

百焦耳级有源反射镜钕玻璃激光放大器

刘晶¹, 李磊¹, 陈汝凤¹, 施翔春¹, 刘秋菊^{1,2}, 杨中国¹, 王建磊^{1*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 搭建了一套氙灯抽运的有源反射镜钕玻璃激光放大器系统。实验研究了有源反射镜钕玻璃激光放大器的增益特性及能量提取。钕玻璃几何尺寸为 380 mm×160 mm×30 mm, 掺杂浓度为 2.2 % (质量分数)。充电电压为 23 kV 时, 实验测得系统的小信号增益系数为 0.056 cm⁻¹, 储能效率为 2.0%。充电电压为 22 kV 时, 输出激光光斑尺寸为 126 mm×126 mm, 脉冲宽度为 5 ns; 预放注入能量为 6.67 J 时, 激光放大器系统获得最大为 349 J 的能量输出。系统静态波前峰谷(PV)值为 8.38λ。

关键词 激光器; 激光放大器; 高功率激光; 有源反射镜; 钕玻璃; 氙灯

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0501001

100 J Level Active Mirror Nd:Glass Laser Amplifier

Liu Jing¹, Li Lei¹, Chen Rufeng¹, Shi Xiangchun¹, Liu Qiuju^{1,2},
Yang Zhongguo¹, Wang Jianlei¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The structure of active mirror Nd:glass laser amplifier is presented, which is pumped by Xe-lamps. The gain characteristics and energy extraction of the active mirror Nd:glass laser amplifier are experimentally studied. The size of Nd:glass is 380 mm×160 mm×30 mm, and the doping concentration of Nd:glass is 2.2% (mass fraction). Experimental results show that when the charging voltage is 23 kV, the small signal gain coefficient of the system is 0.056 cm⁻¹, and the energy storage efficiency is 2.0%. The spot size of the output laser is 126 mm×126 mm and the pulse width is 5 ns when the charging voltage is 22 kV. The laser amplifier obtains the maximum output energy of 349 J when the injected energy is 6.67 J. The peak to valley (PV) value of the static wavefront of the system is 8.38λ.

Key words lasers; laser amplifier; high power laser; active mirror; Nd:glass; Xe-lamp

OCIS codes 140.3280; 140.3460; 140.3538

1 引 言

有源反射镜构型多采用正面或背面抽运方式, 与透射构型相比有两方面优势: 一方面, 可以实现激光光束单程双通放大, 单程增益高, 能量提取效率高; 另一方面, 激光增益介质表面可以通过直接接触增益介质表面的流体而进行冷却, 能够更加有效地解决激光增益介质的散热问题, 非常适合高重频高

功率激光系统。近年来, 有源反射镜构型因其独特的优势而广泛应用于激光二极管抽运的薄片激光系统中^[1-2]。德国斯图加特大学 Giesen 等^[3-4]研制的薄片激光器、日本大阪大学^[5-6]报道的低温陶瓷激光器和法国 LUCIA^[7-8]激光装置均采用了激光二极管抽运有源反射镜构型。国内, 中国工程物理研究院^[9]采用有源反射镜构型搭建了一套 10 Hz Yb:YAG 薄片激光器, 获得 3.3 J 脉冲能量输出。2013

收稿日期: 2017-11-20; 收到修改稿日期: 2017-11-30

作者简介: 刘晶(1988—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: liujing3718@163.com

* 通信联系人。E-mail: wangjl@siom.ac.cn

年,上海光机所施翔春课题组^[10]采用低温下的 Yb:YAG 薄片激光放大系统获得了 6.05 J、1 Hz 脉冲激光输出。2015 年,清华大学^[11]报道了激活反射镜 Nd:YAG 激光放大系统,该系统获得了 20 Hz、2 J 激光脉冲输出。2012 年,本课题组^[12]实验探究了有源反射镜钕玻璃激光放大器的增益特性及横向放大自发辐射和氙灯发光效率对增益特性的影响。

