

N31 钕玻璃片状放大器增益特性研究

温 磊^{1,2} 陈 林^{3*} 刘建国³ 陈远斌³ 谢旭东³ 刘 勇³ 郑奎兴³ 陈 伟² 胡丽丽² 吴谊群⁴

¹中国科学院大学, 北京 100049

²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元技术研发中心, 上海 201815

³中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

⁴中国科学院上海光学精密机械研究所高密度光存储技术实验室, 上海 201800

摘要 在惯性约束聚变(ICF)激光驱动器中,片状放大器系统为装置提供超过99%的能量,是装置最重要的系统之一。大口径高通量验证实验平台(ITB)装置是我国为开展ICF研究而研制的激光装置,单束输出能量达到19.6 kJ(脉宽5 ns,中心波长1053 nm)。介绍了大口径N31钕玻璃片在ITB装置400 mm单口径片状放大器系统中应用的增益特性。实验结果表明,采用尺寸为810 mm×460 mm×40 mm、Nd³⁺离子浓度为 3.5×10^{20} cm⁻³的N31钕玻璃片,结合装置片状放大器系统放电回路参数与抽运腔结构参数优化,输出小信号增益系数达到5.28%/cm,增益损耗比为15:1;360 mm激光光束口径范围内增益均匀性(最大值/平均值)达到1.063:1。

关键词 激光光学;钕玻璃;片状放大器;400 mm口径;增益特性

中图分类号 TN244 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0402008

Investigation on Gain Properties of N31 Neodymium Glass Slab Amplifiers

Wen Lei^{1,2} Chen Lin³ Liu Jianguo³ Chen Yuanbin³ Xie Xudong³ Liu Yong³
Zheng Kuixing³ Chen Wei² Hu Lili² Wu Yiqun⁴

¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

²High Power Laser Components R&D Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China

³Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

⁴Laboratory for High Density Optics Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract As one of the most important elements in the inertial confinement fusion (ICF) laser device, slab amplifier provides over 99% energy. The integration-test-bed (ITB) is established for the research of ICF in China with the single-beam output energy up to 19.6 kJ (pulse width of 5 ns, center wavelength of 1053 nm). This paper studies characteristics of N31 neodymium glass in 400 mm aperture, single-segment amplifying system of ITB. The N31 glasses with size of 810 mm×460 mm×40 mm and Nd³⁺ ion concentration of 3.5×10^{20} cm⁻³ are used. Results show that combined with the optimized parameters of discharge circuit for slab amplifier and structure of pump cavity, the small signal gain coefficient reaches 5.28% cm⁻¹, the gain ratio is 15:1, and the gain uniformity is 1.063:1 (maximum/average) within 360 mm beam diameter.

Key words laser optics; neodymium glass; slab amplifier; 400 mm aperture; gain characteristics

OCIS codes 160.3380; 140.3280; 140.3530

收稿日期: 2015-10-08; 收到修改稿日期: 2015-11-17

作者简介: 温 磊(1978—),男,硕士,高级工程师,主要从事磷酸盐钕玻璃激光性能方面的研究。E-mail: wenlei@siom.ac.cn

*通信联系人。E-mail: linxiaoqiao@126.com

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)激光驱动器中,片状放大器系统为装置提供超过99%的能量,使装置具备足够高的能量与功率放大能力,将注入的前级激光脉冲能量放大到靶面所需的激光脉冲能量,是装置最重要的系统之一^[1]。大口径高通量验证实验平台(ITB)装置是我国开展ICF研究后由激光聚变研究中心研制的激光驱动器,采用了400 mm单口径N31钕玻璃片作为增益介质,单束输出能量达到19.6 kJ(脉宽5 ns,中心波长1053 nm),与美国国家点火装置(NIF)单束输出能量相当^[2]。

在充分借鉴以往工作的基础上^[3-5],本文介绍了大口径N31钕玻璃片在ITB装置400 mm单口径片状放大器系统中应用的增益特性。通过对放大器系统放电回路参数与抽运腔结构参数的调整,优化整个链路的小信号增益系数及有效口径范围内的增益均匀性。

