光二极管的潜力。

本文介绍了 DPL 重复频率多程放大系统, 该放大系统采用两级双程离轴放大方案, 耦合系统采用简单且有效的高功率 LDA 紧密侧面直接抽运棒状 Nd:YLF 方式。本文对激光放大系统在不同抽运电流及注入能量下的放大特性进行了初步的理论及实验研究^[4~6]。

1 理论基础

假设放大器作用时间比抽运速率和自发发射时间短, 反转粒子数密度在整个介质中是均匀的, 放大过程以输入信号到达之前能量就储存在激光上能级为基础。当输入脉冲通过工作物质时, 原子被激发而释放出所储存的能量。假设注入到放大器的脉冲是一矩形脉冲, 根据速率方程, 在忽略脉冲持续时间内荧光、抽运的影响及介质吸收损耗的情况下, 可得到放大器的单程增益 G 和单程输出能量密度 E_1 为^[7]

$$G = \frac{E_s}{E_0} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{E_0}{E_s} \right) - 1 \right] G_0 \right\} \quad (1)$$

$$E_1 = E_0 G \quad (2)$$

式中: E_0 为输入脉冲能量密度; E_s 为饱和能量密度; G_0 为小信号单程增益, 可表示为

$$G_0 = \exp(g_0 l) = \exp(\Delta n \sigma l) = \exp \left(\frac{P \tau \eta}{h \nu V} \sigma l \right) \quad (3)$$

式中: g_0 为小信号增益系数; l 为增益介质有效长度; Δn 为反转粒子数密度; σ 为受激发射截面; P 为激光放大器抽运功率; τ 为抽运脉宽; η 为储能效率; $h\nu$ 为光子能量; V 为增益介质的有效体积。(1), (2) 式适用于小信号增益到放大器完全饱和。

放大器能量提取效率指从放大器提取的能量与脉冲到达时上激光能级存储的能量之比, 表示为

$$\eta_1 = \frac{E_1 - E_0}{g_0 l E_s} \quad (4)$$

* 收稿日期: 2004-01-06; 修订日期: 2004-06-01

基金项目: 国家自然科学基金委-中国工程物理研究院联合基金资助课题(10176019)

作者简介: 张申金(1978—), 男, 山东泰安人, 研究生, 从事高功率激光器与光通信等方面的研究; E-mail: zhshjin@sina.com。

由以上各式可得出结论:激光放大器的增益、输出能量密度随增益介质长度及储能的增大而增大;激光放大器的增益随输入能量密度的增加而下降。输入能量密度较小时,增益下降得较快;输入能量密度较大时,增益下降趋势变得较为缓慢;激光放大器输出能量密度及能量提取效率随输入能量密度的增大而增大。输入能量密度较小时,输出能量密度及能量提取效率随着输入能量密度的增加而近似成线性关系增加;输入能量密度较大时,输出能量密度随着输入能量密度的增加还是近似成线性增加,能量提取效率增大趋势变得较为缓慢,最后趋近于 100 %。

以上各式也同样适用于多级放大系统。在多级放大系统中,上一级的输出即为下一级的输入。

2 实验装置及结果

2.1 实验装置

放大系统实验装置如图 1 所示,主要由振荡器、预放大系统、90° 转子及扩束系统、放大系统四部分组成。实验装置各个器件分别为:1—振荡器;2,12,15—薄膜偏振器;3,13—45° 法拉第隔离器;4—激光预放大器;5,19—0° 全反镜;6,7—伺服反射镜;8—90° 转子;9—扩束系统;10—5mm×5mm 软光阑;11—分束镜;14—45° 转子;16,18—三角形直角棱镜;17—像传递空间滤波器;20,21—Nd: YLF 激光放大器;22,23—能量计。