磷酸盐钕玻璃具有荧光寿命长、吸收光谱带宽、高储能以及尺寸大等特点而被广泛应用于高功率激光系统中^[13]。本文在原有实验经验积累基础上设计并搭建了一套氙灯抽运、百焦耳级有源反射镜钕玻璃激光放大系统,实验研究了该激光放大系统的增益特性及能量提取。

2 实验装置及特点

实验装置如图 1 所示,整个装置包括种子源、预放大系统和主放大系统。种子源输出中心波长为

1053 nm 单纵模、水平偏振、5 ns 的方波脉冲。种子源输出激光光束经预放大系统进行光束整形及能量放大,最终输出光斑尺寸为 27 mm×27 mm,最大输出能量为 10 J。预放大器输出光束经 L1 和 L2 空间滤波器透镜组后扩束为 126 mm×126 mm 光斑(光束离轴入射到透镜 L2 上),光束经过窗口镜 W2 以布儒斯特角入射到 1# 钕玻璃片中,钕玻璃背面镀有全反膜,再次通过钕玻璃,获得双程增益后出射,依次经过 2#、3# 钕玻璃片,然后由端镜 M5 反射,再依次经过 4#、5#、6# 钕玻璃片,由窗口出射,经片箱外部的双程反射镜 M6 反射,再次进入主放大器片箱,依次经过 6#、5#、4# 钕玻璃片、M5、3#、2#、1# 钕玻璃片后,经窗口后出射,由于光路存在一定的离轴量,所以光路经反射镜 M3 后,入射进入透镜 L3,在经取样楔镜 M7 前表面反射进行取样测试,取样光束经凹镜 L4 准直后经窗口镜出射进入测试系统。

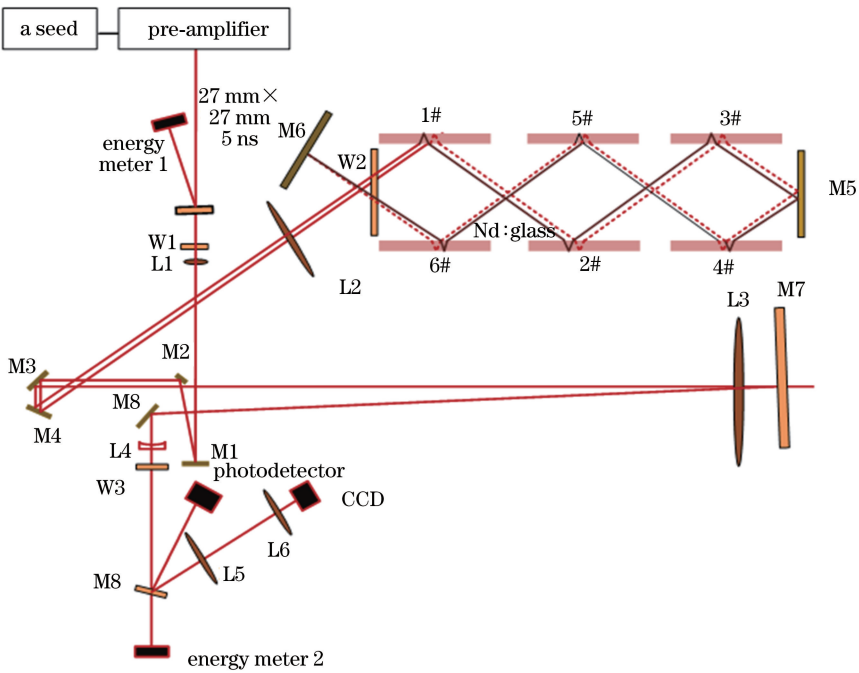


图 1 实验装置光路示意图

Fig. 1 Light path schematic of experimental setup

系统光路设计中采用双程离轴工作方式,与传统的布儒斯特角入射的透射式构型^[14-15]相比,在保证钕玻璃增益介质实现同样 4 次提取下,单程增益高,能量提取效率高;系统光路设计简单,避免了大口径电光开关及偏振片的使用,节约了造价且降低了光路调整难度;同时该系统结构紧凑,缩小了整个激光系统的空间体积。整个光路排布符合像传递规律,M6 位于 L1、L2 构成的空间滤波器的像传输面上。