2 系统基本结构及主要参数

ITB装置采用400 mm单口径片状放大器系统。实验采用大口径N31钕玻璃作为增益介质,其激光物理参数如表1所示,尺寸为810 mm×460 mm×40 mm,与主激光方向呈布儒斯特角放置,可提供400 mm×400 mm的正方形通光口径,基本结构如图1所示。氙灯从两侧对钕玻璃片进行抽运,抽运腔结构采取了紧凑型设计,一是将顶部与底部镀银反射器安装于与钕玻璃片包边平齐的位置,如图2(a)所示;二是两侧灯箱错位排布以减小脉冲氙灯与钕玻璃片的间距,如图2(b)所示。钕玻璃片安装环境洁净度优于100级,以避免表面附着杂质颗粒造成激光损伤;运行完毕后钕玻璃片采用洁净度优于100级的氮气进行吹扫,以促进热畸变的恢复及避免气溶胶在其表面的附着。隔板玻璃置于氙灯和钕玻璃片之间。这样的结构有三个优点:1)可以避免氙灯产生的声波传输进入光路中,引起波前畸变;2)提供一个屏障,避免氙灯腔和片腔之间相互污染;3)形成了一个通道使流动的冷却气体环绕氙灯进行冷却。同时,为了提高系统效率,隔板玻璃镀有化学膜层,对氙灯光的平均透射率大于94%;氙灯反射器采用了镀银处理,对氙灯光的平均反射率大于92%。

表1 400 mm口径N31钕玻璃激光物理参数

Table 1 Laser parameters of 400 mm aperture neodymium glass

Parameter	Value
Nd ₂ O ₃ concentration (mass fraction) /%	3.5
Cross section for stimulated emission / (10 ⁻²⁰ cm ²)	3.8
Lifetime / μs	310
Refractive index	1.532
Density / (g/cm ³)	2.85
Loss coefficient / (%/cm)	0.11

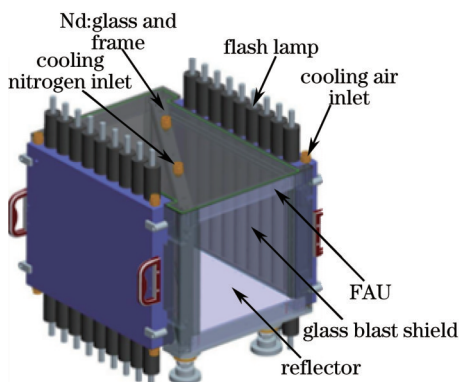


图1 400 mm×400 mm单口径片状放大器基本结构

Fig.1 Structure of slab amplifier with 400 mm×400 mm aperture

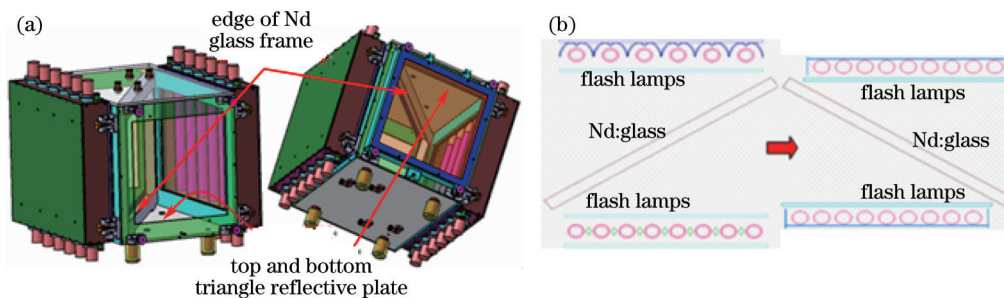


图2 紧凑型抽运腔设计。(a) 底板反射器优化设计; (b) 氙灯与钕玻璃片轴向距离优化设计

Fig.2 Compact design for pump cavity. (a) Optimized design for bottom reflector; (b) optimized design for axial distance between xenon lamp and neodymium glass