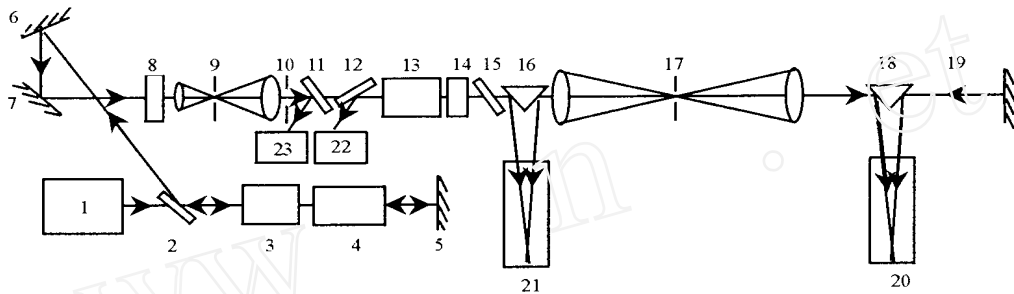


Fig. 1 Experiment set-up of amplifying system

图 1 放大系统实验装置光路图

激光放大器采用简单且有效的侧面紧密直接抽运耦合方式^[2,8],圆柱状 Nd: YLF 棒放置其间。棒的有效抽运长度为 10mm,直径为 $\phi 10\text{mm}$,一端面镀有 $1.053\mu\text{m}$ 的全反膜。对 LDA 及 Nd: YLF 棒采用自动温度控制仪和冷却水箱分别进行有效的温度控制。

振荡器 1 采用电光调 Q 激光振荡器,振荡器输出约 1.5mJ 水平偏振的激光脉冲。预放大系统由薄膜偏振器 2,45° 法拉第隔离器 3、激光预放大器 4 及 0° 全反镜 5 组成,采用偏振耦合输出双程放大构型。激光脉冲从预放大系统输出,通过 90° 转子 8 后,水平偏振进入由焦距为 18 的两个透镜组成的扩束系统 9,然后进入放大系统。放大系统由 5mm×5mm 方形软边光阑 10、薄膜偏振器 12 及 15,45° 法拉第隔离器 13,45° 转子 14、三角形直角棱镜 16 及 18、激光放大器 20 及 21、像传递空间滤波器 17 及 0° 全反镜 19 组成。方形软边光阑对注入光束进行整形,三角形直角棱镜的两个直角面镀有 $1.053\mu\text{m}$ 的 45° 全反膜。放大后的激光脉冲由薄膜偏振器 12 及 15、法拉第隔离器 13 及 45° 转子 14 组成的导出系统垂直偏振引出。两个能量计 22 及 23 分别用于测量从分束镜分束的注入放大系统的能量,以及放大系统最后输出的能量,实验测得放大系统的静态透过率为 30.9 %。

方形光束在放大系统传输过程中满足像传递的物像关系。5mm×5mm 软边光阑、像传递空间滤波器的两个透镜及 0° 全反射镜组成放大系统的 $4f$ 系统,其中 5mm×5mm 软边光阑是整个激光放大系统像传递的最初物像,位于像传递空间滤波器的前焦面上,光束被放大后传递到放大系统的输出像平面上。焦距为 50cm 的透镜组成的像传递空间滤波器的引入,可以消除光束中的高频空间调制,同时由于像传递作用增加了激光放大器的有效利用孔径,提高了激光系统的输出功率,且还能够起到隔离超辐射和反向激光的作用。实验采用的两级双程离轴放大构型,减少了放大器的热退偏效应产生的漏光对前后级的影响,也抑制了自激振荡。0° 全反镜增大了注入脉冲在增益介质的传输光程,减少了放大器数量,可以用简单的结构获得较高的系统增益。放大系统每个激光放大器 LDA 的抽运功率为 4kW,抽运频率为 1Hz,抽运占空比为 0.052 %,注入脉冲与放大器抽运时刻延时为 520 μs ,实验得到两个激光放大器的双程小信号增益为 5.35 和 5.25^[8]。采用同步脉冲发生器使振荡器输出脉冲和激光放大器 LDA 抽运时刻保持精确的延时。

2.2 实验结果

用示波器得到电光调Q振荡器输出脉冲经过预放大系统后的波形如图2所示,从图2可以看出放大脉冲宽约28ns。

实验采用“V”形双程离轴行波放大结构测量放大系统的增益,改变预放大系统及放大系统中LDA的抽运电流,从而改变放大系统的注入能量及储能密度,得到不同注入能量时,放大系统净增益(不包括损耗)与放大系统抽运电流的关系如图3所示。由图3可以看出一定注入能量时,净增益随抽运电流增大而增大,这是因为棒内储能密度随抽运电流增大而增大;抽运电流一定时,增益随注入能量增大而减小,这是因为注入能量增大,单个激光放大器的增益减小。