主放大器整体构成一个模块,主要由窗口、反射镜、钕玻璃、氙灯和腔反射镜组成,装置俯视图如图 2 所示。采用 6 片 N31 型钕玻璃作为增益介质,钕玻璃尺寸为 380 mm×160 mm×30 mm,包边为 5 mm,掺杂浓度为 2.2 % (质量分数),结构上两两对称,有利于单侧未吸收的抽运光被对侧再吸收,提高抽运利用率;氙灯外径为 25 mm,内径为 21 mm,极间距为 1200 mm,横向排布于钕玻璃后侧,每侧

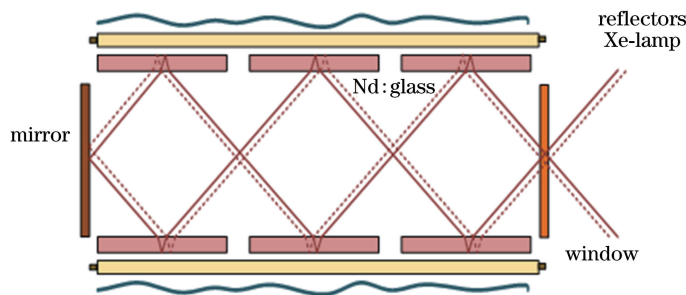


图 2 放大器装置示意图

Fig. 2 Schematic of amplifier experimental setup

均有 5 支,每两支组成一路充电回路,共 5 路充电回路;氙灯背面排布镀银反射板,其结构采用优化设计的渐开线型,更加有效地利用氙灯后向传输光束,使更多的抽运光传输到钕玻璃增益介质上,提高增益介质的储能密度。整个装置处于密封状态,以保证腔内的洁净度。放大器装置整体实物图如图 3 所示。



图 3 放大器装置整体图

Fig. 3 Overall photo of amplifier experimental setup

3 放大的自发辐射和自激振荡的抑制

在高功率激光系统中,由于抽运功率和系统单程增益较高,放大的自发辐射和自激振荡会消耗增益介质储能,降低系统储能提取效率,这对激光系统会产生极大的危害,因此在系统结构设计中必须考虑如何抑制放大的自发辐射和自激振荡。

为抑制钕玻璃增益介质片内寄生振荡和放大的自发辐射,并提高增益系数,对钕玻璃进行包边处理并磨斜,前后表面在长度方向上呈 3° 的倾斜角度;为抑制钕玻璃增益介质片间寄生振荡,相对放置的两张钕玻璃片不能完全平行,呈“八”字排列,两端的 4 张钕玻璃,两两之间的夹角为 1° (各自与竖直方向呈 0.5° 且倾斜方向相反),中间的两张钕玻璃片间张角为 2° 且与两端钕玻璃偏离方向相反,这样保证水平入射的光束经过 3 张钕玻璃片后又回到水平状态。