系统放电回路参数如表2所示,每个放电回路采用6支氙灯串联方式,每个放大器模块有3个放电回路。放电电流波形为近临界阻尼波形,10%电流脉宽约为620 μs,脉冲氙灯内径为4.2 cm,峰值电流约为22 kA,较长的放电脉宽可降低氙灯工作爆炸系数,提高系统可靠性,而较低的峰值电流可抑制氙灯发光光谱蓝移效应并降低氙灯等离子体对氙灯光的自吸收效应。

表2 系统放电回路参数

Table 2 Parameters of system discharge circuit

Parameter	Value
Voltage /kV	22
Capacitance /(μF/circuit)	367
Inductance/μh	70
Resistance loss /(mΩ/circuit)	75
Arc length of xenon lamp /cm	45
Gas pressure of xenon lamp /kPa	26.66
Inside diameter of xenon lamp /cm	4.2

3 实验结果

小信号增益系数利用能量卡计进行测量,增益均匀性分布则利用CCD进行测量,测量光路如图3所示。利用能量卡计分别测量片状放大器的输入和输出信号能量,输入信号为ITB装置预放系统输出激光,测量时该信号能量约为500 mJ(脉宽5 ns,中心波长1053 nm),近场调制度为1.3左右。首先测量静态(使激光通过放大器而放大器氙灯不工作)时放大器的输入能量 E_{in1} 与输出能量 E_{out1} ;然后测量氙灯光对两个卡计的影响 E_{inh} 和 E_{outb} ,此时测量激光不通过放大器但放大器氙灯正常工作;最后测量动态(测量激光通过放大器且放大器氙灯正常工作)时放大器的输入能量 E_{in2} 和输出能量 E_{out2} ;则片状放大器的总增益 G_D 为^[6-7]

$$G_D = \frac{(E_{out2} - E_{outb}) / (E_{in2} - E_{inh})}{E_{out1} / E_{in1}}, \quad (2)$$

则片状放大器的小信号增益系数 β 为

$$\beta = \ln G_D \frac{n}{t\sqrt{n^2 + 1}}, \quad (3)$$

式中 n 为钕玻璃材料在1053 nm处的折射率, t 为钕玻璃片的总厚度。将能量卡计换为CCD相机,利用相同原理与光路即可测试增益均匀性。

测试系统不同工作电压下的平均小信号增益系数,结果如图4所示,在22 kV设计工作电压下小信号增益系数为5.28% /cm,储能效率为1.47%。实验所使用的大口径N31钕玻璃片静态损耗平均值约为0.11% /cm,抽运过程中钕玻璃片的损耗约为静态时损耗的三倍,因此系统增益损耗比约为15:1。