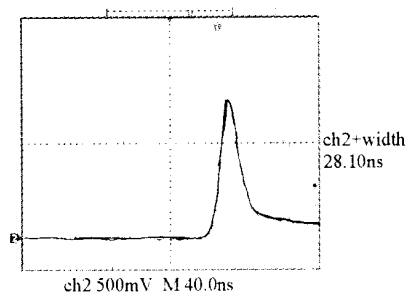


Fig. 2 Pulse after pre-amplification

图2 预放大后波形

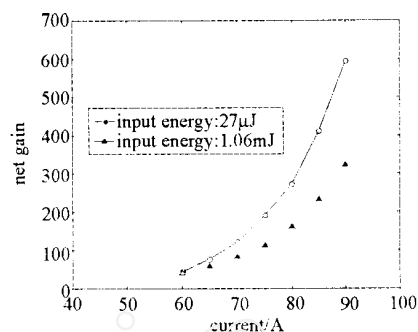


Fig. 3 Net gain of amplifying system vs current for input energy

图3 不同注入能量时,放大系统净增益与抽运电流关系

实验及模拟得到放大系统净增益与注入能量的关系如图4所示,其中放大系统抽运电流为90A。从图中可以看出随着注入能量的增大,放大系统的净增益逐渐减小。这是因为注入能量增大时,单个激光放大器的增益逐渐减小。实验得到:放大系统5mm×5mm软光阑处注入能量为1.58mJ时,放大系统净增益为272,模拟结果为366。由于采用了离轴放大构型,实验中没有观察到自激振荡现象。

相同条件下实验及模拟得到的放大系统输出能量与注入能量关系曲线如图5所示。从图中可以看出,注入能量增大时,放大系统输出能量逐渐增大,但增大的趋势逐渐缓慢。实验得到:5mm×5mm软光阑处注入1.58mJ能量时,放大系统最后输出能量可达到129.2mJ,能量提取效率为19.5%,模拟结果为输出能量为184.4mJ,能量提取效率为27.9%。

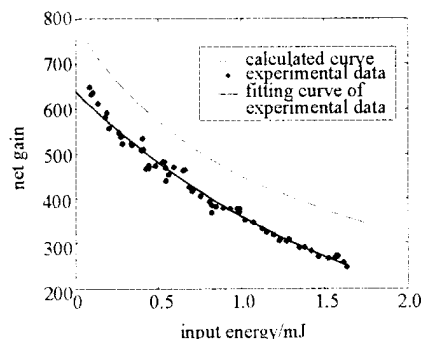


Fig. 4 Net gain of amplifying system vs input energy

图4 系统净增益与注入能量关系

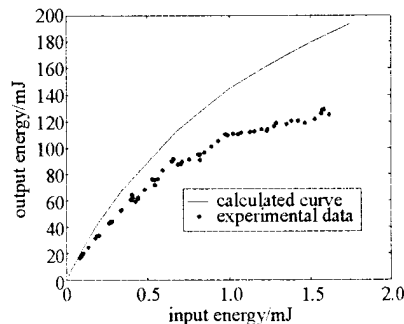


Fig. 5 Output energy of amplifying system vs input energy

图5 系统输出能量与注入能量

模拟结果偏大是因为模拟过程中,未考虑热致退偏造成系统的漏光、增益介质的吸收损耗、冷却水和冷却玻璃管的反射和吸收及棒的反射和折射等造成的损耗。

3 模拟结果

相同条件下,根据实验结果,本文对不同注入能量情况下,光束在放大系统内每次放大时的放大特性进行了计算模拟,模拟也考虑了实验元件的损耗。为了方便,将实验装置图1简化,等效实验光路如图6所示,图中1~8表示光束通过放大器时被放大的次序。