在放大器模块中,窗口和腔反射镜之间是容易形成自激振荡回路的,虽然窗口镜镀有增透膜,但不

可避免会存在一些残留反射。因此在装校过程中将窗口镜倾斜微小角度。

4 实验结果及分析

实验测得主放大系统的静态透射率为 77%。种子光经预放大系统后输出能量 5 mJ,光斑大小 $27\text{ mm} \times 27\text{ mm}$ 经像传递透镜组 L1 和 L2 后,注入主放大器的光斑大小为 $126\text{ mm} \times 126\text{ mm}$,在系统最佳延时下,实验测试了主放大系统的小信号增益特性。图 4 为不同充电电压下的小信号增益系数和储能效率。在充电电压为 16 kV、储能电容器放电电容为 $116\ \mu\text{F}$ 时,测得小信号增益系数 $g = 0.044\text{ cm}^{-1}$,对应钕玻璃增益介质内储能为 1.99 kJ,系统储能效率为 3.2%。随着注入能量的不断增大,小信号增益系数不断增加,充电电压为 23 kV 时,测得小信号增益系数为 0.056 cm^{-1} ,对应钕玻璃增益介质有效储能为 2.52 kJ,但此时的系统储能效率下降为 2.0%。充电电压为 23 kV 时,对应氙灯的爆炸系数为 0.25,处于安全运行状态。与充电电压为 16 kV 时相比,系统的储能效率下降了 37.5%,分析其原因为:一方面随着抽运功率的增强,横向放大自发辐射(ASE)和级间 ASE 的影响增大,使得钕玻璃增益介质的有效储能下降;另一方面,实验中采用的氙灯放电脉冲较窄,充电电压越高,氙灯放电时峰值电流越高,氙灯发光效率下降,同时出现光谱蓝移,使得钕玻璃吸收的抽运能量减少^[12]。

在充电电压为 22 kV、抽运总能量为 119 kJ 时,实验测得激光系统的输出性能如图 5 所示。随着注入能量的不断增加,输出随之增大,在注入能量为 6.65 J 时,获得最大 349 J 的能量输出。利用 Frantz-Nodvik 方程^[16]对激光放大系统进行了理论模拟,理论计算参数如表 1 所示,模拟曲线如图 5 蓝线所示,可以看出实验值和理论模拟数值较符合,从模拟曲线上可看出继续增加注入能量时,输

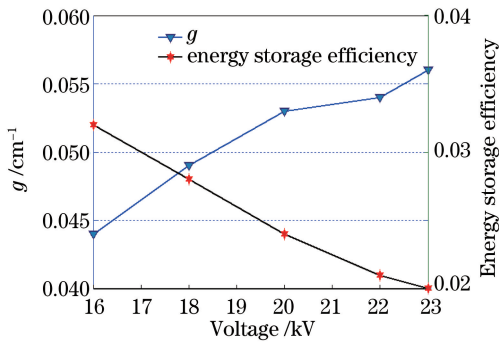


图 4 不同充电电压下的小信号增益系数和储能效率
Fig. 4 Small signal gain coefficient and energy storage efficiency with different charging voltages

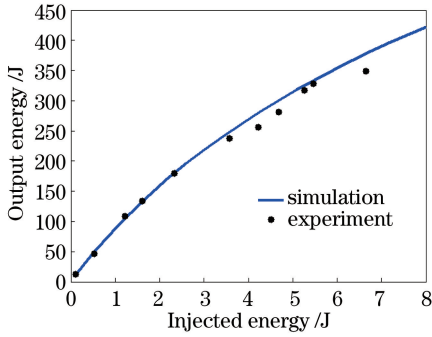


图 5 充电电压为 22 kV 时激光放大器的输出性能
Fig. 5 Output performance of laser amplifier with the charging voltage of 22 kV

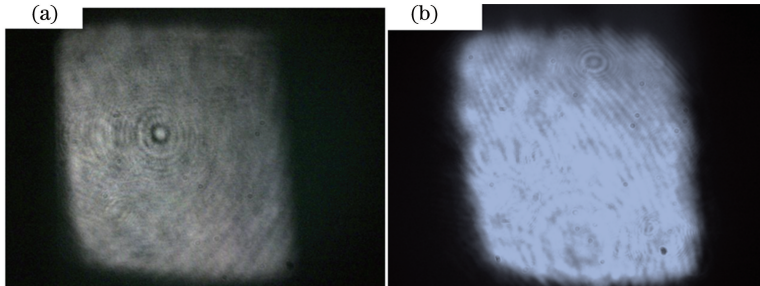


图 6 近场光斑图。(a)静态图;(b)动态图
Fig. 6 Near field spot image. (a) Static image; (b) dynamic image