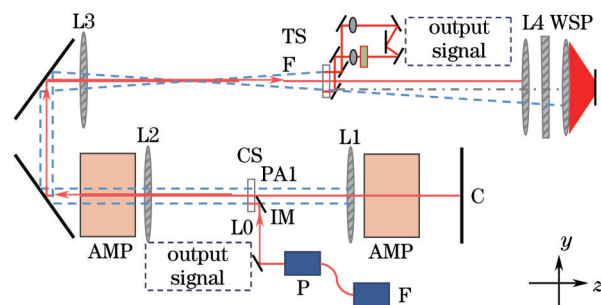


图3 测量光路示意图

Fig.3 Schematic diagram for measurement

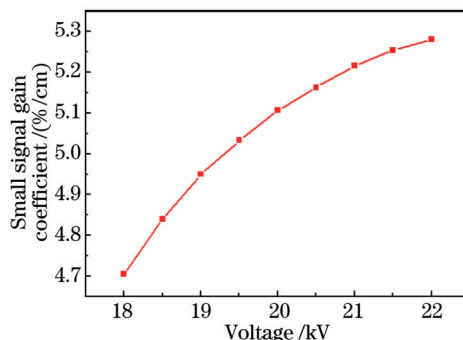


图4 不同电压下小信号增益系数

Fig.4 Small signal gain coefficient versus voltage

利用 CCD 相机对片状放大器增益均匀性进行测量,受系统立轴多程放大光路排布限制,此时所测量的光束区域范围如图 5 所示,测量口径为通光口径边缘 370 mm×370 mm 大小,由于钼玻璃片采取对称抽运方式,测量结果代表了 390 mm×390 mm 口径范围内的增益均匀性。实验测量结果如图 6 所示,系统 390 mm×390 mm 口径范围内的增益均匀性(最大值/平均值)为 1.09:1。ITB 装置主激光光束口径为 360 mm×360 mm,对应该口径范围内增益均匀性(最大值/平均值)约为 1.063:1,满足系统设计要求。

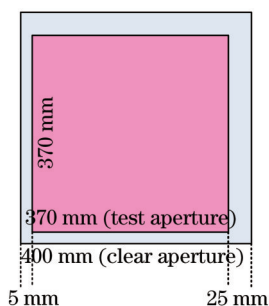


图5 增益均匀性测量口径示意图

Fig.5 Diagram of test aperture for gain uniformity

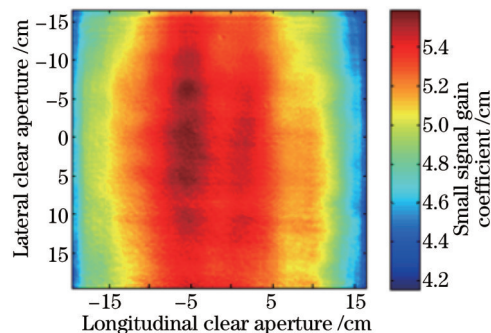


图6 增益分布(边缘 370 mm 口径)实验测量结果

Fig.6 Test results of gain distribution (370 mm aperture)

4 结 论

研究了大口径 N31 钼玻璃片在 ITB 装置 400 mm 单口径片状放大器系统上的应用增益特性,输出平均小信号增益系数达到 5.28% /cm,增益损耗比达到 15:1,360 mm×360 mm 激光光束口径范围内增益均匀性(最大值/平均值)为 1.063:1,综合验证了大口径 N31 钼玻璃片的激光物理性能,保障了 ITB 装置激光输出性能,为今后我国相关装置建设提供了重要的增益介质材料及输出能力保障。

参 考 文 献

1 Rotter M D, Mc Cracken R W, Erlandson A C, *et al.*. Gain measurements on a prototype NIF/LMJ amplifier pump cavity[C]. 2nd

- International Conference on Solid State Lasers for Application to ICF, 1997, UCRL-JC424518.
- 2 Wuest C R, Moses E I. The national ignition facility: laser performance and first experiments[J]. Fusion Science and Technology, 2005, 47(3): 314-322.
- 3 Liu Yong, Chen Yuanbin, Hao Xin, *et al.*. Measurement on gain uniformity of slab amplifiers on integration-test-bed[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s214003.
刘 勇, 陈远斌, 郝 欣, 等. 大口径高通量验证实验平台片状放大器增益均匀性实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s214003.
- 4 Wen Lei, Yang Jingxin, Liu Renhong, *et al.*. Small signal gain coefficients in Nd³⁺ doped phosphate glass[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302009.
温 磊, 杨镜新, 刘仁红, 等. 掺钕磷酸盐玻璃的小信号增益性能[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302009.
- 5 Hao Xin, Chen Lin, Chen Yuanbin, *et al.*. Research on the measurement methods for the gain distribution uniformity of large aperture slab amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108001.
郝 欣, 陈 林, 陈远斌, 等. 大口径片状放大器增益均匀性测量方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s108001.
- 6 Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002.
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- 7 He Shaobo. Studies on characteristic of spontaneous radiation amplify in laser amplifier[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
贺少勃. 激光放大器中自发辐射放大特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.

栏目编辑: 宋梅梅