模拟得到不同注入能量情况下,光束在传输过程中,每次放大时的净增益、输出能量及能量提取效率结果如图7、8和9所示。

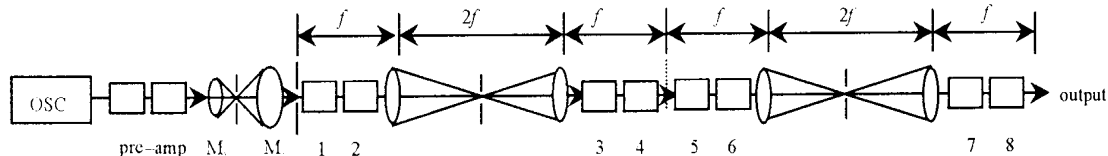


Fig. 6 Equivalent experiment set-up

图6 等效实验光路图

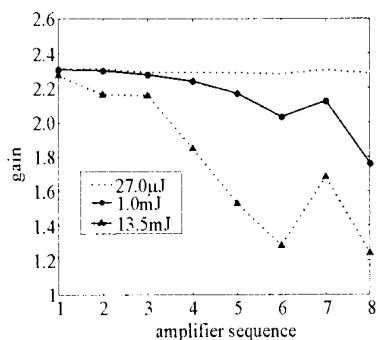


Fig. 7 Net gain of each amplification for different input energy

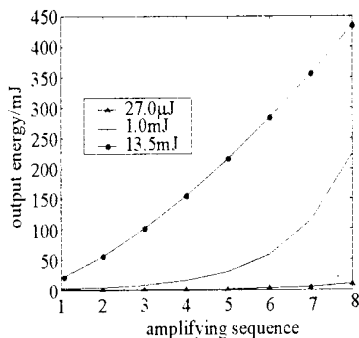
图7 不同注入能量时,光束
每次放大时净增益

Fig. 8 Output energy of each amplification for different input energy

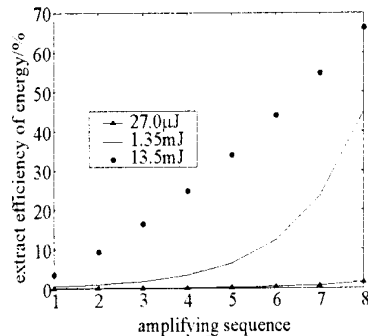
图8 不同注入能量时,光束
每次放大时输出能量

Fig. 9 Energy extract efficiency of each amplification for different input energy

图9 不同注入能量时,光束
每次放大时能量提取效率

从图7可以看出:不同注入能量情况下,光束每次放大时增益的变化趋势相同。随着光束在放大系统内传输,光束内能量密度逐渐增大,导致每次放大时增益持续降低。第7次放大时增益有所增加,是因为第7次放大时,尽管注入能量较大,但由于第一个激光放大器第一次双程放大时能量提取效率较小,棒内剩余反转粒子数密度即储能较大,所以总体效果使得增益有所增加;注入能量越大时,增益越小。注入能量为 $27\mu\text{J}$ 时,通过放大器1~8次的增益是要变化的,而且变化趋势和注入能量为1.0和13.5mJ时的变化趋势是一致的^[9],但是变化的幅度较注入能量为1.0和13.5mJ时增益的变化幅度要小得多,所以在图7中,注入能量为 $27\mu\text{J}$ 时,增益的变化较后两者的变化不明显。

从图8,9可以看出:不同注入能量情况下,光束每次经放大时的输出能量及能量提取效率均持续增大,且变化趋势分别相同,这是因为随着光束在介质内不断传输,经过的增益介质长度逐渐增加,光脉冲内能量不断得到放大,每次放大时光束内能量密度及能量提取效率即持续增加。注入能量较小时,输出能量及能量提取效率与放大次数近似成指数关系增加,这是因为此时每个激光放大器均处于小信号增益放大阶段,放大时输出能量及能量提取效率与增益介质长度近似成指数关系,随着光束在介质内不断传输,增益介质长度不断增加,每次放大时输出能量及能量提取效率即成指数增加。当注入能量进一步增大时,输出能量及能量提取效率随着放大次数的增加而近似成线性增加,这是因为此时每个激光放大器输出能量及能量提取效率与增益介质长度近似成线性关系,所以每次放大的输出能量及能量提取效率与放大次数近似成线性关系。注入能量越大,光束每次放大的输出能量及能量提取效率也越大。注入能量为 $27\mu\text{J}$ 时,输出能量及能量提取效率较注入能量为1.0mJ及13.5mJ时输出能量及能量提取效率要小得多,所以在图8,9中,注入能量为 $27\mu\text{J}$ 时的输出能量及能量提取效率贴近日轴。