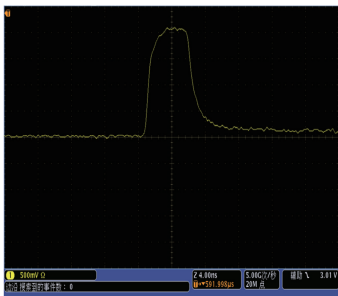


图 7 输出激光脉冲时间波形
Fig. 7 Temporal waveform of the output laser pulse

出能量也会继续增加,当注入能量为 8 J 时,可以获得大于 400 J 的能量输出,但考虑到光学元件的破坏阈值(反射镜 M4 的能流密度约为 14 J/cm²)和系统整体的稳定运行,没有继续增加注入能量。

表 1 理论计算参数

Table 1 Theoretical calculation parameters

Parameter	Value
Linear refraction of Nd:glass	1.528
Saturation energy density of Nd:glass	4.5 J/cm ²
Size of Nd:glass	380 mm×160 mm×30 mm
Charging voltage	22 kV
Discharge capacitor	116 μF
Loss efficiency of circuit transmission	15%

图 6 为激光放大前后的近场光斑,从图中可以看出激光光束呈现近平底分布,没有明显的强区;光斑中的条形调制由 CCD 上的窗口干涉造成,局部圆环可能是由光学元件表面灰尘造成。图 7 为系统输出激光脉冲的时间波形,脉冲宽度为 5 ns,没有明显的增益饱和现象,脉冲后延拖尾由光电探测器造成。

在光学元器件相同面型要求下,有源反射镜式构型与透射式构型相比引入更多的波前畸变,特别是大角度入射时反射式构型对波前畸变更加敏感,因此除对光学元件面型要求外,对反射式构型的装

校要求更高。在钽玻璃片装校过程中,需使钽玻璃

与片框之间实现软接触,可通过顶丝对钽玻璃施加微小的力,并在装校过程中通过干涉仪实时监测,保证每片钽玻璃面型控制在 λ/2。系统联通后,在透镜 L2 后焦点处,通过哈特曼传感器测试了系统的静态波前和远场光斑,如图 8 所示。系统的静态波前峰谷(PV)值为 8.38λ,远场光斑直径为 1.1 mm,其光斑大小约为衍射极限的 27 倍。从图 8 可以看出波前畸变像差主要由像散构成,其主要原因是钽玻璃加工和镀膜过程中不可避免会引入一定的球差,而在激光光束以布儒斯特角入射的情况下,波前畸变中的球差体现为像散。

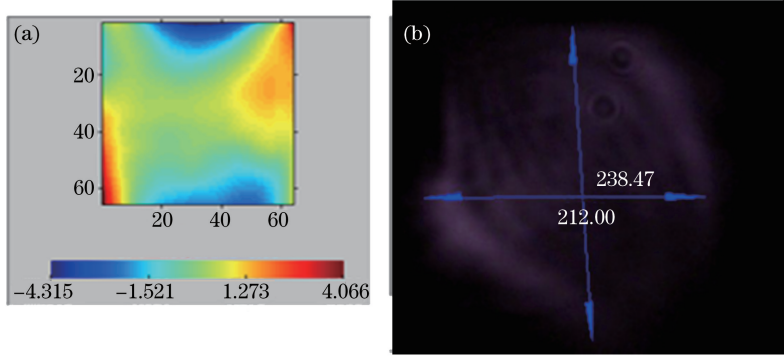


图 8 系统的(a)静态波前畸变和(b)远场光斑

Fig. 8 (a) Static wavefront distortion and (b) far field spot of the system

5 结 论

搭建了一套氙灯抽运的有源反射镜钕玻璃激光放大器系统。实验研究了大口径有源反射镜钕玻璃放大器的增益特性及能量提取。钕玻璃几何尺寸为 $380\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ ，掺杂浓度为 2.2% (质量分数)。充电电压为 23 kV 时，实验测得系统的小信号增益系数为 0.056 cm^{-1} ，储能效率为 2.0% 。充电电压为 22 kV 时，输出激光光斑尺寸为 $126\text{ mm} \times 126\text{ mm}$ ，脉冲宽度为 5 ns ；预放注入能量为 6.67 J 时，激光放大系统获得最大为 349 J 的能量输出。