4 结 论

本文介绍了DPL重复频率多程放大级的实验装置,对其放大特性进行了初步的理论分析及实验研究。放大系统采用两级双程离轴放大构型,耦合系统采用简单且有效的高功率LDA侧面紧密直接抽运棒状Nd:YLF方式。实验和模拟结果表明:高功率LDA侧面紧密抽运棒状Nd:YLF激光放大器及两级双程离轴放大系统构型具有几何结构紧凑简单、转换效率高、有效的抑制自激振荡等优点;同时降低了输入输出通量,减少了对前端注入能量的要求,减少了光学元件的种类、所占用的空间及造价。实验得到:放大系统在 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 软光阑处,注入1.58mJ水平偏振的方形光束时,最后输出129.2mJ垂直偏振的 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 方形光束,能量提取效率达到19.5%,实验和模拟吻合较好,满足该放大系统的设计要求。

参考文献:

- [1] 刘敬海, 徐荣甫. 激光器件与技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995. (Liu J H, Xu R P. Laser devices and technology. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995)
- [2] 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)
- [3] 秦兴武, 陈良明, 李明中, 等. 端面泵浦 Nd:YLF 激光放大器研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2):181—184. (Qin X W, Chen L M, Li M Z, et al. Study on laser-diode-end-pumped Nd:YLF laser amplifier. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2):181—184)
- [4] Avizonis P V. Experimental and theoretical ruby laser amplifier dynamics[J]. *J Appl Phy*, 1966, **37**(2): 687—693.
- [5] Lowdermilk W H. The multi-pass amplifier: theory and numerical analysis[J]. *J Appl Phy*, 1980, **51**(5): 2436—2444.
- [6] Murray J E. Off-axis multipass amplifier as a larger aperture driver stage for fusion lasers[J]. *Appl Opt*, 1981, **20**(5): 826—834.
- [7] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- [8] 张申金, 欧群飞, 冯国英, 等. 高功率环形激光二极管阵列重复脉冲抽运激光器中棒的瞬态温度分布[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(2): 145—148. (Zhang S J, Ou Q F, Feng G Y, et al. Analysis of transient temperature distribution in laser rod pumped by repetitively pulsed high power ring LDA. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(2): 145—148)
- [9] 张申金, 冯国英, 李明中, 等. 高功率 LDA 紧收缩球绕抽运 Nd:YLF 放大器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(6):754—758. (Zhang S J, Feng G Y, Li M Z, et al. Experimental research of Nd:YLF laser amplifier tightly ring-pumped by high power LD array. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6):754—758)

Experimental study on Nd:YLF two-stage double-pass off-axis amplifying system tightly-side-pumped by high power LD array

ZHANG Sheng-jin¹, FENG Guo-ying¹, LI Ming-zhong², DING Lei², SUI Zhan²,
LIN Hong-huan², WANG Yan-yong³, OU Qun-fei¹, TANG Jun², LUO Yi-ming²
(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064 China;

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

3. College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A $\phi 10\text{mm}$ caliber two-stage double-pass off-axis amplifying system was described, and the $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ caliber laser pulse was amplified. The coupling system of high power LD array tight-side directly-pumping Nd:YLF rod was used. The characters of amplifying system and each amplification in different pump currents and input energy were analyzed by theory and experiment. In experiment when 1.58mJ energy was injected into the soft $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ diaphragm, 129.2mJ energy was output, and energy extract efficiency was 19.5% .

Key words: LDA tightly-side-pumping; Nd:YLF laser amplifier; Two-stage double-pass off-axis amplification; Amplifying system