氙灯抽运激光放大器不可避免会带来大量的热，而采用有源反射镜片状激光放大器构型可以采用背面冷却方式，增益介质表面可以通过直接接触背面的流体而进行冷却，更加有效地解决其热效应问题。实验中在灯箱和腔内充入流动的氮气来保持激光腔内的洁净度，但不能起到冷却的作用，如果实验中在钕玻璃的背面采用液体冷却的方式会减小系统热效应的影响，对光束质量和缩短系统运行周期均有改善作用。

针对系统波前畸变严重的情况，一方面，对于固定的静态波前畸变，可以在系统中引入固定相位的波前相位板进行校正；另一方面，对于动态波前畸变，可以通过引入小口径变形镜来对低阶像差进行校正。

参 考 文 献

[1] Lü L, Wang Q, Zhu J F, *et al.* Efficient mode-locked picosecond Yb : YAG ceramic laser [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(s1): S11410.
 [2] Liu Y, Wang C, Tang X J, *et al.* Laser diode-pumped four Nd : YAG disks laser [J]. Chinese

Journal of Lasers, 2011, 38(12): 1202007.

刘洋, 王超, 唐晓军, 等. 激光二极管抽运四片串联 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202007.

[3] Giesen A, Hugel H, Voss A, *et al.* Scalable concept diode-pumped high-power lasers[J]. Applied Physics B, 1994, 58(5): 365-372.
 [4] Stewen C, Contag K, Larionov M, *et al.* A1-kW CW thin disk laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(4): 650-657.
 [5] Furuse H, Kawanaka J, Saiki T, *et al.* Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb:YAG [J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3439-3441.
 [6] Furuse H, Kawanaka J, Miyanaga N, *et al.* Zig-zag active-mirror laser with cryogenic Yb³⁺:YAG/YAG composite ceramics [J]. Optics Express, 2011, 19(3): 2448-2455.
 [8] Chanteloup J C, Yu H, Bourdet G, *et al.* Overview of the Lucia laser program: towards 100 Joules, nanosecond pulses, kW averaged power, based on ytterbium diode pumped solid [C]. SPIE, 2005, 5707: 105-116.
 [9] Jiang D B, Duan W T, Xu M J, *et al.* High-power laser diode end-pumped Yb : YAG repeat frequency laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1831-1834.
 蒋东滨, 段文涛, 徐美健, 等. 高功率激光二极管端面抽运重复频率 Yb:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1831-1834.
 [10] Cheng X J, Wang J L, Yang Z G, *et al.* Generation of 6.05 J nanosecond pulses at 1 Hz repetition rate from a cryogenic cooled diode-pumped Yb : YAG MOPA system[C]. SPIE, 2014, 9255: 925510.
 [11] Fu X, Liu Q, Li P L, *et al.* High-efficient 2 J, 20 Hz diode-pumped Nd : YAG active-mirror master oscillator amplifier system [J]. Applied Physics

- Express, 2015, 8(9): 092702.
- [12] Liu J, Shi X C, Li L, *et al.* Experiment research on gain characteristic in large aperture active mirror slab amplifiers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0402007.
刘晶, 施翔春, 李磊, 等. 大口径有源反射镜片状放大器增益特性实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402007.
- [13] Hu L L, Chen S B, Meng T, *et al.* Advances in high performance large aperture neodymium laser glasses [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(10): 2560-2564.
胡丽丽, 陈树彬, 孟涛, 等. 大口径高性能激光钕玻璃研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(10): 2560-2564.
- [14] Yamanaka C, Kato Y, Izawa Y, *et al.* Nd-doped phosphate glass laser systems for laser-fusion research[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(9): 1639-1649.
- [15] Brereton S. Overview of the national ignition facility [J]. Health Physics, 2013, 104(6): 554-556.
- [16] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.
Koechner W. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.